



ИЗВЕСТИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ

Специальный выпуск

**Геоэкологические последствия
климатических изменений:
основные проблемы
и возможности адаптации**



Выпускающие редакторы:
А. А. Медведков, Е. А. Черенкова



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Том 88, номер 3, 2024

Специальный выпуск:

Геоэкологические последствия климатических изменений:
основные проблемы и возможности адаптации

Выпускающие редакторы: А. А. Медведков, Е. А. Черенкова

ОТ РЕДАКТОРОВ ВЫПУСКА

Геоэкологические последствия климатических изменений: основные проблемы
и возможности адаптации

А. А. Медведков, Е. А. Черенкова

261

ЛАНДШАФТЫ И ЭКОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

Геоэкологические проблемы в контексте климатических изменений:
теоретический анализ и региональные проявления

А. А. Медведков

263

Климатические предпосылки изменений границ ландшафтных зон и подзон
в Европейской части России и Западной Сибири

В. В. Виноградова, Т. Б. Титкова

281

Развитие морфологической структуры ландшафтов криолитозоны в связи
с климатическими изменениями: исследование на основе вероятностного подхода

А. С. Викторov, М. В. Архипова, В. Н. Капралова, Т. В. Орлов, О. Н. Трапезникова

296

Геоинформационное моделирование озерных термокарстовых ландшафтов
Большеземельской тундры для прогноза их развития в условиях климатических изменений

Т. Ю. Зенгина, Г. Г. Осадчая, В. В. Баранов

306

Структура и динамика древостоев *Pinus sibirica* Du Tour на верхнем пределе
их произрастания в западной части Катунского хребта (Алтай) в условиях
климатических изменений

*А. А. Григорьев, С. О. Вьюхин, Ю. В. Шалаумова, Д. С. Балакин, А. С. Тимофеев,
А. М. Громов, Д. Ю. Голиков, Н. Ф. Низаметдинов, П. А. Мусеев*

321

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

Особенности экстремально маловодных лет на реках Русской равнины
в период современного глобального потепления

А. Г. Георгиади

337

Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата на Восточно-Европейской равнине
и их влияние на речной сток (на примере Дона)

Е. А. Черенкова, А. Г. Георгиади, А. Н. Золотокрылин, Е. А. Кашутина

349

Изменения климата и методология оценки климатических рисков в Санкт-Петербурге
и Ленинградской области

В. В. Дроздов, В. А. Лобанов, А. А. Окуличева

365

СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

Климатический фактор в современном цикле развития социоприродных систем
(на примере бассейна озера Имандра)

А. В. Евсеев, Т. М. Красовская

380

Динамика производства зерна в России: соотношение политического
и климатического факторов в историческом контексте

Н. М. Дронин, Д. И. Ковбашин

391

Ландшафтно-климатические условия становления средневековой поселенческой
структуры Верхневолжья

В. А. Низовцев, Н. М. Эрман

404

АДАПТАЦИЯ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА: ОПЫТ СТРАН И РЕГИОНОВ

Адаптация к климатическим изменениям: общие, секторальные и региональные меры
(на примере опыта Индии)

Н. Н. Алексеева, А. И. Банчева

416

Опыт адаптации штата Калифорния (США) к изменениям климата

М. Р. Торгашина, А. А. Медведков

428

Достижение нейтрального баланса деградации земель как индикатор адаптации
наземных экосистем к изменениям климата в Прикаспийском регионе

Г. С. Куст, В. А. Лобковский, О. В. Андреева, Д. С. Шкляева

449

CONTENTS

Volume 88, No. 3, 2024

Special Issue:

Geoecological Effects of Climate Change:
Main Problems and Opportunities for Adaptation

Guest Editors: A. A. Medvedkov and E. A. Cherenkova

Editor's Foreword

Geoecological Effects of Climate Change: Main Problems and Opportunities for Adaptation <i>A. A. Medvedkov and E. A. Cherenkova</i>	261
--	-----

Landscapes and Ecosystems under Climate Change

Geoecological Problems in the Context of Climate Change: Theoretical Analysis and Regional Manifestations <i>A. A. Medvedkov</i>	263
Climatic Prerequisites for Changes of Zonal and Subzonal Landscape Boundaries in European Russia and Western Siberia <i>V. V. Vinogradova and T. B. Titkova</i>	281
Probabilistic Study of the Evolution of Landscape Morphological Patterns in the Cryolithozone in Relation to Climate Change <i>A. S. Victorov, M. V. Arhipova, V. N. Kapralova, T. V. Orlov, and O. N. Trapeznikova</i>	296
Geoinformation Modeling of Lake Thermokarst Landscapes of the Bolshezemelskaya Tundra to Predict Their Development under Climate Changes <i>T. Yu. Zengina, G. G. Osadchaya, and V. V. Baranov</i>	306
Structure and Dynamics of <i>Pinus sibirica</i> Du Tour Forest Stands at the Upper Limit of Their Growth in the Western Part of the Katunsky Range (Altai) under Climate Change <i>A. A. Grigoriev, S. O. Vyukhin, Y. V. Shalaumova, D. S. Balakin, A. S. Timofeev, A. M. Gromov, D. Y. Golikov, N. V. Nizametdinov, and P. A. Moiseev</i>	321

Hydrometeorological Hazards and the Environment

Features of Extremely Low Water Years on the Rivers of the Russian Plain during the Period of the Modern Global Warming <i>A. G. Georgiadi</i>	337
Observed and Expected Climate Changes on the East European Plain and Their Influence on River Flow (Case Study of the Don River) <i>E. A. Cherenkova, A. G. Georgiadi, A. N. Zolotokrylin, and E. A. Kashutina</i>	349
Climate Change and Methodology for Assessing Climate Risks in St. Petersburg and Leningrad Oblast <i>V. V. Drozdov, V. A. Lobanov, and A. A. Okulicheva</i>	365

Socioeconomic Processes under Changing Climate

Climatic Factor in the Modern Cycle of Development of Socio-Natural Systems (on the Example of the Lake Imandra Basin) <i>A. V. Evseev and T. M. Krasovskaya</i>	380
Dynamics of Grain Production in Russia: Influence of Political and Climatic Factors in the Historical Context <i>N. M. Dronin and D. I. Kovbashin</i>	391
Landscape and Climatic Conditions of the Formation of the Medieval Settlement Structure of the Upper Volga Region <i>V. A. Nizovtsev and N. M. Erman</i>	404

Adaptation to Climate Change: Experience of Countries and Regions

Adaptation to Climate Change: General, Sectoral and Regional Measures (the Case of India) <i>N. N. Alekseeva and A. I. Bancheva</i>	416
Experience of Climate Change Adaptation in the State of California (USA) <i>M. R. Torgashina and A. A. Medvedkov</i>	428
Achieving Land Degradation Neutrality as an Integral Indicator of Land Ecosystems Adaptation to Climate Change in the Caspian Region <i>G. S. Kust, V. A. Lobkovskiy, O. V. Andreeva, and D. S. Shklyaeva</i>	449

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ: ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНОСТИ АДАПТАЦИИ

Geoeological Effects of Climate Change: Main Problems and Opportunities for Adaptation

Идея специального выпуска научного журнала “Известия РАН. Серия географическая”, посвященного проблемам изменений климата и их последствиям, возникла по итогам проведения Всероссийской научной конференции с международным участием “Современная геоэкология и вызовы климатических изменений”, прошедшей на географическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова в конце 2022 г. В связи с этим основная часть научных статей спецвыпуска базируется на докладах участников прошедшей конференции, отобранных и обсужденных ее оргкомитетом. Формируя данный номер, мы принимали во внимание, что круг ученых, обеспокоенных проблемами последствий климатических изменений, в последние десятилетия значительно расширился и представлен не только климатологами. Сегодня все более заметная роль в изучении проблемы климатических изменений принадлежит и геоэкологам, значительная часть исследований которых посвящена оценке состояния ландшафтов суши — важнейшего компонента глобальной климатической системы.

Современная геоэкология — молодая наука, ее методический и теоретический аппарат еще находится в стадии активного формирования. “Геоэкология” утвердилась в названии академического института, факультетов и кафедр государственных университетов, специализации выпускников вузов и специальности ВАК, но осмысление ее теоретических основ не успевает за распространением формальных наименований. По-видимому, появление этого термина можно рассматривать как необходимость ответа на большие вызовы, стоящие перед учеными. Поэтому неудивительно, что геоэкологическое направление — одно из актуальнейших направлений в науках о Земле. Представляется, что это обусловлено востребованностью системного осмысления процессов, происходящих в ландшафтной сфере — фокусе географической оболочки, ее приземном слое, где в форме взаимного проникновения и активного энергомассообмена соприкасаются земные оболочки, а также проявляется растущее вторжение человека в геосферно-биосферные процессы. Суммарный эффект нарастающего антропогенного влияния и естественной изменчивости климата выражается не только в ухудшении среды обитания и качества жизни населения, усилении миграционных процессов, вызванных экологически-

ми и климатическими факторами, но и проявляется также в форме растущей конкуренции за жизнеобеспечивающие ресурсы между разными группами населения и отдельными странами. Климатические изменения осложняют ситуацию, усиливая влияние неблагоприятных и экстремальных факторов на наиболее освоенные человеком территории, ландшафты которых утратили значительную часть своих экосистемных функций. Такие территории становятся все более уязвимыми, поэтому вопросы предупреждения и ликвидации стихийных бедствий природного характера оказываются все более обсуждаемыми и получают международный приоритет.

Современная геоэкология насчитывает несколько трактовок, которые имеют определенную специфику в зависимости от родственных корней (геологии или географии), но объединяет их одно — выход на оценку состояния жизнеобеспечивающих ресурсов и экологических функций геосистем, а также анализ их изменений под влиянием внешних (климатических и/или антропогенных) факторов. Чрезвычайно важно, что геоэкологические исследования базируются на геосистемной/ландшафтной основе. Ориентация на геосистемную парадигму обеспечивает привязку геоэкологических проблем к конкретным территориальным подразделениям, имеющим природные границы.

Поэтому отбор научных статей в данный спецвыпуск произведен исходя из раскрытия и обсуждения этих аспектов. Однако часть вопросов все же рассмотрена с учетом административных границ. Это обусловлено необходимостью анализа институционально-управленческого фактора (например, проблемы адаптации к климатическим изменениям на разных территориальных уровнях и динамики урожайности зерновых культур в условиях современного потепления климата).

Специальный выпуск ориентирован на анализ возможностей современной геоэкологии для решения проблемы управления климатическими рисками, особенно на наиболее уязвимых территориях (криолитозона, урбанизированные, семиаридные и аридные районы) и научного обоснования эффективной адаптации к климатическим изменениям на различных пространственных уровнях (региональном и страновом). Наблюдаемые изменения климата

являются триггером разных процессов, в том числе неблагоприятных, ухудшающих качество среды, что безусловно является геоэкологической проблемой. В этом отношении интересны климатически обусловленные отклики малонарушенных, антропогенно-измененных и техногенных ландшафтов. Изменения проявляются в форме трансформации экосистемных функций геосистем, способствующей увеличению риска стихийных бедствий. В этой связи особую важность приобретают исследования, посвященные созданию эффективных технологий дистанционных оценок состояния ландшафтов и развитию методов анализа природных и антропогенных рисков. В спецвыпуске первая из перечисленных задач рассмотрена на примере зональных ландшафтов европейской части России, а также ландшафтов криолитозоны, а вторая обсуждается преимущественно на примере территории криолитозоны. Отдельное внимание уделено проблеме усиления неблагоприятных гидрометеорологических явлений и их связи с изменениями в климатической системе Земли. Усиление неблагоприятных гидрометеорологических явлений — это фактор, влияющий на климаточувствительные отрасли хозяйства, поэтому его рассмотрение представляет интерес и в рамках данного тематического выпуска. Проанализированы также примеры экосистемных изменений, наблюдающихся в условно-коренных ландшафтах, такая информация представляется важной для индикации климатических изменений.

Принимая во внимание антропоцентричность геоэкологии, часть статей тематического номера посвящена анализу развития социо-природных систем в условиях меняющегося климата. В содержательном отношении эти статьи ориентированы на социально-экологическое измерение природно-климатических изменений, что представляется важным для дальнейшего развития принципов регулирования природно-антропогенных геосистем с целью сохранения благоприятной окружающей

среды, жизнеобеспечивающих ресурсов и повышения качества жизни.

Также было важно обозначить проблему, требующую отдельного обсуждения и объединяющую геоэкологию и землеведение. Она заключается в изучении роли меняющихся ландшафтов в климатической системе Земли. Решение этого вопроса, частично затронутого на страницах этого номера, требует дальнейшего исследования связей между состоянием земной поверхности, ее динамикой и потоками тепло- и влагообмена в приземной атмосфере. О значимости этой проблемы свидетельствует уровень внимания, который был уделен ей в Шестом оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC). Развитие данной проблематики, очевидно имеющей преимущественно геоэкологическую окраску из-за значимой роли, отводимой современным ландшафтам в этом вопросе, позволит, по нашему мнению, более обстоятельно подойти к оценке и прогнозу климатических рисков и разработке системы адаптационных мероприятий.

Таким образом, в контексте анализа климатических изменений ключевыми научными проблемами для геоэкологии являются: оценка и прогноз изменений экосистемных функций ландшафтов, жизнеобеспечивающих ресурсов и проблема адаптации населения и территорий к происходящим изменениям природной среды (в том числе с учетом использования подходов ландшафтного планирования, принципов восстановления утраченных экосистем и нарушенных земель). Названные проблемы тесно связаны с оценкой состояния жизнеобеспечивающих ресурсов географической среды, анализом природно-антропогенных рисков, а также разработкой научно-обоснованных мероприятий по смягчению последствий климатических изменений. В этой сфере у геоэкологии накоплен немалый опыт, а его разные аспекты раскрываются в статьях, подготовленных в рамках данного спецвыпуска.

А. А. Медведков^{1,2}, Е. А. Черенкова¹

A. A. Medvedkov^{1,2} and E. A. Cherenkova¹

¹ Институт географии РАН, Москва, Россия
Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

ЛАНДШАФТЫ И ЭКОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

УДК 551.583:551.588+504.7.06:502.6

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ В КОНТЕКСТЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ

© 2024 г. А. А. Медведков^{1, 2, *}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: a-medvedkov@bk.ru

Поступила в редакцию 23.11.2023 г.

После доработки 25.04.2024 г.

Принята к публикации 16.05.2024 г.

Рассмотрена роль климатических изменений и адаптационных мероприятий в формировании геоэкологических проблем, которые по происхождению разделены на следующие группы: 1) вызванные климатогенной динамикой малонарушенных ландшафтов и трансформацией их экосистемных функций (эти последствия показаны на примере таежных ландшафтов южной криолитозоны) или спровоцированные негативным влиянием климатических изменений на природно-антропогенные процессы и геотехнические системы (эти эффекты описаны на примере перигляциальных геосистем, нарушенных горной добычей); 2) обусловленные антропогенной трансформацией ландшафтов и ее последствиями в форме изменения структуры теплового баланса земной поверхности и влагооборота в приземной атмосфере, что проявляется в учащении тепловых стрессов, засух, наводнений и др. стихийных бедствий; 3) порожденные принятием срочных мер по борьбе с изменениями климата и создающие риски для благоприятного состояния окружающей среды. Эта проблематика показана на примере замещения наиболее значимых для регулирования климата влажных тропических лесов плантациями масличной пальмы и соевых бобов, производящих сырье для биотоплива. В контексте рассмотрения средообразующей роли живого вещества охарактеризована модель географической организации биосферы, проанализировано значение ее зонально-функциональных типов для сравнительной оценки уязвимости территорий к изменениям климата. Показано, что представляющие их современные ландшафты, различающиеся по потенциалу тепло- и влагообмена, являются важной частью климатической системы Земли. Проанализированы результаты обработки тепловых инфракрасных снимков для сравнительной оценки гомеостатической функции лесных ландшафтов – важнейших регуляторов теплового баланса земной поверхности. Показана возможность использования приповерхностных температур, полученных по результатам обработки тепловых инфракрасных снимков, для идентификации ландшафтов с разными типами экологических функций в условиях бореальной криолитозоны. Обосновано индикационное значение потоков явного тепла, усиливающих потепление климата из-за продолжающейся абиотизации суши в форме прогрессирующего обезлесения, опустынивания и воздействия техногенной инфраструктуры. Обсуждаются масштабы атмосферно-экологического влияния опустыненных земель на соседние территории в условиях изменения атмосферной циркуляции. Сформулированы концептуальные основы адаптации к изменениям климата, заключающиеся в реализации мероприятий по озеленению и обводнению ландшафтов суши, восстановлению наземной фитомассы и экологической оптимизации земельного фонда стран и территорий на основе максимального учета природной структуры зональных ландшафтов.

Ключевые слова: биосфера, современные ландшафты, последствия климатических изменений, борьба с изменениями климата, экологические функции растительности, турбулентное тепло, отклик ландшафтов, оценки состояния ландшафтов

DOI: 10.31857/S2587556624030011 EDN: SPCWFT

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы. Геоэкологические проблемы и степень их проявления определяются глубиной изменения природных свойств ландшафта, его структуры и функционирования под

влиянием природных и антропогенных факторов, обуславливающих ухудшение качества жизнеобеспечивающих ресурсов, условий жизни населения и его хозяйственной деятельности. Изменения климата для малонарушенных территорий – это основной источник трансформа-

ции ландшафтов и их экосистемных функций, что заметно сказывается на качестве жизни местного населения (Ананичева и др., 2021; Макеев и др., 2014; Медведков, 2018; ACIA ..., 2004; Medvedkov, 2013). В то же время геоэкологические проблемы освоенных регионов формируются вследствие интеграции глобального климатического сигнала и различных видов антропогенного воздействия (в том числе регионального потепления, обусловленного масштабами рукотворной трансформации ландшафтов в форме их абиотизации¹ и фрагментации²). Растущие антропогенные нагрузки на геосистемы снижают эффективность средорегулирующих функций их биоты. Это проявляется в трансформации процессов энерго- и массообмена, стока и испарения, что становится особенно заметным на освоенных территориях с измененной структурой теплового баланса (Hofmann et al., 2021; Munang et al., 2013; Wu et al., 2016). Следовательно, ландшафты являются не только объектами воздействия глобального потепления, но и выступают также в качестве драйверов климатических изменений.

Таким образом, климатические изменения и борьба с их последствиями также являются факторами формирования геоэкологических проблем, которые по их происхождению можно разделить на три большие группы: 1) вызванные климатогенной динамикой ландшафтов и их экосистемных функций или спровоцированные влиянием климатических изменений на природно-антропогенные процессы и геотехнические системы, в том и другом случае ухудшающие качество окружающей среды; 2) обусловленные антропогенной трансформацией ландшафтов и ее последствиями в форме изменения структуры теплового баланса земной поверхности и сокращения масштабов внутриконтинентального влагооборота; 3) порожденные стихийным “лечением” климата при до конца не установленном “диагнозе”, создающем риски для благоприятного состояния окружающей среды. Целью настоящего исследования является рассмотрение упомянутых проблем на ключевых примерах, базируясь на анализе тематических публикаций, обобщении данных полевых и дистанционных исследований.

Теоретические основы геоэкологического анализа климатических рисков. Современная геоэкология — молодая наука, поэтому ее теоретический базис все еще находится в стадии формирования.

¹ Абиотизация ландшафтов — сокращение запасов наземной фитомассы, обуславливающее снижение эффективности средорегулирующих функций растительного и почвенного покровов.

² Фрагментация ландшафтов — процесс трансформации геосистемного покрова из более крупных по площади природно-территориальных комплексов в менее крупные и изолированные рукотворными объектами (искусственными рубежами).

Тем не менее хотелось бы обратиться к одной из концепций, появившейся в ходе становления отечественной геоэкологии и представляющей интерес в контексте обсуждения проблемы уязвимости территорий к климатическим изменениям и смягчения их последствий. Эта концепция о географической организованности биосферы, базирующаяся на учении В.И. Вернадского о живом веществе, отметившего его высокую резистентность и организованность, основанную на взаимодействии сил живой и неживой (косной) природы (Горшков, 2001). Развитый растительный покров — это важнейшее условие устойчивости ландшафта к внешним, как к климатическим рискам, так и к антропогенным, воздействиям, поскольку растительность выступает в роли стабилизирующего, средоформирующего и средозащитного фактора геосистемы (Исаченко, 2003), что особенно заметно проявляется в экстремальных природных условиях (Медведков, 2021). Современное представление об экологических услугах геосистем, по существу, это результат развития учения В.И. Вернадского о живом веществе и его биогеохимических функциях и напоминание о той самой роли, которую выполняет планетарная биота для поддержания и оптимизации окружающей природной среды (регулирование климата, стока, экзодинамических процессов, круговороты питательных веществ, почвообразование и др.).

Концепция географической организованности биосферы в пределах суши разработана профессором МГУ С.П. Горшковым (2001), который базировался на идее французских ученых-геоморфологов А. Кайе и Ж. Трикара (1959), выделивших зонально-функциональные типы биосферы в зависимости от степени трансформированности экзодинамических процессов живым веществом: “голая” биосфера — в нивально-гляциальных областях, “разреженная” — в аридных районах, и “густая” — в гумидных областях (Горшков, 2001). Между тремя названными зонально-функциональными областями размещаются переходные зоны, представленные субнивальными, семиаридными и семигумидными ландшафтами, в которых наиболее заметно проявляется противоборство сил живой и неживой природы. Рассмотренные территории различаются не только по степени организованности экзодинамических процессов биотой, но и по естественному потенциалу противодействия стихийным бедствиям (наводнениям, тепловым стрессам, неблагоприятным геоморфологическим процессам и явлениям климатической природы и др.), в значительной степени регулируемым живым веществом. По существу — это разные модели влагооборота. Так, “густая” биосфера в наибольшей степе-

ни участвует в формировании стока, поэтому крупнейшие бассейново-речные системы с разветвленной системой водотоков приурочены к районам с хорошо развитой лесной растительностью (Горшков, 2001). Хорошо известно, что чем выше биологическая продуктивность ландшафта, тем более значительная часть циркулирующей в нем воды вовлекается во внутренний влагооборот и используется для создания фитомассы (Исаченко, 2003). Поэтому лесные ландшафты еще выступают и в роли важнейших регуляторов теплового баланса земной поверхности, участвуя в формировании климатических условий на макро- и мезоуровне. На территориях “густой” биосферы данная функция проявляется в преобладании потока скрытого тепла над явным, что способствует усилению внутриконтинентального влагооборота, обеспечивает быстрое возвращение в атмосферу значительного количества влаги (Artaxo et al., 2022), тем самым смягчая климат и существенно снижая вероятность тепловых стрессов.

Усложняет рассмотренную типизацию биосферы преобразующая ландшафты деятельность человека, усиливающая потенциал геофизических процессов (т.е. сил неживой природы) в условиях продолжающейся абиотизации суши из-за растущего обезлесения, опустынивания и воздействия техногенной инфраструктуры, выступающей в качестве фактора климатических изменений (Горшков, 2007; Павлов и др., 2010). Механизм усиления геофизических процессов заключается в следующем: освоение ландшафтов способствует снижению мощности биологического круговорота, а солнечная энергия, которую не осваивает биота, расходуется на усиление внешней ветви геологического круговорота. Поэтому территории, наиболее трансформированные антропогенной деятельностью, оказываются особенно уязвимыми к потеплению климата и росту его нестабильности (Hofmann et al., 2021; Lawrence and Vandecar, 2015). Следовательно, специфика влияния климатических изменений на ландшафты зависит не только от зонально-географических условий конкретной территории, но и от степени ее освоенности.

Сегодня очевидно, что при грамотном управлении процессами функционирования природно-антропогенных ландшафтов, основываясь на природных решениях, возможно существенно снизить уязвимость освоенных территорий к климатическим рискам. Поэтому представляется, что в научно-обоснованном управлении природно-антропогенными ландшафтами, в том числе в форме их максимального приближения к природному состоянию конкретных зонально-географических условий, и заложен потенциал геоэкологии, концептуально базирующейся на геосистемной основе. Здесь уместно

вспомнить о получивших широкую известность работах выдающегося русского ученого В.В. Докучаева, посвященных проектированию агроландшафтов в семиаридных условиях, эффективность которых он обосновал на созданном им стационаре “Каменная степь” в Воронежской области. Сходных позиций придерживался еще один отечественный ученый с мировым именем – А.И. Воейков, отметивший в 1893 г., что бороться с засухами необходимо через степное лесоразведение. Дальнейшее развитие этих концепций, геоэкологических по своему содержанию, получило продолжение в современных работах по восстановлению, защите и управлению ландшафтами, в которых сформулированы теоретические основы и обобщен практический опыт адаптации территорий к климатическим изменениям. Вопросы адаптации к климатическим изменениям становятся все более востребованными. Так, за последние три десятилетия фиксируются изменения в приоритетах исследовательской тематики, связанных с изменениями климата: они смещаются из сферы физических основ теории климата в область оценки последствий его изменений и адаптации (Khojasteh et al., 2024). Представляется, что в условиях существующей неопределенности о причинах потепления климата (вкладе разных факторов, в том числе антропогенных), выявленный тренд исследовательских интересов имеет, по-видимому, самое конструктивное значение.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ тематических публикаций, данных полевых и дистанционных исследований, а также результатов моделирования позволил сформулировать основные особенности реакции ландшафтов на климатические изменения, дифференцировать отклик на эти изменения в природных и природно-антропогенных ландшафтах разных физико-географических регионов, а также выявить позитивные и негативные тенденции борьбы с климатическими изменениями и их последствиями. Рассмотрим полученные результаты по следующим укрупненным рубрикам: *современные ландшафты как часть климатической системы; геоэкологические последствия климатических изменений; геоэкологические последствия борьбы с потеплением климата.*

Современные ландшафты как часть климатической системы. Как уже отмечалось выше, разные зонально-функциональные типы биосферы и представляющие их ландшафты являются важнейшей частью климатической системы. К сожалению, их роль в формировании современного климата чаще всего представляется однобоко, в основном через учет потоков парниковых га-

зов, т.е. биогеохимического фактора, тогда как значимость геофизических характеристик меняющихся ландшафтов в общей оценке глобальных изменений рассматривается в меньшей степени. О приоритетности биогеохимического фактора свидетельствуют и преобладающие тенденции в мировой климатической повестке, ориентированные только на квотирование парниковых газов, а не потоков явного тепла. О важности параметризации биосферы писал академик К.Я. Кондратьев (2004), указавший на “ахиллесову пятю” климатических моделей. Это проблема и сегодня имеет не меньшую актуальность. Представляется, что сущность параметризации биосферы заключается в более обстоятельном учете биогеофизических особенностей современных ландшафтов при моделировании климата и тенденций его изменения. О значимости этой научной проблемы свидетельствует уровень внимания, который был ей уделен в шестом оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC, 2022). Учитывая, что с середины XX в. антропогенная трансформация ландшафтов происходила с наибольшей скоростью и масштабом воздействия, чем в любой другой период человеческой истории (Millennium ..., 2005), соответственно, это обстоятельство требует оценки не только с точки зрения анализа потоков парниковых газов, но — а, возможно, прежде всего — с позиции изменения структуры теплового баланса земной суши. Рассмотрение биогеофизического фактора, связанного с преобразованием земной поверхности, в качестве ведущего вполне объясняет существующую связь между интенсивным освоением ландшафтов суши и более сильным прогревом приземной части атмосферы, а также раскрывает выявленное несоответствие в простоте глобальной температуры воздуха между материками и океанами (“теплые материи—холодные океаны”) (Climate ..., 2020), следовательно, и между северным (материковым) и южным (океаническим) полушариями. Это приземное потепление, заметно проявляющееся над сушей, происходит на фоне похолодания в верхней тропосфере и нижней стратосфере, фиксируемого по данным радиозондирования (Горшков, 2007). В этих частях атмосферы также происходит поглощение углекислым газом инфракрасного излучения, но повышения температурного фона не отмечается.

Геоэкологическая роль ландшафтов с разным потенциалом тепло- и влагообмена. На затронутые хозяйственной деятельностью ландшафты приходится более 70% земной суши, не покрытой ледниками (Climate ..., 2020). Дальнейшее освоение суши сопровождается ее абиотизацией, изменением наземной ветви гидрологического цикла, снижением эвапотранспирации

и растущими выбросами явного тепла (Горшков, 2007; Lawrence and Vandecar, 2015), что проявляется в усилении потепления климата, интенсивности, частоты и продолжительности экстремальных природных явлений (Climate ..., 2020). Так, при замещении влажных тропических лесов пастбищными и обрабатываемыми землями поток скрытого тепла снижается в 2–3 раза (Кренке, Золотокрылин, 1984), а прирост потока явного тепла достигает 20–30 Вт/м² (Будыко, 1977), что в 8–12 раз сильнее парникового сигнала, оцениваемого в 2.5 Вт/м² (Горшков, 2007). Это явление вызывает дообогрев приземного воздуха, влияние которого, как отмечает С.П. Горшков (2007), сопоставимо с дополнительным воздействием парникового эффекта на 2.5 млрд га. Таким образом, от “густоты” биосферы (т.е. состояния и запасов фитомассы), определяющей тип тепло- и влагообмена между ландшафтами и приземной атмосферой, по-видимому, и зависит уязвимость территорий к экстремальным явлениям.

На глобальном уровне — леса (область “густой” биосферы) являются основными районами потерь энергии в скрытой форме через эвапотранспирацию (рис. 1). В природно-зональном отношении — это влажные экваториальные и перемменно-влажные леса субэкваториального пояса, а также влажные тропические леса и лесные ландшафты умеренного пояса (смешанные и широколиственные леса, тайга). Из них — влажные экваториальные и тропические леса являются наиболее продуктивными, они транспирируют наибольшее количество влаги (Кренке, Золотокрылин, 1984), что способствует повышению турбулентности приземной атмосферы, перемешиванию воздуха и выпадению атмосферных осадков. В умеренном поясе эту функцию прежде всего выполняют малонарушенные таежные леса, что обусловлено их относительно высокой сохранностью на значительных по площади территориях. Как отмечает А.А. Минин (2011), у лесных, из всех типов растительных сообществ, наиболее развита способность регулирования процессов тепло- и влагообмена. Изменения площади лесных ландшафтов, происходящие в результате облесения, лесовосстановления или обезлесения, самым непосредственным образом воздействует на приземную температуру воздуха. Например, рост площади лесных территорий вызывает за счет увеличившейся эвапотранспирации понижение температур воздуха и снижает остроту жары, способствуя смягчению климата (Climate ..., 2020). Эта функция лесов в своей сущности является гомеостатической. И в этой связи чрезвычайно важно, что Межправительственная группа экспертов по изменению климата в своем шестом оценочном отчете пришла к выводу о том, что защита лесов является одним

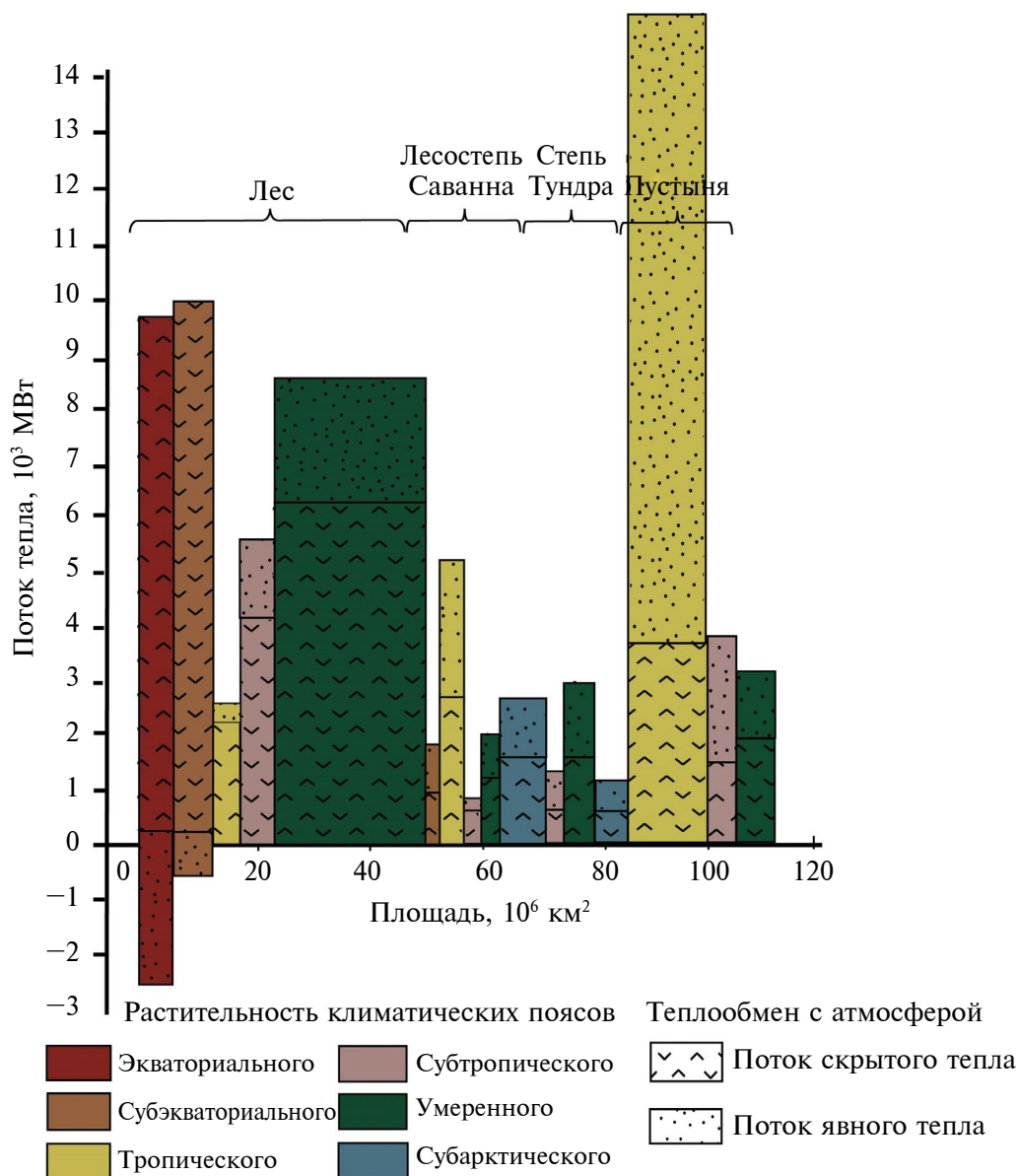


Рис. 1. Потоки скрытого и явного тепла в атмосферу по типам зональной растительности (Котляков, 2001). Климатические пояса (кроме экваториального) представлены на графике разными типами растительности.

из наиболее эффективных способов преодоления климатического кризиса (IPCC, 2022).

На другом полюсе энергетической активности располагаются пустыни и полупустыни (Кренке, Золотокрылин, 1984). Это области “разреженной” биосферы, занимающие по разным оценкам от 30% (Бабаев, 2004) до 40% (Золотокрылин, 2003) неледниковой суши, выделяющие значительные объемы явного тепла в приземную атмосферу (см. рис. 1), усиливая потепление климата. К этой же категории относятся территории с техногенной инфраструктурой (урбанизированные земли, горнодобывающие комплексы и др.), где выпадающие осадки уходят в дренажные системы, что способствует снижению природного потенциала испарения и увеличивает мощность турбулентного теплообмена. Например, в Москве из-за указанного

эффекта в теплое время года поток явного тепла увеличивается на 35 Вт/м^2 (Мягков, 2005). Этот фактор заметно усиливает эффект городского острова тепла. Для смягчения этих вызовов необходимо не только реализовывать природно-климатические решения, но и с целью повышения их эффективности оценивать результативность. В этой связи особую актуальность приобретает разработка технологий по оценке экологической роли разных ландшафтов. Ниже представлены данные, на примере которых апробирована одна из технологий, ориентированная на сравнительную оценку средообразующего потенциала лесных ландшафтов. Она может применяться не только в районах “густой” биосферы, но и имеет также потенциал использования на территориях “разреженной” биосферы, например, для оцен-

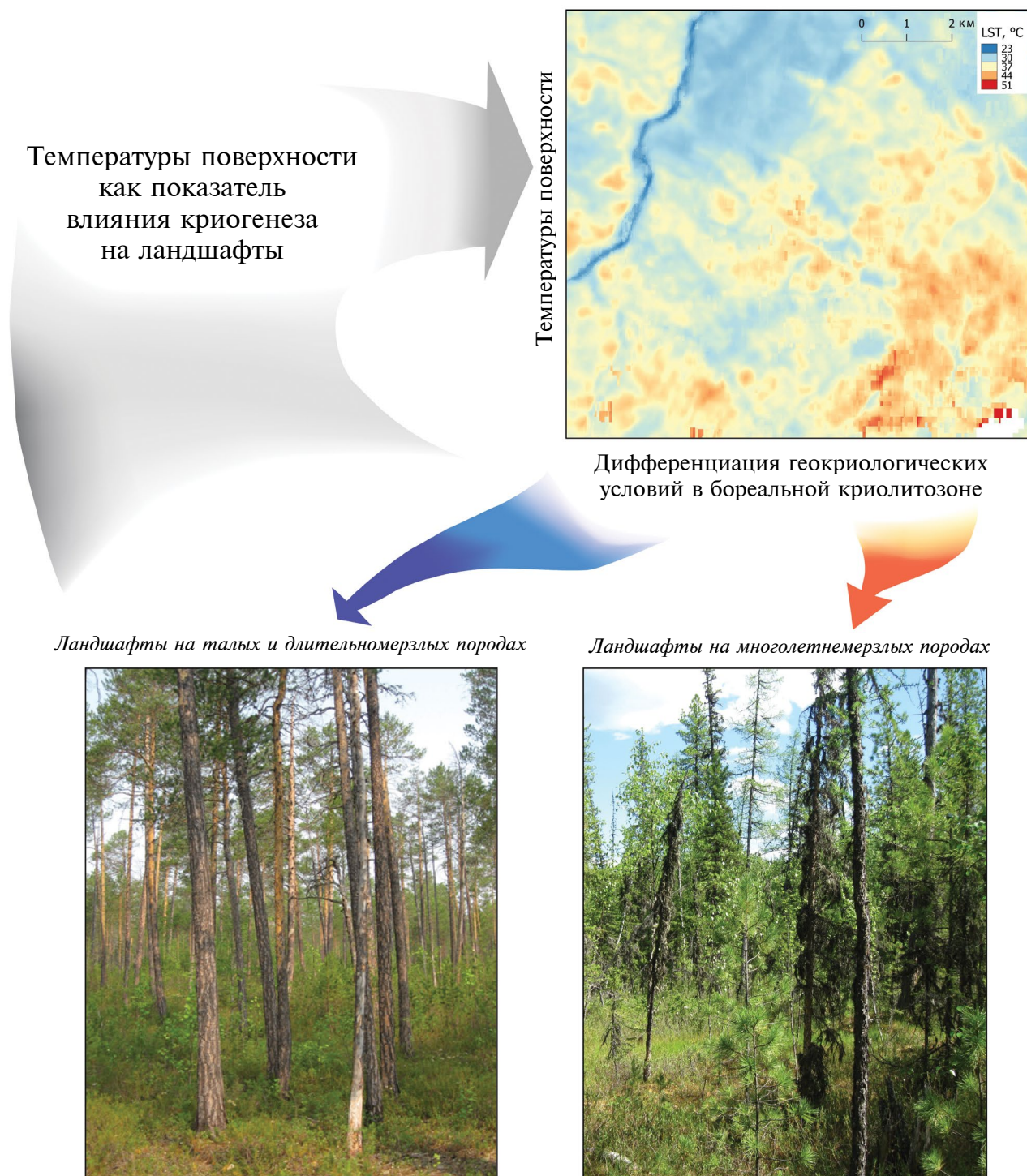


Рис. 2. Особенности тепло- и влагообмена лесных ландшафтов, характеризующихся разной степенью влияния процессов криогенеза на их структуру и функционирование (Medvedkov et al., 2023). Термические характеристики, представленные на тематической карте, индицируют лесные ландшафты с разным потенциалом тепло- и влагообмена в период активной вегетации.

ки эффективности фитомелиоративных работ в аридных и семиаридных районах.

Оценка гомеостатической функции лесных ландшафтов представляется весьма значимой научной проблемой, ориентированной на выявление лесов, обладающих не только наибольшим средообразующим потенциалом, но и требующих повышенного внимания в пожароопасное

время. Представляется, что средообразующая роль растительности может быть оценена в период активной вегетации с использованием данных дистанционного зондирования. Так, термические характеристики дневной поверхности, полученные по результатам обработки тепловых инфракрасных снимков, позволяют сравнивать лесные ландшафты по эффективности их

гомеостатической функции в том числе характеру теплообмена с приземной атмосферой (Медведков, Котова, 2020). Рассчитанные значения приповерхностной температуры характеризуют величину потока явного тепла, выбрасываемого ландшафтом (Горшков, 2015). Наиболее ярко индикационную в этом отношении роль приповерхностных температур можно проиллюстрировать на примере условно-коренных ландшафтов сибирской тайги, функционирующих в условиях островного и прерывистого развития многолетней мерзлоты (Борисов и др., 2017; Медведков, 2016). В этой части бореальной криолитозоны из-за отчетливо выраженного соседства талых пород с многолетнемерзлыми и формируются наиболее контрастные лесорастительные условия. Следовательно, средообразующий потенциал лесных ландшафтов в относительно однородных гипсометрических условиях определяется в основном наличием многолетней мерзлоты и степенью ее влияния на природный комплекс, что отражается на представленной карте приповерхностных температур (рис. 2).

Лесные ландшафты, выделяющиеся по наиболее низким термическим значениям (см. рис. 2), характеризуются минимальным выбросом явного тепла и имеют самый высокий потенциал влагообмена, “сопротивляясь” нагреву приземного воздуха и иссушению лесных горючих материалов в пожароопасный период. Они имеют наибольшие запасы фитомассы и более сложную структуру растительного покрова (Медведков, Котова, 2020; Medvedkov et al., 2023). В бореальной криолитозоне такие природные комплексы приурочены прежде всего к талым, в меньшей степени — к длительномерзлым породам, т.е. участкам, характеризующимся отсутствием или меньшей степенью влияния процессов криогенеза на ландшафты, что было установлено в результате синтезированного анализа температур поверхности и данных полевых исследований.

Оттенки красного цвета на рис. 2 маркируют самые “теплые” природные комплексы, характеризующиеся наиболее высокими значениями приповерхностных температур. Геосистемы такого типа отличаются близким залеганием к поверхности многолетнемерзлых пород, что отражается на структуре их растительности, например, в форме угнетенности и разреженности древостоя (Медведков, 2016; Medvedkov et al., 2023). В ходе экспериментальных исследований выявлено (Галенко, 1976), что для разреженных лесов в малооблачные дни в среднем величины турбулентного теплообмена высоки и сравнимы с затратами тепла на суммарное испарение. Следовательно, количество поступающей к поверхности почвы солнечной радиации зависит от структуры и полноты древостоя, а наибольшая ее величина достигает дневной поверхности в дре-

востоях с широкими межкروновыми просветами (Галенко, 2013). Поэтому в продолжительные периоды с сухой погодой такие ландшафты быстрее прогреваются и иссушаются, являясь источниками повышенной пожароопасности (Медведков, 2016; Medvedkov et al., 2023). Но несмотря на их меньшую роль в водо-энергетическом обмене, т.е. менее выраженную функцию водо- и климаторегулирования, почвенно-растительный покров таких природных комплексов выполняет важную мерзлотно-стабилизирующую функцию. Это обстоятельство позволяет говорить о разной приоритетности регулирующих функций для ландшафтов на мерзлых и талых породах. Таким образом, полученные выводы расширяют возможности использования данных дистанционного зондирования (в том числе тепловой инфракрасной съемки) для картографирования ландшафтов с разной приоритетностью средорегулирующих функций и выявления природных комплексов, характеризующихся наибольшей уязвимостью как к климатическим, так и к антропогенным воздействиям.

Геоэкологические последствия климатических изменений будут рассмотрены на примере малонарушенных и техногенно-измененных территорий, существенно отличающихся по интенсивности антропогенного воздействия, что, по-видимому, является фактором в оценке их уязвимости к потеплению климата и росту его неустойчивости.

Воздействие изменений климата на условно-коренные ландшафты. Климатогенная динамика ландшафтов и трансформация их экосистемных функций (регулирующих и обеспечивающих) наиболее заметно проявляется в экотонных областях. Это те районы, где физико-географические процессы протекают значительно быстрее в связи с повышенной интенсивностью вещественно-энергетических связей между контактирующими геосистемами. Соответственно, явления-отклики здесь визуально более заметны. Например, таким экотоном является южная периферия криолитозоны, поэтому геосистемы, представленные в ее пределах, могут выступать в этом качестве, поскольку граница между мерзлыми и талыми породами наиболее чувствительна к изменению климата. Следовательно, ландшафты, функционирующие в экотонных с позиции геоэкологии условиях — важнейшие индикаторы современных изменений природной среды и климата. В качестве информативной выбрана одна из наименее освоенных частей на южной периферии криолитозоны в пределах территории России, в региональном отношении приуроченная к средней части бассейна р. Енисей. Это область средней тайги и высокотемпературной криолитозоны. На примере этого региона и будут далее

рассматриваться геоэкологические последствия климатических изменений, обусловленные погодно-климатической нестабильностью и изменениями внутригодовой структуры климата, деградацией многолетней мерзлоты и мезомасштабными изменениями циркуляционных процессов в атмосфере. Геоэкологические последствия рассматриваются ниже, они выявлены на основе обобщения накопленной информации, полученной по итогам синтеза результатов полевых и дистанционных исследований.

Деградация многолетней мерзлоты отмечается в пределах мерзлотных редколесий с торфяными почвами (Горшков и др., 2013; Medvedkov, 2016), вызывая снижение их обводненности из-за понижения кровли мерзлых пород, что способствует увеличению опасности лесных пожаров, особенно в засушливые периоды. Это беспокоит местное население из числа коренных жителей и русских старожилов, живущих за счет собирательства, охоты и рыболовства и ведущих промысел на своих участках. Повышению пожароопасности способствует и ослабленная гомеостатическая функция лесов на мерзлоте, из-за чего им сложнее противостоять иссушению лесных горючих материалов при устойчивой погоде антициклонального типа (Medvedkov et al., 2023). Этому также способствует более высокая эффективность молниевых разрядов, обусловленная перепадом электропроводности на границе с мерзлотным водоупором (Харук и др., 2008).

В мерзлотных ландшафтах увеличение мощности деятельного слоя интенсифицирует солифлюкцию (Горшков и др., 2013), а по берегам небольших рек активизируются солифлюкционные оползни-сплывы (Medvedkov, 2016), формирующиеся при максимальном оттаивании органоминеральной массы, что приводит к потере сцепления корней с почвенной массой (Kharuk et al., 2015). Еще более активно мерзлота отступает в основании курумов, распространенных в правобережной части бассейна р. Енисей (Medvedkov, 2015). Это влечет ухудшение транспортной доступности охотничьих участков в летнее время ввиду усиления маловодности малых и средних рек, питающихся стоком. При этом сток формируется за счет таяния гольцовых льдов, регенерация которых в условиях потепления климата ослаблена. Уменьшение криогенной составляющей в питании рек способствует повышению температуры воды, что отмечают коренные жители, образно описывающие выявленную ими динамику в следующем виде “раньше в реку было непросто зайти из-за ледяной воды, а теперь в ней можно купаться”. Эти изменения температурного режима могут сказываться на видах рыб, обитающих в холодной воде (хариус, ленок, таймень и др.) и имеющих промысловое значение. Показано, что с ростом тем-

пературы воды холодолюбивые виды рыб уходят на нерест к северу (АСИА ..., 2004).

Деградация гольцового льда в курумах индицируется по интенсивности их “позеленения”, выражающегося в увеличении наземной фитомассы. Так, курумы, потерявшие льдистое основание, характеризуются ослаблением курумодесерпции, что в дальнейшем способствует кольматации межглыбового пространства мелкоземом и благоприятствует закреплению растений. Скорость “позеленения” курумовых ландшафтов в Среднеенейском регионе (Высоцкая, Медведков, 2022) сопоставима с ее интенсивностью в тундровых, лесотундровых и северотаежных ландшафтах Средней Сибири (Титкова, Виноградова, 2019). Заращение каменистых россыпей мхами, лишайниками, кустарниковой и древесной растительностью, а также исчезновение стока в их основании, сопровождается изменением местообитаний животных (Medvedkov, 2015). Так, известно, что курумы, потерявшие ресурсы влаги, покидает северная пищуха, обеспечивающая кормовую базу соболя, являющегося важнейшим объектом охотничьего промысла для коренного и старожильского населения.

Погодно-климатическая нестабильность и изменения внутригодовой структуры климата сказываются на воспроизводстве биоресурсов и гидрологическом режиме рек. Так, местным населением отмечается снижение урожайности ягод и кедровых орехов, что связывается с сильными заморозками в период цветения (Medvedkov, 2013). Не способствуют высоким урожаям ягод участвовавшие в летнее время неблагоприятные (холодные и/или дождливые, сухие и жаркие) для воспроизводства таежных биоресурсов типы погод. В данных погодных условиях ослаблен отток питательных веществ из листьев в плоды, что было установлено для брусники (Елагин, 1994). Имеются данные и о влиянии увеличившейся продолжительности осенних периодов с ночными заморозками на развитие репродуктивных органов у лиственницы сибирской и сосны обыкновенной с формированием стерильной пыльцы, обуславливающей низкий урожай шишек и семян (Носкова, Романова, 2015), формирующих кормовую базу таежных животных.

Внутригодовые изменения климата негативно сказываются не только на развитии сибирских хвойных, но могут являться и причиной разрушительных ледово-подпрудных наводнений. Одно из таких наводнений, высотой не менее 30 м, произошло в нижнем течении р. Подкаменная Тунгуска в 2001 г. и было образовано ледяной подпрудой. Его формированию предшествовали следующие погодные условия: холодная и аномально малоснежная зима, приведшая к образованию мощного по толщине ледяного покрова (1.5–2 м), а последовавшее за этим в начале весны

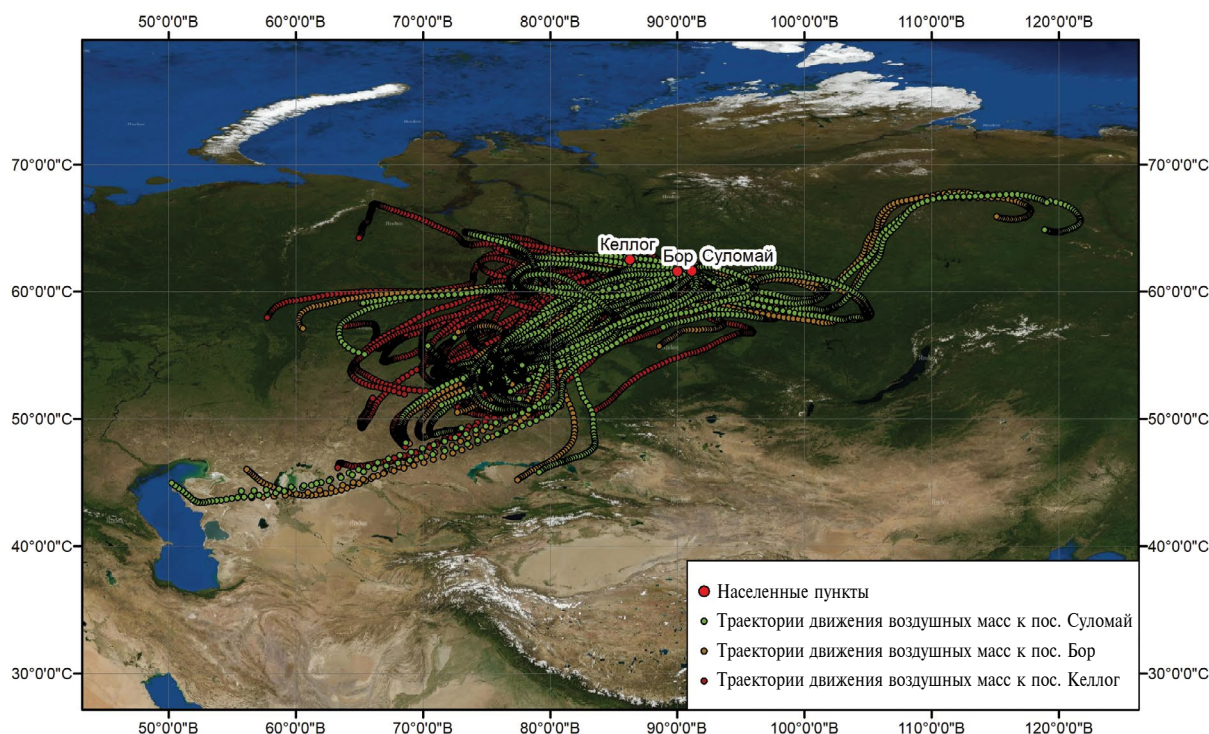


Рис. 3. Обратные траектории движения воздушных масс, рассчитанные для одного из зимних месяцев 2017 г. (на 50-метровой высоте относительно земной поверхности) по дисперсионной модели HYSPLIT — эффективному инструменту для определения источников дальнего переноса загрязняющих веществ в приземной атмосфере.

резкое потепление при ослабленной (практически отсутствующей) фильтрации талой воды в неоттаявшую почву вызвало высокое и даже катастрофическое половодье, совпавшее с ледоходом (Медведков, 2016). В итоге образовалось рекордное по высоте половодье с ледоходом, разрушившее почти все поселение коренных жителей.

Возможность усиления влияния внешних по отношению к Среднеенейскому региону источников экологической опасности установлена на основе расчета обратных траекторий движения воздушных масс по дисперсионной модели HYSPLIT (рис. 3), разработанной американским Национальным агентством по океану и атмосфере (NOAA). В ходе изучения данного вопроса выявлено, что современные изменения циркуляционного режима в Сибири характеризуются усилением меридионального переноса воздушных масс, как в летнее, так и в зимнее время. Так, летом заметно увеличилось влияние северо-западного и северного направлений, а зимой — южного и юго-западного. В этих условиях возрастает вероятность влияния “разреженной биосферы”, в частности Приаралья (см. рис. 3). Об этом свидетельствуют не только расчетные данные, выполненные для разных высот (Медведков и др., 2023; Ge et al., 2016), и полученные на их основе траектории движения воздушных масс, но и наблюдения местного населения, рассказывающие о явлении “желтого снега”, по-ви-

димому, насыщенного тонкодисперсной пылью (Медведков и др., 2023). Опираясь на эти данные, сформулировано предположение, что Приаралье для рассматриваемого региона является поставщиком, преимущественно в зимнее время, аэрозольных минеральных частиц, которые могут сорбировать загрязняющие вещества. Насколько это значимо для экосистем и населения регионов Сибири — открытый вопрос и тема для дальнейших исследований. Этот аспект, тем не менее, необходимо принимать во внимание при анализе актуальных геоэкологических вызовов.

Воздействие изменений климата на техногенные геосистемы рассматривается ниже на примере территорий, нарушенных горной добычей при разработке в Хибинах месторождений апатит-нефелинового сырья (“Апатитовый Цирк”, “Плато Расвумчорр”, Кукисвумчоррского и Юкспорского). Данный пример позволяет проанализировать влияние погодно-климатического фактора на геологическую среду. Так, выявлено (Жукова, 2016), что с начала 2000-х годов в Хибинах увеличилось количество сейсмических событий, которые имели сезонный (весенне-осенний) характер. Такая динамика сейсмичности хорошо соотносится с периодами наибольшей обводненности горных пород. Участки, нарушенные горной добычей, состоящие из выработанных пространств и зон обрушения, являются водосборами атмосферных

осадков, что в дальнейшем обеспечивает более интенсивный приток воды в подземное пространство. Следовательно, таяние снега весной (с апреля по июнь) и обильные осадки осенью (с сентября по октябрь) вызывают резкий рост обводненности горного массива. Проведенный анализ климатических изменений на Кольском полуострове показывает (Marshall et al., 2016), что несмотря на относительно стабильную ситуацию со среднегодовым количеством осадков, в регионе отмечаются заметное увеличение влажности в весеннее время. И в этой связи интересен вывод, полученный С.А. Жуковой (2016) на основе статистической обработки массива данных с 2004 по 2012 г., что увеличение сейсмической активности приурочено к периодам резкого повышения обводненности территории и ее подземного пространства (в том числе тектонических нарушений). В этой связи стоит заметить, что массовые взрывы, являющиеся одним из видов горных работ, не имеют сезонную привязку. Повышение сейсмичности усложняет инженерно-геологические условия разработки месторождений, и в этих условиях существует риск разрушения бортов карьера, обрушения кровли подземных выработок и развития других опасных процессов. Не только увеличение количества осадков в один из сезонов, но и резкие изменения в погоде, характеризующие современный этап потепления климата, отражаются на сейсмической активности территории. Так, С.А. Жукова (2016) отмечает, что резкие колебания (в среднем на $\pm 5^{\circ}\text{C}$) дневной и ночной температуры воздуха, наблюдаемые в переходные сезоны года, также приводят к росту сейсмичности Хибинских гор, нарушенных горной добычей. Таким образом, современные изменения климата, по-видимому, могут влиять и на геодинамические преобразования массива горных пород, что особенно актуально при его высокой трещиноватости. Представляется, что учет данных обстоятельств необходимо принимать во внимание при расчете сейсмического риска в районе планируемого строительства Кольской АЭС-2. Это важно в связи с тем, что для Балтийского щита типична активизация сейсмических процессов (Попова и др., 2016). Так, в отличие от многих классических платформенных структур, перекрытых осадочным чехлом, на Кольском полуострове фиксировались отголоски дальних крупных землетрясений (Попова и др., 2017).

Геоэкологические последствия борьбы с потеплением климата. В Рамочной конвенции ООН об изменении климата сформулировано несколько важных тезисов, один из которых называется принципом предосторожности. Его содержательная сущность заключается в необходимости учета потенциальной угрозы. Это универсальный принцип, используемый и в других международ-

ных экологических соглашениях, положительно зарекомендовавший себя в рамках реализации международного сотрудничества при оценке воздействия на окружающую среду (Богданова, 2016). Применительно к рассматриваемой проблеме, это означает, что отсутствие достаточной научной информации для определения ведущей роли парниковых газов в современном потеплении климата, не должно быть основанием для неприятия мер по сокращению их выбросов. Здесь же стоит заметить, что ставить знак равенства между антропогенным фактором и парниковыми газами не стоит, первое понятие более широкое и должно также учитывать изменение структуры теплового баланса в связи с замещением естественных продуктивных ландшафтов, полевыми, пастбищными и техногенными комплексами, о чем говорилось выше. Стихийная реализация принципа предосторожности в контексте борьбы с потеплением климата, к сожалению, уже приводит к формированию геоэкологических проблем на значительных по площади территориях и создает экологические угрозы в будущем. Наиболее показательным это проявляется при реализации планов по развитию низкоуглеродной энергетики, что требует большей осторожности.

Сырье для биодизеля и абиотизация ландшафтов. Один из наиболее известных примеров стихийной борьбы с потеплением климата проявился в форме замещения влажных экваториальных лесов, наиболее продуктивных ландшафтов земной суши, отличающихся высоким биоразнообразием, плантациями масличной пальмы — высокоурожайной культуры и недорогого источника биодизельного топлива. Конечно, пальмовое масло используется не только в качестве источника для биотоплива, этот продукт широко применяется в пищевой и тонкой химической (парфюмерия, косметика) промышленности. Интерес к пальмовому маслу как к топливному сырью заметно вырос с 2003 г., после принятия Европейской Комиссией директивы Directive 2003/30/EC (RED I) о долгосрочных обязательствах по достижению странами-участницами целевых показателей потребления биотоплива в их транспортном секторе (Головин, Кудрявцева, 2020), направленной на снижение выбросов парниковых газов в атмосферу. Из того объема, что представлен на мировом рынке, сегодня более 30% пальмового масла используется в качестве сырья для биотоплива³. Здесь важно напомнить, что производство биодизеля из плодов масличной пальмы на землях, где ранее произрастали влажные экваториаль-

³ Какие тенденции будут влиять на рынок растительных масел в 2024 году? <https://oleoscope.com/analytics/kakie-tendencii-budut-vlijat-na-rynok-rastitelnyh-masel-v-2024-godu/> (дата обращения 03.04.2024).

ные леса, нельзя отнести к углерод-нейтральным и это не новость сегодняшнего дня. Так, углеродный долг⁴ территории в случае превращения лесных земель в плантационные измеряется сотнями лет (Fargione et al., 2008). При этом ущерб, причиняемый местообитаниям, сложно оценить, поскольку на единицу площади приходится много растений и животных, имеющих в основном небольшой ареал. В Юго-Восточной Азии исчезают местообитания орангутанов (последних, живущих на воле), это создает угрозу существованию этого вида (Гиляров, 2011). Так, анализ материалов дистанционного зондирования на 2013 г. позволяет судить, что почти половина плантаций масличной пальмы в Юго-Восточной Азии располагается в районах, которые в конце 1980-х годов (1989 г.) занимали коренные леса (Vijay et al., 2016). В Южной Америке широко известна проблема потери местообитаний ягуаров из-за увеличения площади плантаций масличной пальмы. Скорость замещения лесных ландшафтов плантационными здесь также высока, поскольку треть плантационных посадок (по данным на 2013 г.) размещается в районах, которые в конце 1980-х годов (1989 г.) были еще лесными (Vijay et al., 2016). Учитывая масштаб существующих угроз для их ареалов, образы этих животных сегодня все активнее используются как символы борьбы с биотопливом (Гиляров, 2011). Выращивание масличной пальмы сопровождается широким использованием пестицидов, гербицидов и удобрений (Darras et al., 2019), что в условиях высокой скорости биогеохимического круговорота веществ может способствовать распространению загрязняющих веществ на соседние малонарушенные территории, неблагоприятно воздействуя на их экосистемы. Более значительной угрозой в результате замещения лесных ландшафтов плантационными представляется рост пожарной опасности, обусловленный как изменением структуры теплового баланса в сторону увеличения потока явного тепла, так и минерализацией торфяников из-за их осушения. Изменения биогеофизических параметров ландшафтов после сведения лесов могут привести к росту температуры и сокращению количества осадков (Bonan, 2008; Lawrence and Vandecar, 2015), т.е. будут способствовать усилению пожароопасности.

Еще один пример обезлесения, масштабный по своему пространственному охвату, также генетически связанный с плантационным хозяйством, но уже в регионе Серрадо — одной

из горячих точек биоразнообразия в мире. Здесь происходит сведение лесов для расширения плантаций сои, в том числе и из-за потребностей биотопливной промышленности, поскольку соевые бобы являются одним из видов сырья для производства биодизеля. Сегодня около четверти соевого масла⁵, представленного на мировом рынке, идет на эти цели, что способствует дальнейшему сведению лесов в Серрадо. Поэтому темпы обезлесения в этом регионе заметно (с 2001 по 2016 г. — почти в два раза) выше, чем в лесах Амазонии (Song et al., 2021). Принимая во внимание высокие обороты этой негативной тенденции, важно подчеркнуть роль древостоя в сохранении экологического баланса на этих территориях. Прежде всего это выражается в том, что древесные растения адаптированы к неблагоприятным условиям засушливого периода за счет наличия у них глубокой корневой системы (до 15 м). Это позволяет им участвовать во влагообороте, транспирируя влагу в сухой сезон и тем самым смягчая климатические условия на значительных по площади территориях. Поэтому из-за вырубки лесов отмечается более интенсивное в регионе потепление климата, создающее в ближайшей перспективе условия для регулярного недостижения точки росы в ночное время, что будет способствовать сокращению количества влаги, столь необходимой для растений и животных в засушливый период года. В этих условиях существует риск исчезновения опылителей, что безусловно отрицательно скажется на биоразнообразии Серрадо (Hofmann et al., 2021).

Замещение саванновых ландшафтов плантационными способствует аридизации климата, что может иметь ощутимые водно-ресурсные последствия не только для водоснабжения населения, сельскохозяйственного водопользования и эффективной эксплуатации гидротехнических сооружений рассматриваемого региона, но и для соседних с ним территорий, поскольку в пределах Серрадо располагаются верхние части бассейнов крупных рек (Парана, Парагвай, Тапажос, Шингу, Арагуя, Токантинс, Сан-Франциско и др.). Влияние меняющейся среды на водный режим рек — это серьезный вызов для значительной части Бразилии. К тому же потепление климата в регионе Серрадо, усиливающееся за счет сельскохозяйственного освоения саванновых ландшафтов, снижает урожайность соевых бобов (каждый день с температурой выше 30°C снижает их урожайность на 1–5%) (Flach et al., 2021). Таким образом, местная растительность и ее экосистемные функции могут рассматриваться в качестве важнейшего фактора,

⁴ Углеродный долг — количество углекислого газа, выбрасываемое в атмосферу при разрушении естественного растительного покрова и сжигания топлива, которое можно снизить, выращивая на этих территориях биотопливные культуры в течение длительного времени (до нескольких столетий).

⁵ Какие тенденции будут влиять на рынок растительных масел в 2024 году? <https://oleoscope.com/analytics/kakie-tendencii-budut-vlijat-na-rynok-rastitelnyh-masel-v-2024-godu/> (дата обращения 03.04.2024).

способствующего повышению эффективности сельского хозяйства и других климатозависимых отраслей экономики, например, гидроэнергетики. Данные обстоятельства создают экономические стимулы для охраны ландшафтов Серрадо.

Совершенно очевидно, принимая во внимание планетарное значение влажных экваториальных лесов и других ландшафтов, что производство сырья для биотоплива не должно осуществляться за счет уничтожения столь продуктивных комплексов. Учитывая, что на территории Бразилии и Индонезии все еще имеются значительные площади, доступные для их сельскохозяйственного освоения, то в качестве альтернативы уместно предложить создание плантаций на восстановленных после деградации землях, имевших в прошлом сельскохозяйственное значение, но эта мера требует гораздо больших вложений. Это безусловно важный, но частный вариант борьбы с обезлесением и абитизацией ландшафтов. Для эффективного решения проблемы необходимы более масштабные меры, направленные на повышение заинтересованности стран в охране своих лесов и других малонарушенных территорий. С определенным скептицизмом, но все-таки в этой связи важно упомянуть о принятом в настоящее время решении ЕС об ограничении использования биомассы с высоким уровнем риска непреднамеренного увеличения выбросов парниковых газов из-за изменений в землепользовании, вызванных увеличением площади обрабатываемых земель. Новая директива ЕС по возобновляемой энергии (RED II) предусматривает к 2030 г. постепенный отказ от использования биотоплива на основе сырья, получаемого за счет сведения лесов, деградации водно-болотных угодий и торфяников. К сожалению, это пока не есть решение проблемы, поскольку не очень понятны косвенные последствия его реализации. В пользу верности этого суждения свидетельствует и один из наметившихся трендов, который вряд ли можно назвать экологичным. Он проявился в виде быстрого роста использования биодизеля в хозяйственном комплексе стран, лидирующих по производству пальмового масла (Индонезия, Малайзия и др.), что может означать сохранение их потенциальной заинтересованности в дальнейшем расширении монокультурных плантаций за счет лесных территорий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

“Лечение” климата, осуществляемое в ходе реализации принципа предосторожности — это большая и сложная задача, требующая не только комплексного взгляда на эту проблему в виде должного внимания к разным факторам (в том числе имеющим антропогенную природу), но

и осторожных, очень продуманных действий при их осуществлении. К сожалению, в настоящее время ни того и ни другого не наблюдается, а мировая климатическая повестка представляется узконаправленной, ориентированной в основном на квотирование потоков парниковых газов, а не на оздоровление освоенной суши, которое могло бы идти по пути восстановления растительного покрова.

Ландшафты суши, являющиеся важнейшей составляющей климатической системы и функциональной частью биосферы, сильно трансформированы. Это проявляется в уменьшении испарительного потенциала преобразованных человеком территорий из-за процессов их абитизации и модификации систем стока, масштабных по своему проявлению. Освоение ландшафтов в результате продолжающегося сведения лесов, прогрессирующего опустынивания и деградации земель, а также растущего воздействия техногенной инфраструктуры уменьшило на суше объемы доступной для испарения влаги. Эти изменения способствовали увеличению мощности потока явного тепла, что не могло не сказаться на интенсивности глобального потепления. В этой связи вполне закономерным представляется наиболее выраженное потепление климата в северном полушарии к северу от двадцатой параллели, где находится не только основная часть суши, но и наиболее значительная площадь антропогенных ландшафтов. Поэтому неудивительно, что крупные преобразования в структуре землепользования стран и территорий являются фактором, обуславливающим изменения теплового баланса земной поверхности, которые ощущаются климатической системой Земли. В связи с этим представляется, что дальнейшее изучение пространственной картины меняющегося теплового баланса земной суши поможет уточнить роль ландшафтных модификаций в изменениях климата.

Исходя из этого представляется, что внимание в мировой климатической повестке должно быть также направлено, а возможно и переориентировано, на такое управление землепользованием, цель которого будет заключаться в снижении потоков явного тепла. В этой связи должны появиться другие индикаторы результативности климатической политики, дополняющие, а возможно и заменяющие те целевые показатели, которые действуют сегодня. Важным также представляется уменьшение атмосферно-экологического влияния “разреженной” биосферы в форме дальнего переноса загрязняющих веществ на соседние территории и государства, что вполне осуществимо за счет реализации фитомелиоративных мероприятий в аридных и семиаридных районах. Для реализации этих задач ландшафтная политика с четко выработанными

принципами должна стать неотъемлемой частью мировой климатической повестки. Необходимо внедрение и распространение мероприятий по озеленению и обводнению ландшафтов суши, восстановлению массы наземного живого вещества и экологической оптимизации земельного фонда стран и территорий на основе максимального учета природной структуры зональных ландшафтов. Важное внимание в этом процессе необходимо уделить развитию технологий по оценке эффективности ландшафтно-экологических решений, направленных как на борьбу с дообогревом приземной атмосферы, так и на смягчение последствий климатических изменений. Геоэкология как одна из важнейших наук о Земле концептуально готова к ответу на этот вызов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Анализ эколого-климатических последствий освоения ландшафтов и обзор геоэкологических проблем, обусловленных борьбой с изменениями климата, выполнены в рамках темы Государственного задания Института географии РАН № АААА-А19-119021990093-8. Сравнительная оценка гомеостатической функции таежных ландшафтов в криолитозоне и анализ реакции условно-коренных геосистем на климатические изменения выполнены за счет гранта РНФ № 21-77-00048.

FUNDING

The analysis of the ecological and climatic consequences of landscape development and a review of geo-ecological problems caused by the fight against climate change were carried out within the framework of the theme of the State Assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences: FMWS-2024-0007 (1021051703468-8). Comparative assessment of the homeostatic function of taiga landscapes in the cryolithozone and analysis of the response of conditionally rooted geosystems to climate change were carried out under the Russian Science Foundation (grant no. 21-77-00048).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананичева М.Д., Литвиненко Т.В., Филиппова В.В. Изменение климата в Республике Саха (Якутия) и его влияние на население: инструментальные измерения и наблюдения местных жителей // Географическая среда и живые системы. 2021. № 3. С. 6–21. <https://doi.org/10.18384/2712-7621-2021-3-6-21>
- Богданова Э.Ю. Оценка воздействия на окружающую среду и принцип предосторожности: международно-правовые аспекты // Право и управление. XXI век. 2016. № 2 (39). С. 28–33.
- Борисов Б.З., Фёдоров П.П., Чикидов И.И., Десяткин А.Р. Выделение многолетнемерзлых пород в зоне их островного распространения по тепловым каналам спутниковых снимков Landsat-7 ETM+ // Успехи современного естествознания. 2017. № 5. С. 78–82.
- Будыко М.И. Глобальная экология. М.: Мысль, 1977. 327 с.
- Высоцкая А.А., Медведков А.А. Климатогенное “позеленение” курумных ландшафтов в долине нижнего течения реки Подкаменная Тунгуска // ИнтерКарто.ИнтерГИС. 2022. Т. 28. № 1. С. 305–313. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2022-1-28-305-313>
- Галенко Э.П. Формирование теплового режима почв хвойных экосистем бореальной зоны в зависимости от лесобразующей породы и типа леса // Изв. Коми научного центра УрО РАН. 2013. Вып. 1 (13). С. 32–37.
- Галенко Э.П. Энергетические факторы продуктивности хвойных лесов северной тайги // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1976. № 4. С. 84–89.
- Гиляров А.М. Неотвратимые угрозы биологическому разнообразию // Природа. 2011. № 9 (1153). С. 3–12.
- Головин М.С., Кудрявцева О.В. Государственная политика по развитию отрасли транспортного биотоплива в Европейском Союзе // Государственное управление. Электронный вестн. 2020. Т. 78. С. 72–90. <https://doi.org/10.24411/2070-1381-2020-10034>
- Горшков С.П. Концептуальные основы геоэкологии. М.: Желдориздат, 2001. 592 с.
- Горшков С.П. Организованность биосферы и устойчивое развитие // Жизнь Земли. 2015. Т. 37. С. 62–84.
- Горшков С.П. Учение о биосфере. Введение. М.: Географический фак-тет МГУ, 2007. 118 с.
- Горшков С.П., Ванденберг Дж., Алексеев Б.А., Мочалова О.И., Тишкова М.А. Климат, мерзлота и ландшафты Среднеевропейского региона. М.: МГУ, 2003. 90 с.
- Елагин И.Н. Времена года в лесах России. Новосибирск, 1994. 271 с.
- Жукова С.А. Оценка влияния обводненности горных пород на проявление техногенной сейсмичности при отработке месторождений Хибинского массива. Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Горный институт КНЦ РАН. Апатиты, 2016. 24 с.
- Золотокрылин А.Н. Климатическое опустынивание. М.: Наука, 2003. 246 с.
- Исаченко А.Г. Введение в экологическую географию. СПб.: СПбГУ, 2003. 192 с.
- Кайе А., Трикар Ж. Проблема классификации геоморфологических явлений // Вопросы климатической и структурной геоморфологии. М.: Изд-во иностранной литературы, 1959. С. 32–66.
- Кондратьев К.Я. Неопределенности данных наблюдений и численного моделирования климата: Всемирная конф. по изменению климата. Труды конференции. М., 2004. С. 196–215.

- Котляков В.М. Избранные сочинения. Кн. 3. География в меняющемся мире. М.: Наука, 2001. 411 с.
- Кренке А.Н., Золотокрылин А.Н. Роль растительного покрова в формировании климата // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1984. № 11. С. 1081–1088.
- Макеев В.М., Клоков К.Б., Колпащиков Л.А., Михайлов В.В. Северный олень в условиях меняющегося климата. СПб.: ГПА, 2014. 244 с.
- Медведков А.А. Геоэкологические факторы жизнестойкости арктических городов в криолитозоне: теоретические подходы к изучению // Изв. РАН. Сер. геогр. 2021. Т. 85. № 5. С. 726–739. <https://doi.org/10.31857/S2587556621050071>
- Медведков А.А. Картографирование криогенных ландшафтов на основе анализа тепловых снимков // ИнтерКарто/ИнтерГИС. 2016. Т. 22. № 1. С. 380–384. <https://doi.org/10.24057/2414-9179-2016-1-22-380-384>
- Медведков А.А. Климатогенная динамика ландшафтов сибирской тайги в бассейне Среднего Енисея // География и природные ресурсы. 2018. № 4. С. 122–129. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-4\(122-129\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-4(122-129))
- Медведков А.А. Среднетаежные геосистемы Приенисейской Сибири в условиях меняющегося климата. М.: МАКС Пресс, 2016. 144 с.
- Медведков А.А., Высоцкая А.А., Гинзбург А.П., Козлов С.М. Итоговый отчет по проекту Рос. науч. фонда № 21-77-00048 “Эколого-географические последствия и риски климатических изменений для жизнеобеспечения кетского этноса – таежных рыболовов и собирателей”. 2023. 31 с. (карточка проекта <https://rscf.ru/project/21-77-00048/>) (дата обращения 05.08.2024).
- Медведков А.А., Котова М.В. Противопожарный потенциал лесов водоохранной зоны озера Байкал (на примере территории Байкало-Ленского заповедника) // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020. Т. 84. № 5. С. 764–775. <https://doi.org/10.31857/S2587556620050118>
- Минин А.А. Некоторые аспекты взаимосвязей наземных экосистем с изменяющимся климатом // Успехи современной биологии. 2011. Т. 131. № 4. С. 407–415.
- Мягков М.С. Влияние мегаполиса Москва на величину испарения // Метеорология и гидрология. 2005. № 3. С. 78–84.
- Носкова Н.Е., Романова Л.И. Влияние климатических изменений на структурно-функциональные свойства мужских генеративных органов сибирских видов хвойных // Хвойные бореальной зоны. 2015. Т. 33. № 1–2. С. 38–42.
- Павлов Д.С., Стриганова Б.Р., Букварёва Е.Н. Экологическая концепция природопользования // Вестн. РАН. 2010. Т. 80. № 2. С. 131–140.
- Попова О.Г., Попов М.Г., Аракелян Ф.О., Недядько В.В. Изучение геодинамики геологической среды в Мурманской области Кольского полуострова с помощью сейсмо-экологического мониторинга / Сергеевские чтения. Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых. М.: РУДН, 2017. С. 549–554.
- Попова О.Г., Попов М.Г., Аракелян Ф.О., Недядько В.В., Васютинская С.Д. Основные результаты по локальному сейсмо-экологическому мониторингу в разных регионах Российской Федерации // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2016. № 6. С. 483–496.
- Пустыневведение как отрасль географической науки // Почвы, биогеохимические циклы и биосфера. М.: КМК, 2004. С. 226–238.
- Титкова Т.Б., Виноградова В.В. Изменения климата в переходных природных зонах севера России и их проявление в спектральных характеристиках ландшафтов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 310–323. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-5-310-323>
- Харук В.И., Двинская М.Л., Им С.Т. Лесные пожары в Эвенкии // Природа. 2008. № 8 (1116). С. 42–47.
- ACIA, Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. ACIA Overview report. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2004. 140 p. <https://www.amap.no/documents/doc/impacts-of-a-warming-arctic-2004/786> (дата обращения 15.03.2024).
- Artaxo P., Hansson H.C., Machado L.A.T., Rizzo L.V. Tropical forests are crucial in regulating the climate on Earth // PLOS Climate. 2022. Vol. 1 № 8. Art. e0000054. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000054>
- Bonan G.B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests // Science. 2008. Vol. 320. № 5882. P. 1444–1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- Darras K.F.A., Corre M.D., Formaglio G., et al. Reducing fertilizer and avoiding herbicides in oil palm plantations-ecological and economic valuations // Frontiers in Forests and Global Change. 2019. Vol. 2. Art. e65. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2019.00065>
- Duarte M., Acácio da Silva T., Paixão de Sousa J., Lemos de Castro A., Lourenço R. Fuzzy inference system for mapping forest fire susceptibility in Northern Rondônia, Brazil // Geography, Environment, Sustainability. 2024. Vol. 17. № 1. P. 83–94. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2023-2910>
- Fargione J., Hill J., Tilman D., Polasky S., Hawthorne P. Land clearing and the biofuel carbon debt // Science. 2008. Vol. 319. P. 1235–1238.
- Flach R., Abrahão G., Bryant B., Scarabello M., Soterroni A.C., Ramos F.M., Valin H., Obersteiner M., Cohn A.S. Conserving the Cerrado and Amazon biomes of Brazil protects the soy economy from damaging warming // World Development. 2021. Vol. 146. Art. e105582. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105582>

- Ge Y., Abuduwaili J., Ma L., Liu D. Temporal variability and potential diffusion characteristics of dust aerosol originating from the Aral Sea basin, Central Asia // *Water, Air, and Soil Pollution*. 2016. Vol. 227. № 2. Art. e63. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2758-6>
- Hofmann G.S., Cardoso M.F., Alves R.J.V., Weber E.J., Barbosa A.A., Toledo P.M., Pontual F.B., Salles L.O., Hasenack H., Cordeiro J.L.P., Aquino F.E., Oliveira L.F.B. The Brazilian Cerrado is becoming hotter and drier // *Global Change Biology*. 2021. Vol. 27. № 17. P. 4060–4073. <https://doi.org/10.1111/gcb.15712>
- IPCC, 2020. Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems. Summary for Policymakers / P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, et al. (Eds.). 41 p.
- IPCC Sixth Assessment Report Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2022: Chapter 7: The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity (<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>) (дата обращения 01.03.2024).
- Kharuk V.I., Shushpanov A.S., Im S.T. Climatogenic dynamics of solifluction in the permafrost zone of Central Siberia // *J. of Siberian Federal Univ. Engineering & Technologies*. 2015. Vol. 8. № 6. P. 744–754. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2015-8-6-744-754>
- Khojasteh D., Haghani M., Shamsipour A., Zwack C.C., Glamore W., Nicholls R.J., England M.H. Climate change science is evolving toward adaptation and mitigation solutions // *WIREs Climate Change*. 2024. Art. e884. <https://doi.org/10.1002/wcc.884>
- Lawrence D., Vandekar K. Effects of tropical deforestation on climate and agriculture // *Nature Climate Change*. 2015. Vol. 5. P. 27–36. <https://doi.org/10.1038/nclimate2430>
- Marshall G.J., Vignols R.M., Rees W.G. Climate change in the Kola Peninsula, Arctic Russia, during the last 50 years from meteorological observations // *J. of Climate*. 2016. Vol. 29. № 18. P. 6823–6839. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0179.1>
- Medvedkov A.A. Geoenvironmental Response of the Yenisei Siberia Mid-Taiga Landscapes to Global Warming during Late XX – Early XXI Centuries // *Water Res.* 2015. Vol. 42. № 7. P. 922–931. <https://doi.org/10.1134/S0097807815070076>
- Medvedkov A.A. Response of middle-taiga permafrost landscapes of Central Siberia to global warming in the late 20th and early 21st centuries. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2016. Vol. 48. Art. e012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/48/1/012009>
- Medvedkov A.A. The Kets ethnos and its “feeding landscape”: ecological-geographical and socio-ecological problems under globalization and changing climate // *Geography, Environment, Sustainability*. 2013. Vol. 6. № 3. P. 108–118. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2013-6-3-108-118>
- Medvedkov A.A., Vysotskaya A.A., Olchev A.A. Detection of geocryological conditions in boreal landscapes of the southern cryolithozone using thermal infrared remote sensing data: A case study of the northern part of the Yenisei Ridge // *Remote Sens.* 2023. Vol. 15. № 2. Art. e291. <https://doi.org/10.3390/rs15020291>
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. <https://www.millenniumassessment.org/en/Reports.html#> (дата обращения 01.03.2024).
- Munang R., Thiaw I., Alverson K., Liu J., Han Z. The role of ecosystem services in climate change adaptation and disaster risk reduction // *Current Opinion in Environ. Sustainability*. 2013. Vol. 5. № 1. P. 47–52. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.02.002>
- Song X.P., Hansen M.C., Potapov P., Adusei B., Pickering J., Adami M., et al. Massive soybean expansion in South America since 2000 and implications for conservation // *Nature Sustainability*. 2021. Vol. 4. № 9. P. 784–792. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00729-z>
- Vijay V., Pimm S.L., Jenkins C.N., Smith S.J. The impacts of oil palm on recent deforestation and biodiversity // *PLOS ONE*. 2016. Vol. 11. № 7. Art. e0159668. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159668>
- Wu M., Schurgers G., Rummukainen M., Smith B., Samuelsson P., Jansson C., Siltberg J., May W. Vegetation–climate feedbacks modulate rainfall patterns in Africa under future climate change // *Earth System Dynamics*. 2016. Vol. 7. № 3. P. 627–647. <https://doi.org/10.5194/esd-7-627-2016>

Geocological Problems in the Context of Climate Change: Theoretical Analysis and Regional Manifestations

A. A. Medvedkov^{a, b, *}

^a Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^b Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: a-medvedkov@bk.ru

The role of climatic changes and adaptation measures in the formation of geo-ecological problems is considered, which are divided into the following groups by origin: (1) caused by climatogenic dynamics of intact landscapes and transformation of their ecosystem functions (these effects are shown on the example of taiga landscapes of the southern cryolithozone) or provoked by the negative impact of climatic changes on natural-anthropogenic

processes and geotechnical systems (these effects are described on the example of periglacial geosystems disturbed by mining); (2) caused by anthropogenic transformation of landscapes and its consequences in the form of changes in the structure of the thermal balance of the Earth's surface and moisture turnover in the surface atmosphere, which is manifested in the increase of thermal stress, droughts, floods, etc. natural disasters; 3) Caused by the adoption of urgent measures to combat climate change and creating risks to the favorable state of the environment. This issue is illustrated by the example of replacing the most important for climate regulation tropical rainforests with oil palm and soya bean plantations producing biofuel feedstock. In the context of consideration of the environment-forming role of living matter, the model of geographical organization of the biosphere is characterized, and the significance of its zonal-functional types for comparative assessment of the vulnerability of territories to climate change is analyzed. It is shown that modern landscapes representing them, differing in their heat and moisture exchange potential, are an important part of the Earth's climatic system. The results of processing thermal infrared images for comparative assessment of homeostatic function of forest landscapes—the most important regulators of the Earth surface heat balance—are analyzed. The possibility of using near-surface temperatures obtained from the results of thermal infrared imagery processing for identification of landscapes with different types of ecological functions in the boreal cryolithozone conditions is shown. The indicative value of apparent heat fluxes that increase climate warming due to ongoing abiotisation of land in the form of progressive deforestation, desertification and impact of anthropogenic infrastructure is substantiated. The scales of atmospheric-ecological impact of deserted lands on neighboring territories under the conditions of atmospheric circulation changes are discussed. The conceptual basis of adaptation to climate change is formulated, which consists in the implementation of measures on greening and watering of land landscapes, restoration of terrestrial phytomass and ecological optimisation of the land fund of countries and territories on the basis of maximum consideration of the natural structure of zonal landscapes.

Keywords: biosphere, modern landscapes, consequences of climate change, combating climate change, ecological functions of vegetation, turbulent heat, response of landscapes, assessments of landscape conditions

REFERENCES

- ACIA. *Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. ACIA Overview report*. CUP, 2004. Available at: <https://www.amap.no/documents/doc/impacts-of-a-warming-arctic-2004/786> (accessed: 15.03.2024).
- Ananicheva M.D., Litvinenko T.V., Filippova V. Climate change in the Republic of Sakha (Yakutia) and its impact on the population: instrumental measurement and observations of the local population. *Geogr. Sreda Zhiv. Syst.*, 2021, no. 3, pp. 6–21. (In Russ.). <https://doi.org/10.18384/2712-7621-2021-3-6-21>
- Artaxo P., Hansson H.C., Machado L.A.T., Rizzo L.V. Tropical forests are crucial in regulating the climate on Earth. *PLOS Clim.*, 2022, vol. 1, no. 8, art. e0000054. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000054>
- Bogdanova E. Environmental impact assessment and the precautionary principle: international legal aspects. *Pravo Upravl. XXI Vek*, 2016, no. 2, pp. 28–33. (In Russ.).
- Bonan G.B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, vol. 320, no. 5882, pp. 1444–1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- Borisov B.Z., Fedorov P.P., Chikidov I.I., Desyatkin A.R. Isolation of permafrost in the area of their sporadic distribution using thermal channels of Landsat-7 ETM + satellite images. *Uspekhi Sovrem. Estestvozn.*, 2017, no. 5, pp. 78–82. (In Russ.).
- Budyko M.I. *Global'naya ekologiya* [Global Ecology]. Moscow: Mysl' Publ., 1977. 327 p.
- Cailleux A., Tricart J. The problem of classification of geomorphological facts. In *Vopr. klimaticheskoi i strukturnoi geomorfologii* [Issues of Climatic and Structural Geomorphology]. Moscow: Izd-vo inostrannoi literatury, 1959, pp. 32–66. (In Russ.).
- Darras K.F.A., Corre M.D., Formaglio G., et al. Reducing fertilizer and avoiding herbicides in oil palm plantations-ecological and economic valuations. *Front. For. Glob. Change*, 2019, vol. 2, art. e65. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2019.00065>
- Desert studies as a branch of geographical science. In *Pochvy, biogeokhimicheskie tsikly i biosfera* [Soil, Biogeochemical Cycles and Biosphere]. Moscow: KMK Publ., 2004, pp. 226–238. (In Russ.).
- Duarte M., Acácio da Silva T., Paixão de Sousa J., Lemos de Castro A., Lourenço R. Fuzzy inference system for mapping forest fire susceptibility in Northern Rondônia, Brazil. *Geogr., Environ., Sustain.*, 2024, vol. 17, no. 1, pp. 83–94. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2023-2910>
- Elagin I.N. *Vremena goda v lesakh Rossii* [Seasons in the Forests of Russia]. Novosibirsk, 1994. 271 p.
- Fargione J., Hill J., Tilman D., Polasky S., Hawthorne P. Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science*, 2008, vol. 319, pp. 1235–1238.
- Flach R., Abrahão G., Bryant B., Scarabello M., Soterroni A.C., Ramos F.M., Valin H., Obersteiner M., Cohn A.S. Conserving the Cerrado and Amazon biomes of Brazil protects the soy economy from damaging warming. *World Dev.*, 2021, vol. 146, art. e105582. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105582>

- Galenko E.P. Energy factors of productivity of coniferous forests of the northern taiga. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 1976, no. 4, pp. 84–89. (In Russ.).
- Galenko E.P. Thermal regime formation of soils in coniferous ecosystems of boreal zone in reference to dominating tree species and forest type. *Izv. Komi Nauch. Tsentra UrO RAN*, 2013, no. 1, pp. 32–37. (In Russ.).
- Ge Y., Abuduwaili J., Ma L., Liu D. Temporal variability and potential diffusion characteristics of dust aerosol originating from the Aral Sea basin, Central Asia. *Water Air Soil Pollut.*, 2016, vol. 227, no. 2, art. e63. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2758-6>
- Ghilyarov A.M. Inescapable threats to biological diversity. *Priroda*, 2011, no. 9, pp. 3–12. (In Russ.).
- Golovin M.S., Kydryavtseva O.V. State policy for transport biofuel industry development in the European Union. *Gos. Uprav. Elektr. Vestn.*, 2020, no. 78, pp. 72–90. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2070-1381-2020-10034>
- Gorshkov S.P. *Kontseptual'nye osnovy geoeologii* [Conceptual Foundations of Geoecology]. Moscow: Zheldorizdat Publ., 2001. 592 p.
- Gorshkov S.P. *Uchenie o biosfere. Vvedenie* [The Doctrine of the Biosphere. Introduction]. Moscow: Geogr. Fakul'tet MGU, 2007. 118 p.
- Gorshkov S.P. Organization of the biosphere and sustainable development. *Zhizn' Zemli*, 2015, vol. 37, pp. 62–84. (In Russ.).
- Gorshkov S.P., Vandenberg J., Alekseev B.A., Mochalova O.I., Tishkova M.A. *Klimat, merzlota i landshafty Sredneeniseiskogo regiona* [Climate, Permafrost and Landscapes of the Middle Yenisei Region]. Moscow: MGU, 2003. 90 p.
- Hofmann G.S., Cardoso M.F., Alves R.J.V., Weber E.J., Barbosa A.A., Toledo P.M., Pontual F.B., Salles L.O., Hasenack H., Cordeiro J.L.P., Aquino F.E., Oliveira L.F.B. The Brazilian Cerrado is becoming hotter and drier. *Glob. Change Biol.*, 2021, vol. 27, no. 17, pp. 4060–4073. <https://doi.org/10.1111/gcb.15712>
- IPCC. *Climate Change and Land*. An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems. Summary for Policymakers. Shukla P.R., Skea J., Calvo Buendia E., et al., Eds. 2020.
- Isachenko A.G. *Vvedenie v ekologicheskuyu geografiyu* [Introduction to Ecological Geography]. St. Petersburg.: SPbGU, 2003. 192 p.
- Kharuk V.I., Dvinskaya M.L., Im S.T. Forest fires in Evenkiya. *Priroda*, 2008, no. 8, pp. 42–47. (In Russ.).
- Kharuk V.I., Shushpanov A.S., Im S.T. Climatogenic dynamics of solifluction in the permafrost zone of Central Siberia. *Zh. Sibir. Fed. Univ. Tekhn. Tekhnol.*, 2015, vol. 8, no. 6, pp. 744–754. (In Russ.). <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2015-8-6-744-754>
- Khojasteh D., Haghani M., Shamsipour A., Zwack C.C., Glamore W., Nicholls R.J., England M.H. Climate change science is evolving toward adaptation and mitigation solutions. *WIREs Clim. Change*, 2024, art. e884. <https://doi.org/10.1002/wcc.884>
- Kondrat'ev K.Ya. Uncertainties of observational data and numerical climate modeling. In *Vsemirnaya konf. po izmeneniyu klimata. Tr. konf.* [World Climate Change Conf. Proc. of the Conf.]. Moscow, 2004, pp. 196–215. (In Russ.).
- Kotlyakov V.M. *Izbrannye sochineniya. Kniga 3. Geografiya v menyayushchemsya mire*. [Selected Works. Book 3. Geography in a Changing World]. Moscow: Nauka Publ., 2001. 411 p.
- Krenke A.N., Zolotokrylin A.N. The role of vegetation cover in climate formation. *Izv. Akad. Nauk. Fizika Atm. Okeana*, 1984, no. 11, pp. 1081–1088. (In Russ.).
- Lawrence D., Vandekar K. Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. *Nat. Clim. Change*, 2015, vol. 5, pp. 27–36. <https://doi.org/10.1038/nclimate2430>
- Makeev V.M., Klovov K.B., Kolpashchikov L.A., Mikhailov V.V. *Severnyi olen' v usloviyakh menyayushchegosya klimata* [Reindeer in a Changing Climate]. St. Petersburg: GPA Publ., 2014. 244 p.
- Marshall G.J., Vignols R.M., Rees W.G. Climate change in the Kola Peninsula, Arctic Russia, during the last 50 years from meteorological observations. *J. Clim.*, 2016, vol. 29, no. 18, pp. 6823–6839. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0179.1>
- Medvedkov A.A. The Kets ethnos and its “feeding landscape”: ecological-geographical and socio-ecological problems under globalization and changing climate. *Geogr., Environ., Sustain.*, 2013, vol. 6, no. 3, pp. 108–118. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2013-6-3-108-118>
- Medvedkov A.A. Geoenvironmental response of the Yenisei Siberia mid-taiga landscapes to global warming during late XX–early XXI centuries. *Water Resour.*, 2015, vol. 42, pp. 922–931. <https://doi.org/10.1134/S0097807815070076>
- Medvedkov A.A. Mapping of permafrost landscapes based on the analysis of thermal images. *InterKarto. InterGIS*, 2016, vol. 22, no. 1, pp. 380–384. (In Russ.). <https://doi.org/10.24057/2414-9179-2016-1-22-380-384>
- Medvedkov A.A. Response of middle-taiga permafrost landscapes of Central Siberia to global warming in the late 20th and early 21st centuries. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2016, vol. 48, art. e012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/48/1/012009>
- Medvedkov A.A. *Srednetaezhnye geosistemy Prieniseiskoi Sibiri v usloviyakh menyayushchegosya klimata* [Middle Taiga Geosystems of Yenisei Siberia in a Changing Climate]. Moscow: MAKSS Press Publ., 2016. 144 p.
- Medvedkov A.A. Climatogenic dynamics of Siberian taiga landscapes in the Middle Yenisei River basin. *Geogr. Prir. Resur.*, 2018, no. 4, pp. 122–129. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-4\(122-129\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-4(122-129))
- Medvedkov A.A. Geoenvironmental factors of resilience of arctic cities in the cryolithozone: theoretical approaches to the study. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2021, vol. 85, no. 5, pp. 726–739. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2587556621050071>

- Medvedkov A.A., Kotova M.V. Fire-Fighting Capability of Forests in Water Protection Zone of Lake Baikal (Case Study of Baikal-Lena Nature Reserve). *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2020, vol. 84, no. 5, pp. 764–775. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S2587556620050118>
- Medvedkov A.A., Vysotskaya A.A., Ginzburg A.P., Kozlov S.M. *Itogovyi otchet po proektu RNF № 21-77-00048 “Ekologo-geograficheskie posledstviya i riski klimaticheskikh izmenenii dlya zhizneobespecheniya ketskogo etnosa – taezhnykh rybolovov i sobiratelei”* [Final Report on the RSF Project No. 21–77–00048 “Ecological and Geographical Consequences and Risks of Climate Change for the Livelihoods of the Ket Ethnic Group – Taiga Fishermen and Gatherers”], 2023. 31 p.
- Medvedkov A.A., Vysotskaya A.A., Olchev A.A. Detection of geocryological conditions in boreal landscapes of the southern cryolithozone using thermal infrared remote sensing data: A case study of the northern part of the Yenisei Ridge. *Remote Sens.*, 2023, vol. 15, no. 2, art. e291.
<https://doi.org/10.3390/rs15020291>
- Millennium Ecosystem Assessment*, 2005. Available at: <https://www.millenniumassessment.org/en/Reports.html#> (accessed: 01.03.2024).
- Minin A.A. Some aspects of the interrelationships of terrestrial ecosystems with a changing climate. *Uspekhi Sovrem. Biol.*, 2011, vol. 131, no. 4, pp. 407–415. (In Russ.).
- Munang R., Thiaw I., Alverson K., Liu J., Han Z. The role of ecosystem services in climate change adaptation and disaster risk reduction. *Curr. Opin. Env. Sust.*, 2013, vol. 5, no. 1, pp. 47–52.
<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.02.002>
- Myagkov M.S. The influence of the megalopolis Moscow on the amount of evaporation. *Meteorol. Gidrol.*, 2005, no. 3, pp. 78–84. (In Russ.).
- Noskova N.E., Romanova L.I. The influence of climatic changes on the structural and functional properties of male generative organs of Siberian coniferous species. *Khvoyn. Boreal. Zony*, 2015, vol. 33, no. 1–2, pp. 38–42. (In Russ.).
- Popova O.G., Popov M.G., Arakelyan F.O., Nedyadko V.V. Studying the geodynamics of the geological environment in the Murmansk region of the Kola Peninsula using seismic and environmental monitoring. In *Sergeevskie chteniya. Geoekologicheskaya bezopasnost' razrabotki mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* [Sergeev Readings. Geoecological Safety of Mineral Deposits Development]. Moscow: RUDN, 2017, pp. 549–554. (In Russ.).
- Popova O.G., Popov M.G., Arakelyan F.O., Nedyadko V.V., Vasyutinskaya S.D. The main results in local seismic ecological monitoring in different regions of the Russian Federation. *Geoekol. Inzhener. Geol. Gidrogeol. Geokriol.*, 2016, no. 6, pp. 483–496. (In Russ.).
- Pavlov D.S., Striganova B.R., Bukhareva E.N. Ecocentric concept of nature management. *Vestn. RAN*, 2010, vol. 80, no. 2, pp. 131–140. (In Russ.).
- Song X.P., Hansen M.C., Potapov P., Adusei B., Pickering J., Adami M. et al. Massive soybean expansion in South America since 2000 and implications for conservation. *Nat. Sustain.*, 2021, vol. 4, no. 9, pp. 784–792.
<https://doi.org/10.1038/s41893-021-00729-z>
- The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity. In IPCC Sixth Assessment Report Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2022. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> (accessed: 01.03.2024).
- Titkova T.B., Vinogradova V. V. Climate changes in transitional natural areas of Russian northern regions and their display in landscape spectral characteristics. *Sovrem. Probl. Dist. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2019, vol. 16, no. 5, pp. 310–323. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-5-310-323>
- Vijay V., Pimm S.L., Jenkins C.N., Smith S.J. The impacts of oil palm on recent deforestation and biodiversity. *PLoS ONE*, 2016, vol. 11, no. 7, art. e0159668.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159668>
- Vysotskaya A.A., Medvedkov A.A. Climate-driven “greening” of the kurum landscape in the valley of the lower reaches of the Podkamennaya Tunguska river. *InterKarto. InterGIS*, 2022, vol. 28, no. 1, pp. 305–313. (In Russ.).
<https://doi.org/10.35595/2414-9179-2022-1-28-305-313>
- Wu M., Schurgers G., Rummukainen M., Smith B., Samuelsson P., Jansson C., Siltberg J., May W. Vegetation–climate feedbacks modulate rainfall patterns in Africa under future climate change. *Earth Syst. Dyn.*, 2016, vol. 7, no. 3, pp. 627–647.
<https://doi.org/10.5194/esd-7-627-2016>
- Zhukova S.A. Assessment of the influence of rock waterlogging on the manifestation of technogenic seismicity during mining of the Khibiny massif. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Engineering) Dissertation*. Apatity: Mining Institute KSC RAS, 2016. 24 p.
- Zolotokrylin A.N. *Klimaticheskoe opustynivanie* [Climatic Desertification]. Moscow: Nauka Publ., 2003. 246 p.

ЛАНДШАФТЫ И ЭКОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ
МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

УДК 551.581.2

**КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИЗМЕНЕНИЙ ГРАНИЦ
ЛАНДШАФТНЫХ ЗОН И ПОДЗОН В ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ
И ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

© 2024 г. В. В. Виноградова^{1,2,*}, Т. Б. Титкова^{1,**}

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²НИУ “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

*e-mail: vvvinog@yandex.ru

**e-mail: titkova@igras.ru

Поступила в редакцию 11.10.2023 г.

После доработки 29.11.2023 г.

Принята к публикации 16.05.2024 г.

Глобальное потепление с различной степенью интенсивности проявляется в изменении ландшафтов равнин России. Продуктивность, биомасса и границы распространения растительности меняются в соответствии с динамикой теплообеспеченности и увлажнения. Последствием глобального потепления может быть смещение границ ландшафтных зон. В работе оцениваются изменения климатических характеристик ареалов природных ландшафтов равнин России, произошедших в результате глобального потепления последних двух десятилетий, которые могут создать предпосылки возможных изменений в ландшафтных зонах и подзонах. Исследования проводились для европейской части России и Западной Сибири от арктических до полупустынных ландшафтов. Использованы данные 265 метеостанций за 2000–2022 гг. и количественного показателя фотосинтетической активной биомассы – нормализованного вегетационного индекса NDVI за летний период. Рассматривались климатические характеристики: среднегодовая температура, температура января и июля, сумма температур выше 10°C, сумма годовых осадков, коэффициент увлажнения, их средние значения и стандартное отклонение, а также тренды за период 2000–2022 гг. Установлено, что в лесотундровой зоне наблюдается положительный тренд суммы активных температур и отрицательный тренд осадков. Коэффициент увлажнения уменьшается. Климатические условия на ряде участков тундры, лесотундры и северной и средней тайги изменяются и теперь соответствуют более южным ландшафтным зонам, что создает благоприятные условия для изменения растительности, проявляется в росте NDVI и может привести к смещению границ ландшафтных зон в более высокие широты. На юге России наблюдается увеличение суммы активных температур и иссушение территории, что отражается в уменьшении NDVI и может привести к расширению зоны степей, сухих степей и полупустынь. Реакция растительного покрова на климатические изменения подтверждается изменениями нормализованного вегетационного индекса.

Ключевые слова: ландшафтные зоны и подзоны, изменения климата, теплообеспеченность, температура, сумма активных температур, осадки, увлажнение, нормализованный вегетационный индекс NDVI

DOI: 10.31857/S2587556624030027 **EDN:** SOZAPE

ВВЕДЕНИЕ

Расчеты, приведенные в Шестом оценочном докладе об изменениях климата, показывают, что по всем сценариям глобальная приземная температура будет продолжать расти, по меньшей мере, до середины столетия. Глобальное потепление на 1.5 и 2°C может быть достигнуто в течение XXI в., если в предстоящие десятилетия не произойдет резкого сокращения выбро-

сов CO₂ и других парниковых газов (IPCC, 2022). В Арктике потепление может в два раза превышать скорость глобального потепления (IPCC, 2022). На территории России десятилетие 2011–2020 гг. было самым теплым за всю историю наблюдений (Третий ..., 2022; WMO ..., 2021), при этом количество глобальных осадков растет над сушей, но существуют районы, где засушливость усиливается.

Потепление различной степени интенсивности происходит практически на всей территории России (Третий ..., 2022) и может способствовать изменениям равнинных ландшафтов. По определению А.М. Рябчикова (1972), ландшафты определяются генетически однородными природными территориальными комплексами с однотипным составом и взаимосвязью основных компонентов геосферы (тепла, влаги, морфоструктуры, почв и биоценозов). Количественные критерии дифференциации ландшафтов, обуславливающие их зональность, Рябчиков определял по соотношению годового увлажнения и радиационного баланса или суммы активных температур, то есть по соотношению тепла и влаги. Продуктивность, биомасса и границы распространения растительности меняются в соответствии с динамикой теплообеспеченности и увлажнения. Последствием глобального потепления может быть смещение ландшафтных границ (Титкова, Виноградова, 2019; Vinogradova et al., 2021). В частности, в (Белоновская и др., 2016) отмечается сдвиг границы предтундровых редколесий на север и более медленное продвижение границы леса на север на Европейской территории России (ЕТР). Для высокоарктических и тундровых биомов возможно появление более южных видов, связанное с повышением температуры воздуха, а увеличение количества осадков и высоты снежного покрова может способствовать росту разнообразия кустарничков и цветковых растений (Тишков и др., 2019).

По мнению ряда исследователей, изменение климата одновременно влечет опасность значительной утраты биоразнообразия (Гребенюк, Кузнецова, 2014; Соловьев, 2007). Это проявляется в вытеснении одних древесных пород другими, зачастую менее ценными, снижении чистой продуктивности экосистем и биомов. Вследствие климатических изменений зоны распространения многих видов могут продвинуться в северном направлении или вверх по склону на возвышенностях и в горах. В России процессы трансформации сосняков могут затронуть 70% площадей и 50% — для ельников. Смешанные леса и дубравы можно отнести к менее чувствительным к потеплению климата, а самыми устойчивыми будут лиственничные леса Восточной Сибири. По прогнозам МГЭИК, к 2100 г. могут исчезнуть 30% сосновых и еловых лесов (Доклад ..., 2018).

Таежные ландшафты, расположенные на южной периферии криолитозоны, в подзонах островной и прерывистой вечной мерзлоты также могут быть подвержены трансформации при дальнейшем потеплении климата. Эти трансформации будут сопровождаться уменьшением площади мерзлотных ландшафтов и развитием высокобонитетных лесов с хорошо развитым на-

почвенным покровом (Медведков, 2018). В работе (Высоцкая, Медведков, 2022) подчеркивается, что зарастание курумов можно считать индикатором изменения границ зональных типов ландшафтов, поскольку эти ландшафты на западе Среднесибирского плоскогорья переходят в состояния, более характерные для южной тайги. Необходимо отметить, что ландшафты криолитозоны по-разному реагируют на климатические изменения (Васильев и др., 2020; Шполянская и др., 2022). Различия наблюдаются между северными и южными районами криолитозоны и связаны с характером наземных покровов. В частности, потепление климата, которое приводит к увеличению глубины сезонного протавивания и создает более благоприятные условия для растительности и увеличивает проективное покрытие кустарников (Васильев и др., 2020).

В горах отмечается продвижение древесной растительности в виде редколесий и кустарников в пояс горных тундр (Третий ..., 2022). В бореальных ландшафтах изменение климата и участвовавшие пожары смещают экотон южной тайги к северу (Brazhnik et al., 2017), а в неморальных ландшафтах восточная граница распространения широколиственных пород деревьев постепенно смещается на восток (Fedorov et al., 2021). В последние десятилетия в темнохвойных лесах гор Южной Сибири происходит массовое усыхание темнохвойных лесов (Бажина и др., 2013; Сайгин и др., 2019; Чебакова и др., 2022; Tchebakova et al., 2022), которое связывают с изменениями климата и аридизацией условий произрастания горных лесов (Воронин и др., 2019; Kharuk et al., 2017).

К середине XXI в., по данным модельных прогнозов, для большинства ландшафтов климатические условия уже могут не соответствовать господствующему типу растительности (Второй ..., 2014; Жильцова, Анисимов, 2015; Третий ..., 2022), например, как показано в работе (Anisimov et al., 2017) гипоарктические тундровые и частично арктические тундровые биомы будут становиться пригодными для развития лесной растительности. Также прогнозируется, что в XXI в. в более теплом и сухом климате сибирские леса сдвинутся на северо-восток, а на юге увеличатся по площади лесостепи и степи (Третий ..., 2022).

Целью работы является оценка изменений климатических характеристик ландшафтных зон/подзон равнин европейской части России и Западной Сибири, произошедших в результате глобального потепления двух последних десятилетий, которые могут создать предпосылки возможных изменений в ландшафтных зонах/подзонах, а также проявления этих изменений в спектральных характеристиках растительного покрова. В данной работе рассматриваются только климатические характеристики ландшафтов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на Европейской территории России и Западной Сибири (ЗС) от арктических до полупустынных ландшафтов на основании данных 265 метеостанций (<http://meteo.ru/>) за 2000–2022 гг. Использование данных метеостанций позволило провести анализ климатических изменений за два последних десятилетия, а система дистанционного мониторинга дала возможность оценивать тренды изменения характеристик подстилающей поверхности.

Рассматривались климатические характеристики: среднегодовая температура ($T_{\text{год}}$), температуры самого холодного месяца (января) ($T_{\text{январь}}$) и самого теплого месяца (июля) ($T_{\text{июль}}$), сумма активных температур выше 10°C ($\Sigma T10^{\circ}$), сумма годовых осадков (ΣP), коэффициент увлажнения ($K_{\text{увл}}$).

Коэффициент увлажнения представлен отношением годового количества осадков к годовой величине испаряемости для данного ландшафта и является показателем соотношения тепла и влаги. Он показывает, насколько велико количество осадков, выпадающих в течение периода в рассматриваемом регионе, что, в свою очередь, является одним из основных факторов, определяющих преобладающий тип растительности в этой местности. Был использован коэффициент увлажнения Иванова–Мезенцева (Иванов, 1954; Мезенцев, 1973), который рассчитывается по формуле: $K_{\text{увл}} = P/E$, где P – годовое количество осадков; E – испаряемость за год. В.С. Мезенцев предложил рассчитывать испаряемость за год (E) через сумму активных температур выше 10°C по формуле:

$$K_{\text{увл}} = \Sigma P / (0.2 \times \Sigma T10^{\circ} + 306),$$

где 306 – коэффициент, учитывающий в общей формуле сток. Значения $K_{\text{увл}} > 1$ характеризуют зоны избыточного увлажнения, $K_{\text{увл}} < 1$ – недостаточного, $K_{\text{увл}} \approx 1$ – оптимального.

В табл. 1 показаны диапазоны изменений климатических параметров для равнинных ландшафтов России, представленные в работе (Базилевич и др., 1986), где были проанализированы связи экосистем с климатическими условиями для базового климата (до потепления – 1960-е – 1970-е годы). Средний диапазон значений NDVI – нормализованного вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – за летний период 2000–2018 гг. для каждой ландшафтной зоны оценивался на основании работы (Титкова и др., 2020). Климатические характеристики для современного климата сравнивались с базовым климатом. Считалось, что если более половины климатических параметров соответствует дру-

Таблица 1. Климатические характеристики природных равнинных экосистем России

Параметр/ландшафтная зона, подзона	Тундра	Лесотундра	Северотаяжные леса	Среднетаяжные леса	Южно-таежные леса	Хвойно-широколиственные леса (подтаежные)	Широколиственные леса	Лесостепи	Степи		Полупустыни
									настающие	сухие	
Средняя температура самого теплого месяца, $^{\circ}\text{C}$	8–12	10.8–13.3	10.6–15.8	15.6–17.7	16.2–18.7	15.8–19.3	16.9–23.2	17.1–21.4	20–23.8	22.4–25.2	24.3–25.5
Сумма активных температур больше 10°C	182–637	526–843	643–1337	1276–1737	1525–2085	1585–2336	2870–3626	1990–3125	2488–3611	2358–3596	3329–3641
Годовая сумма осадков, мм	531–782	528–700	554–757	632–852	570–884	551–851	395–720	482–830	373–633	332–510	229–373
Коэффициент увлажнения	1.4–1.94	1.01–1.38	0.945–1.39	1.01–1.39	0.79–1.28	0.75–1.27	0.38–0.7	0.52–1.12	0.4–0.73	0.33–0.56	0.22–0.38
Среднегодовая температура, $^{\circ}\text{C}$	–7.6–0.8	–5.9–0.0	–3.2–0.9	–1.6–3.0	1.0–4.5	2.1–6.6	7.8–12.0	2.7–9.0	3.1–11.0	6.1–10.6	7.9–10.4
Средняя температура самого холодного месяца, $^{\circ}\text{C}$	–21.4...–5.8	–20.5...–10.1	–18.2...–10.8	–17.6...–9.6	–15.8...–7.2	–15.8...4.1	–5.1...2.6	–14.4...–0.5	–15.8...0.1	–11.8...0.8	–8.7...–3.9
Абсолютная минимальная температура, $^{\circ}\text{C}$	–54.0...–51.0	–54...–33	–55...–39	–55...–33	–52...–38	–54...–34	–36...–22	–52...–26	–47...–26	–39...–28	–40...–32
Число станций	15	11	35	37	53	63	95	53	79	78	13

Составлено по: (Базилевич и др., 1986).

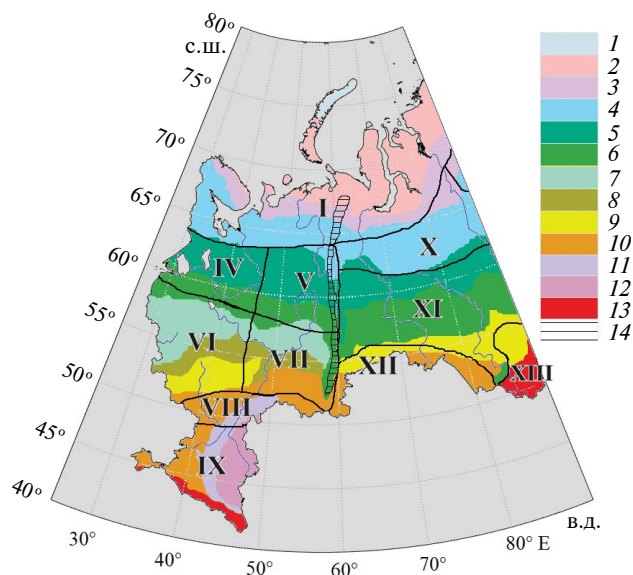


Рис. 1. Квазиоднородные климатические регионы (границы показаны линиями черного цвета): I – атлантическая Арктика; IV, V, VI, VII, VIII – северо-запад, северо-восток, юго-запад, юго-восток и степная часть Восточно-Европейской равнины; IX – степи и предгорья Северного Кавказа; X, XI – северная и южная части лесной зоны Западной Сибири, XII – степная зона Западной Сибири (Доклад ..., 2023). Цветом показаны ландшафтные зоны (Национальный ..., 2007, с. 398–399): 1 – арктические пустыни, 2 – тундра, 3 – лесотундра, 4 – северная тайга, 5 – средняя тайга, 6 – южная тайга, 7 – подтаежная зона, 8 – широколиственно-лесная, 9 – лесостепь, 10 – степь, 11 – сухая степь, 12 – полупустыня, 13 – высокогорные ландшафты, 14 – низкогорные ландшафты.

гой ландшафтной зоне, то по климатическим условиям эту метеостанцию можно отнести к “новой” ландшафтной зоне/подзоне.

Для крупных квазиоднородных климатических регионов согласно (Доклад ..., 2023), для равнинных районов европейской территории России и Западной Сибири (рис. 1) получены средние по квазиоднородному региону значения и стандартные отклонения климатических параметров за 2000–2022 гг. в ландшафтных зонах/подзонах (табл. 2), определенных до начала потепления (Ландшафтная ..., 1988; Национальный ..., 2007), а также тренды климатических характеристик за период 2000–2022 гг. (табл. 3). Значимость трендов определялась по критерию Стьюдента с вероятностью 0.95.

Реакция растительного покрова на климатические изменения оценивалась с помощью анализа количественного показателя фотосинтетической активной биомассы – нормализованного вегетационного индекса NDVI, который представляет собой нормированную разность альбедо подстилающей поверхности в видимой и ближней инфракрасной области

спектра и базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках спектральной кривой отражения со- судистых растений. Плотность растительности (NDVI) в определенной точке изображения равна разнице интенсивностей отраженного света в красном и инфракрасном диапазоне, деленной на сумму их интенсивностей и вычисляется по формуле: $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$, где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра, RED – отражение в красной области спектра. В красной области спектра (0.6–0.7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасной области (0.7–1.0 мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листа. То есть высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с густой растительностью) ведет к меньшему отражению в красной области спектра и большему в инфракрасной. Отношение этих показателей друг к другу позволяет отделять растительные от других природных объектов. Использование нормализованной разности при расчете NDVI между минимумом и максимумом отражений увеличивает точность измерения, позволяет уменьшить влияние таких явлений как различия в освещенности снимка, облачности, дымки, поглощение радиации атмосферой.

Для анализа вегетационного индекса использовались данные спектрорадиометра MODIS спутника дистанционного зондирования земли Terra/NASA модели MOD13C2 версии 6.1 для среднемесячных значений с разрешением CMG $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ (около 5×5 км) за летний период 2000–2022 гг. Данные модели предоставлены центром обработки данных по наблюдению за Землей (LP DAAC) (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13c2v061/>). Был обработан ежемесячный продукт модели MOD13C2, который состоит из ежедневных значений, полученных при безоблачных пространственных снимках. Ежемесячные значения NDVI были осреднены за летний период. Согласно (Титкова и др., 2020), в тундре ЕТР и ЗС при разреженной растительности значения NDVI составляют 0.5–0.6. При продвижении на юг и увеличении густоты растительности NDVI растет до 0.7 в зоне лесотундры до 0.76 в северной тайге и достигает своего максимума 0.85 в южной тайге и в подтаежных лесах 0.82. В широколиственных лесах NDVI – около 0.73. Далее на юг, при увеличении радиационного баланса вегетационный индекс уменьшается в зоне лесостепей до 0.69, а в степях до 0.51. В полупустыне на ЕТР при разреженной и сухой растительности NDVI падает до 0.23.

Таблица 2. Средние климатические параметры и их стандартное отклонение для равнинных ландшафтных зон/подзон Европейской территории России и Западной Сибири за период 2000–2022 гг. по квазиоднородным климатическим регионам

Регион	Ландшафтная зона/подзона	Кол-во станций	$T_{\text{июль}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{год}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{январь}}, ^\circ\text{C}$	$\Sigma T_{10^\circ}, ^\circ\text{C}$	$\Sigma P, \text{мм}$	$K_{\text{увл}}$
Атлантическая Арктика	арктические пустыни	3	3.3 ± 1.3	-9.7 ± 3.3	-18.7 ± 4.2	164 ± 54	217 ± 91	0.70 ± 0.27
Европейский Север	тундра	11	12.1 ± 2.0	0.1 ± 1.3	-9.7 ± 3.1	657 ± 75	433 ± 92	1.00 ± 0.22
	лесотундра	5	13.5 ± 2.1	-0.6 ± 1.2	-13.3 ± 4.0	848 ± 68	479 ± 80	1.00 ± 0.21
	северная тайга	18	15.8 ± 2.0	1.1 ± 1.1	-12.2 ± 3.7	1271 ± 61	561 ± 93	1.01 ± 0.20
Север Западной Сибири	тундра	6	10.2 ± 2.5	-7.3 ± 2.5	-21.5 ± 4.8	465 ± 81	337 ± 98	0.87 ± 0.25
	лесотундра	6	15.0 ± 2.2	-5.8 ± 1.7	-24.3 ± 5.4	1010 ± 37	481 ± 102	0.95 ± 0.24
	северная тайга	8	16.5 ± 2.2	-4.0 ± 1.6	-24.3 ± 5.6	1319 ± 9	541 ± 101	0.98 ± 0.20
Северо-запад ЕТР	средняя тайга	10	17.9 ± 2.0	3.3 ± 0.8	-10.5 ± 3.4	1805 ± 14	643 ± 84	0.97 ± 0.16
	южная тайга	11	18.6 ± 2.0	4.5 ± 0.6	-8.8 ± 3.2	2087 ± 26	663 ± 92	0.92 ± 0.15
Северо-восток ЕТР	средняя тайга	6	17.9 ± 2.1	1.7 ± 0.9	-13.9 ± 3.3	1704 ± 19	664 ± 98	1.03 ± 0.18
	южная тайга	3	18.8 ± 1.9	3.1 ± 1.1	-12.1 ± 3.4	2035 ± 130	609 ± 108	0.85 ± 0.14
Юго-запад ЕТР	подтаежная (хвойно-широколиственная)	7	19.1 ± 2.0	5.9 ± 0.6	-6.9 ± 3.3	2354 ± 30	677 ± 110	0.88 ± 0.16
	широколиственная	15	20.2 ± 1.9	6.3 ± 0.7	-7.6 ± 3.2	2624 ± 31	587 ± 110	0.71 ± 0.14
	лесостепь	6	21.1 ± 1.8	7.6 ± 0.7	-6.3 ± 3.2	2943 ± 131	554 ± 107	0.62 ± 0.13
Юго-восток ЕТР	подтаежная (хвойно-широколиственная)	12	19.3 ± 1.8	3.6 ± 0.9	-12.0 ± 3.6	2226 ± 67	537 ± 91	0.72 ± 0.13
	широколиственная	4	20.0 ± 1.7	4.4 ± 0.6	-11.7 ± 3.6	2486 ± 42	521 ± 87	0.65 ± 0.13
	лесостепь	6	19.7 ± 1.8	4.0 ± 1.0	-12.3 ± 3.6	2438 ± 101	517 ± 102	0.67 ± 0.14
Северная часть лесной зоны ЗС	средняя тайга	6	17.8 ± 1.8	0.4 ± 1.1	-18.4 ± 4.9	1803 ± 35	601 ± 96	0.92 ± 0.17
Южная часть лесной зоны ЗС	южная тайга	5	18.1 ± 1.6	0.7 ± 1.0	-18.8 ± 5.1	1922 ± 2	531 ± 83	0.77 ± 0.13
	подтаежная	11	18.3 ± 1.6	1.9 ± 0.9	-16.4 ± 4.5	2060 ± 38	528 ± 91	0.74 ± 0.15
Юг ЕТР	степь	28	22.9 ± 1.7	8.7 ± 0.8	-5.7 ± 3.3	3264 ± 612	487 ± 103	0.52 ± 0.11
	полупустыня	14	25.7 ± 1.5	11.5 ± 0.8	-2.2 ± 2.6	3960 ± 141	356 ± 84	0.33 ± 0.08
Степная часть ЗС	лесостепь	15	18.7 ± 1.5	2.2 ± 0.9	-16.8 ± 4.4	2213 ± 21	540 ± 91	0.78 ± 0.15
	степь	11	19.0 ± 1.2	2.5 ± 1.0	-16.9 ± 4.5	2300 ± 19	476 ± 89	0.63 ± 0.13

Таблица 3. Тренды климатических параметров за 10 лет для равнинных ландшафтов Европейской территории России и Западной Сибири за период 2000–2022 гг. по квазиоднородным климатическим регионам

Регион	Ландшафтная зона/ подзона	$T_{\text{июль}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{год}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{январь}}, ^\circ\text{C}$	$\Sigma T_{10^\circ}, ^\circ\text{C}$	$P, \text{мм}$	$K_{\text{увл}}$	NDVI
Атлантическая Арктика	арктические пустыни	0.70	0.58	1.90	5.41	–11.16	–0.478	–
Европейский Север	тундра	0.63	0.29	0.05	7.50	–14.40	–0.053	0.017
	лесотундра	0.46	0.49	0.06	6.77	–30.26	–0.102	0.018
	северная тайга	0.04	0.52	0.23	6.09	24.19	0.031	0.016
Север Западной Сибири	тундра	1.01	1.02	1.67	8.08	–12.07	–0.009	0.020
	лесотундра	0.67	1.62	2.31	7.55	74.85	0.143	0.022
	северная тайга	0.64	1.19	1.32	6.11	0.75	–0.011	0.020
Северо-запад ЕТР	средняя тайга	–0.53	0.45	0.38	1.39	32.42	0.047	0.019
	южная тайга	–0.76	0.39	0.03	1.37	36.70	0.046	0.015
Северо-восток ЕТР	средняя тайга	–0.27	0.25	–0.18	1.93	24.83	0.028	0.019
	южная тайга	–0.55	–0.26	–0.50	–12.99	–22.17	–0.009	0.025
Юго-запад ЕТР	подтаежная (хвойно-широколиственная)	–0.64	0.42	0.14	3.02	21.61	0.022	0.007
	широколиственная	–0.31	0.31	–0.02	3.09	–30.91	–0.043	0.022
	лесостепь	–0.03	0.57	0.16	13.05	–5.30	–0.024	0.004
Юго-восток ЕТР	подтаежная (хвойно-широколиственная)	–0.28	0.00	–0.42	–6.70	–18.19	–0.009	0.025
	широколиственная	0.03	0.21	–0.57	4.22	–24.23	–0.038	0.000
	лесостепь	0.29	0.46	–1.12	7.08	–22.79	–0.057	–0.016
Северная часть лесной зоны ЗС	средняя тайга	0.27	0.45	0.41	3.51	–17.17	–0.036	0.020
Южная часть лесной зоны ЗС	южная тайга	0.23	0.35	0.39	0.19	–6.69	–0.009	0.014
	подтаежная	0.41	0.32	0.12	3.75	–21.00	–0.036	0.012
Юг ЕТР	степь	–0.19	–1.16	–4.12	13.80	–22.04	–0.040	–0.021
	полупустыня	0.54	0.47	0.42	14.09	–18.06	–0.027	0.000
Степная часть ЗС	лесостепь	0.41	0.15	–0.09	2.38	–38.27	–0.057	0.012
	степь	0.55	–0.01	–0.34	1.07	–18.45	–0.018	–0.010

Примечание. Значимые тренды выделены жирным шрифтом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Средние климатические характеристики ландшафтов в современный период

Характер растительного покрова во многом определяется климатическими условиями. Сравнение полученных значений климатических параметров с характеристиками природных равнинных экосистем (см. табл. 1) показывает, что в условиях современного потепления температуры июля в тундре соответствуют интервалу июльских температур, определенных до начала потепления. В лесотундровой зоне как на ЕТР,

так и Западной Сибири, июльские температуры на 0.2–1.7°С превышают ранее определенные значения. В ландшафтах северной тайги в европейской части среднеиюльские температуры соответствуют верхней границе ранее определенного диапазона (см. табл. 2), а в Западной Сибири превышают это значение на 0.8°С. В средней и южной тайге эти температуры в современную эпоху не превышают ранее полученных значений, но практически вплотную приблизились к верхней границе диапазона. То же можно сказать и о подтаежной (хвойно-широколиственной) зоне и зоне широколиственных ле-

сов. В лесостепной зоне июльские температуры еще соответствуют ранее определенным значениям, достигая границы диапазона на европейской части. На юге ЕТР эти температуры находятся в определенных ранее пределах, а на юге ЗС оказываются ниже этих значений. Противоположные тенденции можно отметить в полупустынной зоне юга России, где средне июльская температура превышает верхнюю границу ранее определенного диапазона.

Летнее потепление отражает также сумма активных температур, которая в тундре на ЕТР уже соответствует значениям, характерным для лесотундры, а в ЗС остается в пределах ранее определенных значений (см. табл. 1 и 2), что связано, по-видимому, с преобладанием здесь многолетнемерзлых пород, которые замедляют повышение температуры. В лесотундре суммы активных температур уже соответствуют значениям для северной тайги, как было отмечено в (Виноградова и др., 2015). На севере таежной зоны суммы активных температур соответствуют ранее полученным значениям, а в средней тайге превышают эти значения. На северо-западе ЕТР в южной тайге суммы активных температур выше пороговых значений, а на северо-востоке ЕТР и в Западной Сибири находятся вблизи верхней границы значений для этих ландшафтов. В подтаежной зоне этот параметр превышен только на юго-западе ЕТР, а для широколиственных лесов он оказывается даже ниже установленного. В лесостепной и степной зонах суммы активных температур соответствуют ранее установленным, а в полупустыне на юге ЕТР они значительно превышают эти значения.

Для современного периода зимние (январские) температуры на ЕТР для тундровых, лесотундровых, таежных, лесостепных и степных ландшафтов соответствуют установленным значениям, а в Западной Сибири оказываются немного ниже. В подтаежной (хвойно-широколиственной) зоне температуры января соответствуют установленным значениям, а для зоны широколиственных лесов они ниже установленных. В полупустынной зоне на юге ЕТР январские температуры в современном климате оказываются выше ранее установленных (см. табл. 1 и 2).

Среднегодовые температуры на севере ЕТР и в Западной Сибири, в тундровой и лесотундровой зонах находятся в установленных диапазонах, а в северо-таежной зоне находятся на верхней границе диапазона или превышают его (см. табл. 1 и 2). На северо-западе ЕТР среднегодовые температуры оказываются выше ранее установленных, а на северо-востоке и в Западной Сибири соответствуют им. В южной тайге, подтаежной, лесостепной и степной зонах среднегодовая температура понижается в восточном направлении, оставаясь в установлен-

ных границах. В зоне широколиственных лесов она ниже установленных значений. Среднегодовые температуры оказываются превышены в полупустынной зоне на юге европейской части страны.

Годовая сумма осадков для северных ландшафтов тундры, лесотундры и северной тайги находится на уровне нижней границы, для тундры и лесотундры даже ниже ранее определенных значений (см. табл. 1 и 2). Такая же ситуация характерна для средней и южной тайги и подтаежной зоны. Причем в Западной Сибири годовая сумма осадков меньше, чем в европейской части. В лесостепной, степной зонах и зоне широколиственных лесов количество осадков соответствует ранее установленным значениям. В полупустыне количество осадков приближается к нижней границе диапазона.

Уменьшение суммы осадков и повышение суммы активных температур в тундре и лесотундре привело к снижению коэффициента увлажнения, который на севере России стал соответствовать зоне северной тайги. В большинстве остальных ландшафтных зон коэффициент увлажнения находится вблизи нижней границы ранее установленного диапазона, то есть за счет роста температур условия становятся суше. В зонах средней, южной тайги, подтаежной и широколиственных лесов условия увлажнения близки к оптимальным, а увлажнение в лесостепной, степной и полупустынных зонах недостаточно. С запада на восток нарастает засушливость во всех ландшафтных зонах/подзонах.

Тренды климатических параметров

Тренды климатических параметров за 2000–2022 гг. в ландшафтных зонах/подзонах севера ЕТР и ЗС демонстрируют рост июльских, январских и среднегодовых температур, а также суммы активных температур выше $+10^{\circ}\text{C}$. На европейской части в тундре и лесотундре и в тундре Западной Сибири положительные тренды температуры сопровождаются отрицательным трендом осадков (см. табл. 3), что уменьшает переувлажнение и благоприятно влияет на растительность в субарктических ландшафтах. В зоне северной тайги тренды осадков положительны. На северо-западе и северо-востоке ЕТР, как уже отмечалось в (Титкова, Виноградова, 2019), наблюдается отрицательный тренд июльских температур в зонах средней и южной тайги, но за исключением южной тайги на северо-востоке ЕТР тренды годовых и январских температур, суммы активных температур и осадков здесь положительные.

На северо-востоке ЕТР в подзоне южной тайги тренды всех рассматриваемых климатических параметров отрицательны (см. табл. 3).

В лесной зоне Западной Сибири климатические тренды летних, зимних, годовых температур и суммы активных температур положительны, а тренд осадков отрицателен, что способствует уменьшению коэффициента увлажнения.

На юге ЕТР в зоне хвойно-широколиственных и широколиственных лесов июльские температуры также понижаются, хотя, по данным (Доклад ..., 2023), средние за лето температуры растут. На юго-востоке ЕТР понижаются также и январские температуры. Но тренд среднегодовых температур и суммы активных в основном положительный (Виноградова и др., 2015), за исключением хвойно-широколиственных лесов. На западе территории тренды осадков в этой зоне отрицательны (см. табл. 3).

В лесостепной зоне отмечается отрицательный тренд осадков, который увеличивается в восточной части. Сумма активных температур увеличивается, также растут среднегодовые температуры. На юго-востоке ЕТР и в Западной Сибири наблюдаются отрицательные тренды январской температуры. Для степной зоны на юге ЕТР и ЗС характерны отрицательные тренды осадков и температуры января и положительный тренд суммы активных температур. На ЕТР июльские температуры уменьшаются, а в Западной Сибири растут (см. табл. 3).

В полупустынных ландшафтах юга ЕТР в последние десятилетия отмечаются положительные тренды температур, суммы активных температур и отрицательные тренды осадков, что приводит к дальнейшему увеличению засухливости этих ландшафтов (см. табл. 3).

Реакция растительности на изменение климатических характеристик

Реакция растительного покрова на современные изменения климата оценивалась с использованием вегетационного индекса NDVI. Потепление климата начале XXI в. отразилось в трендах вегетационного индекса. Так, в субарктических и северных бореальных ландшафтах положительный тренд суммы активных температур и отрицательный тренд осадков привели к положительному тренду вегетационного индекса в среднем около 0.02/10 лет, а местами до 0.03/10 лет (см. рис. 2, табл. 3). В свою очередь, в работе (Высоцкая, Медведков, 2022) отмечается увеличение NDVI в тундровых, лесотундровых и северотаежных районах Средней Сибири и “позеленения” курумов в районе средней тайги за счет увеличения площади мохового покрова, разрастания кустарников, подроста мелколиственных пород и появления разреженного древостоя. В криолитозоне рост среднегодовой температуры пород и увеличение глубины сезонного протаивания создают благоприятные усло-

вия для растительности (Васильев и др., 2020), что подтверждается положительными трендами NDVI. По исследованиям (Замолотчиков, 2011; Титкова, Виноградова, 2015), уровень воздействия изменения климата на растительность тундр следует считать критическим, поскольку для возврата в прежнее состояние недостаточно вернуть климатические характеристики к их исходным значениям (Раунер, 1972). Здесь увеличение вегетационного индекса сопровождается разнонаправленным трендом альбедо, что говорит об увеличении биомассы, а также появлением видов, ранее не встречавшихся на данной территории.

Наибольший рост NDVI в среднем 0.025/10 лет отмечается на юге бореальных ландшафтов (в подтаежной и широколиственной зоне), а фрагментарно до 0.08/10 лет, как отклик на рост среднегодовых температур и суммы активных температур при умеренном увлажнении. Но в этих ландшафтах, как отмечалось в (Зеликсон, 2010; Семенов, 2012), изменения могут проявиться прежде всего в составе трав и подроста деревьев, так как реальные сдвиги границ хвойно-широколиственных лесов и их ареалов достаточно малы. В работе (Сергиенко, Константинов, 2016) говорится, что в бореальных лесах таежной зоны из-за угнетения более холодолюбивых видов темнохвойной тайги можно ожидать увеличение количества березы и осины.

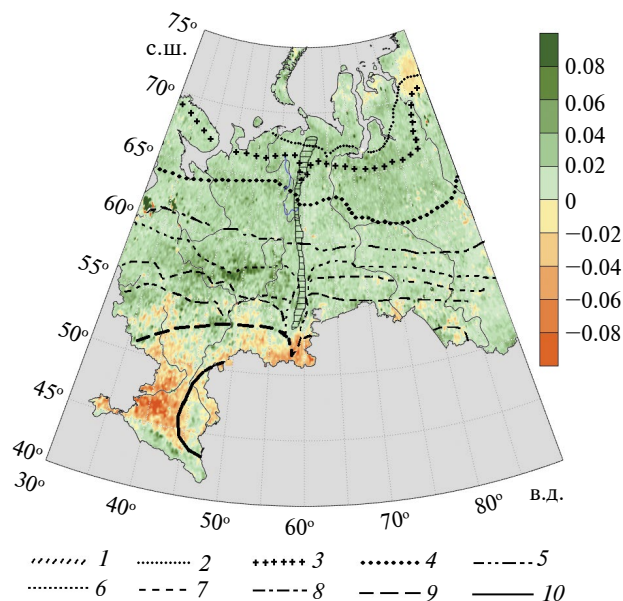


Рис. 2. Тренд NDVI/10 лет за летний период 2000–2022 гг. Тренд значим при значениях больше (меньше) 0.02/10 лет. Границы ландшафтных зон/подзон: 1 – арктические, 2 – тундровые, 3 – лесотундровые, 4 – северотаежные, 5 – среднетаежные, 6 – южно-таежные, 7 – подтаежные, 8 – широколиственные леса, 9 – лесостепные, 10 – степные типичные и сухостепные.

ны, а около южной границы хвойно-широколиственных лесов уменьшения количества ели. В подзоне широколиственных лесов прогнозируется возобновление древесных пород — дуба, липы, граба, бука (Сергиенко, Константинов, 2016).

На юге равнинной части России рост температурных характеристик и уменьшение годовых осадков привели к падению коэффициента увлажнения. Вегетационный индекс в степной зоне, при этих условиях, снижается в среднем на 0.01–0.02/10 лет, а местами на величину 0.06/10 лет. Уязвимость степей юга ЕТР к изменению климата связана во многом с пожарами и засухами, а также с биогенными факторами. Согласно (Фролова и др., 2020), для степной зоны ЕТР характерно усиление аридизации для биомов среднедонских разнотравно-дерновинно-злаковых степей и доно-волжских дерновиннозлаковых степей, а также прикаспийских пустынно-степных биомов. Иссущение степей и расширение пустынь приведут к сокращению продуктивности этих экосистем (Третий ..., 2022.) Очаги снижения NDVI в степных и сухостепных ландшафтах в нижнем течении Волги могут быть также сопряжены с трансформацией растительности в результате перевыпаса (Золотокрылин и др., 2015).

Предпосылки возможных изменений границ ландшафтных зон

Рассмотренные выше современные изменения климатических условий создают предпосылки возможных изменений границ ландшафтных зон. Как показано на рис. 3, такие изменения наблюдаются на большей части равнинных территорий Европейской России и Западной Сибири и для почти для половины метеостанций (табл. 4).

Результаты проведенных исследований показывают, что современные климатические условия для семи метеостанций тундровой зоны (Национальный ..., 2007) уже соответствуют условиям лесотундровой зоны (см. рис. 3, табл. 4). Эти метеостанции в основном расположены на Европейском Севере и севере Западной Сибири. В свою очередь современные климатические условия на восьми метеостанциях, расположенных в основном вдоль границы лесотундры и северной тайги, уже соответствуют параметрам северной тайги, что связано, в основном, с ростом температур (см. табл. 4, рис. 3).

Для 12 метеостанций, расположенных в зоне северной тайги, за счет роста температуры и осадков современные климатические условия больше похожи на условия, характерные для средней тайги, а на большей части среднетаежной зоны (24 метеостанции) условия климата соответствуют

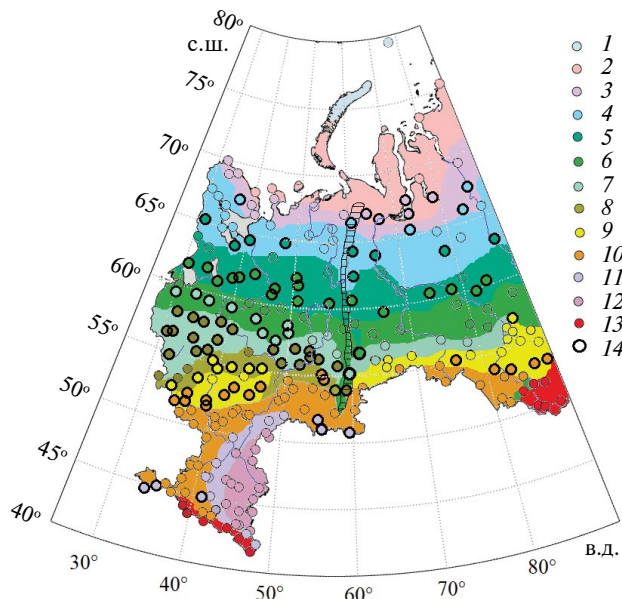


Рис. 3. Климатические предпосылки возможных изменений в ландшафтных зонах/подзонах равнин России по метеостанциям. Цвет метеостанции показывает ее соответствие ландшафтной зоне до 2000 г.: 1 — арктические пустыни, 2 — тундра, 3 — лесотундра, 4 — северная тайга, 5 — средняя тайга, 6 — южная тайга, 7 — подтаежная зона, 8 — широколиственно-лесная, 9 — лесостепь, 10 — степь, 11 — сухая степь, 12 — полупустыня, 13 — высокогорные ландшафты, 14 — климатические показатели в современном климате (2000–2020 гг.) не соответствуют ландшафтной зоне. Обозначения ландшафтных зон см. на рис. 1.

южнотаежной зоне (см. табл. 4, рис. 3). Эти метеостанции расположены как на ЕТР, так и в ЗС. По климатическим характеристикам 14 метеостанций, расположенных в зоне южной тайги на ЕТР, могут относиться к подтаежной зоне и зоне хвойно-широколиственных лесов. За счет отрицательных трендов осадков в современном климате для 2 метеостанций, расположенных в зоне широколиственных лесов, климатические условия соответствуют лесостепной зоне, а для 10 метеостанций — степной зоне (см. рис. 3, табл. 4).

В лесостепной зоне продолжается рост температуры и уменьшение количества осадков, в результате чего климатические условия 24 метеостанций уже могут быть отнесены к степной зоне, что было отмечено в (Виноградова и др., 2015). Для степной зоны на юге и юго-востоке европейской части отрицательные тренды годовых осадков приводят к тому, что на 7 станциях климатические показатели соответствуют сухостепной зоне. Эти станции расположены вблизи границы степной и сухостепной зон (см. рис. 3). Климатические условия для 5 метеостанций, расположенных в сухостепной зоне, уже соответствуют условиям полупустыни, для 4 станций, наоборот, климатические условия больше подходят для степи (см. табл. 4).

Таблица 4. Количество метеостанций, по климатическим параметрам соответствующих ландшафтным зонам/подзонам до начала потепления и в современном климате

Ландшафтная зона/подзона	Количество станций до начала потепления (Национальный ..., 2007)	Возможное количество станций в современный период (2000–2022 гг.)	Число станций, где климатические параметры соответствуют другой ландшафтной зоне/подзоне
арктическая	3	3	—
тундра	21	14	для 7 метеостанций климатические условия соответствуют лесотундре
лесотундра	12	11	для 8 метеостанций климатические условия соответствуют северной тайге
северная тайга	22	19	для 12 метеостанций климатические условия соответствуют средней тайге
средняя тайга	28	16	для 24 метеостанций климатические условия соответствуют южной тайге, а для 1 — подтаежной зоне
южная тайга	25	34	для 14 метеостанций климатические условия соответствуют подтаежной зоне, а для 2 — широколиственной
подтаежная/хвойно-широколиственные леса	34	36	для 17 метеостанций климатические условия соответствуют широколиственной зоне, для 1 — лесостепи, а для 2 — степи
широколиственная	17	29	для 2-х метеостанций климатические условия соответствуют лесостепи, для 10 — степи, а для 2 — подтаежной зоне
лесостепь	26	4	для 24 метеостанций климатические условия соответствуют степи
степь	42	62	для 7 метеостанций климатические условия соответствуют сухой степи, для 4 — широколиственной зоне, а для 1 — подтаежной зоне
сухая степь	19	17	для 5 метеостанций климатические условия соответствуют полупустыне, а для 4 — степи
полупустыня	4	8	—
горные ландшафты	12	12	—
Всего	265	265	127

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменения климата, произошедшие за два последних десятилетия на равнинных территориях Европейской территории России и Западной Сибири, привели к существенным изменениям климатических характеристик ландшафтных зон, определенных А.Г. Исаченко до начала потепления (Ландшафтная ..., 1988; Национальный ..., 2007). Самые значительные изменения произошли на Европейском Севере, севере Западной Сибири и юге ЕТР.

В лесотундровой зоне Севера России наблюдается положительный тренд суммы активных температур и отрицательный тренд осадков. Коэффициент увлажнения уменьшается. Климатические условия на ряде участков тун-

дры, лесотундры, северной средней и южной тайги, особенно на ЕТР, изменяются и теперь соответствуют более южным ландшафтным зонам/подзонам, что может привести к смещению границ ландшафтных зон/подзон в более высокие широты. Реакция растительности на эти изменения проявляется в росте вегетационного индекса. Эти результаты хорошо согласуются с выводами, полученными в (Arctic ..., 2019; Myers-Smith and Hik, 2018; Pastick et al., 2019), где отмечаются “позеленение” Арктической тундры в России, на Аляске и в Канаде и положительные тренды вегетационного индекса, которые в основном связаны с ростом летних температур. Одним из факторов, способствующих наступлению леса на тундру, является деградация вечной мерзлоты, которая

приводит к увеличению растительного покрова и перемещению границ биоклиматических зон к северу (Васильев и др., 2020). Эти процессы наблюдаются на большей части лесотундровой зоны и прилегающих территориях тундры и северной тайги и отмечаются многими авторами (Титкова, Виноградова, 2019; Jia et al., 2003; Kravtsova and Loshkareva, 2013; Kullman et al., 2009).

В южной равнинной части России наблюдаются рост суммы температур выше 10°C и уменьшение суммы годовых осадков и коэффициента увлажнения, что может привести к расширению зоны степей, сухих степей и полупустынь. Отрицательные тренды NDVI за последние десятилетия в этих ландшафтных зонах могут свидетельствовать о том, что эти процессы уже начались.

Произошедшие изменения климатических условий создают предпосылки возможных изменений границ ландшафтных зон, которые могут затронуть большую часть равнинных территорий Европейской России и Западной Сибири, поскольку почти на половине метеостанций современные климатические условия соответствуют более южным или более засушливым ландшафтным зонам. Реакция вегетационного индекса на изменение климатических условий подтверждает полученные выводы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа подготовлена в рамках госзадания Института географии РАН FMWS-2024-0001, 1021051403088-5 и гранта, предоставленного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (№ соглашения о предоставлении гранта: 075-15-2022-325).

FUNDING

The work was prepared within the framework of the state task of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences FMWS-2024-0001, 1021051403088-5 and a grant provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Grant agreement no.: 075-15-2022-325).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бажина Е.В., Сторожев В.П., Третьякова И.Н. Усыхание пихтово-кедровых лесов Кузнецкого Алатау в условиях техногенного загрязнения // Лесоведение. 2013. № 2. С. 15–21.
- Базилевич Н.И., Гребенщиков О.С., Тишков А.А. Географические закономерности структуры и функционирования экосистем / ред. Ю.А. Исаков. М.: Наука, 1986. 297 с.
- Белоновская Е.А., Тишков А.А., Вайсфельд М.А., Глазов П.М., Кренке-мл. А.Н., Морозова О.В., Покровская И.В., Царевская Н.Г., Тертицкий Г.М. “Позеленение” Российской Арктики и современные тренды изменения ее биоты // Изв. РАН. Сер. геогр. 2016. № 3. С. 28–39.
- Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А., Дроздов Д.С. и др. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в западном секторе Российской Арктики // Криосфера Земли. 2020. Т. 24. № 2. С. 15–30.
- Виноградова В.В., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А. Динамика увлажнения и теплообеспеченности в переходных ландшафтных зонах по спутниковым и метеорологическим данным в начале XXI века // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 2. С. 162–172.
- Воронин В.И., Софронов А.П., Морозова Т.И., Осколков В.А., Суховольский В.Г., Ковалёв А.В. Ландшафтная приуроченность бактериальных болезней темнохвойных лесов хребта Хамар-Дабан (Южное Прибайкалье) // География и природные ресурсы. 2019. № 4. С. 56–65.
[https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-4\(56-65\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-4(56-65))
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с.
- Высоцкая А.А., Медведков А.А. Климатогенное “позеленение” в долине нижнего течения р. Подкаменная Тунгуска // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2022. Т. 28. № 1. С. 305–313.
- Гребенюк Г.Н., Кузнецова В.П. Современная динамика климата и Фенологическая изменчивость северных территорий // Вестн. Нижневартского гос. ун-та. 2014. № 3. С. 223–225.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 год. М.: Росгидромет, 2018. 74 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М.: Росгидромет, 2023. 104 с.
- Жильцова Е.Л., Анисимов О.А. Динамика растительности Северной Евразии: анализ современных наблюдений и прогноз на 21 век // Арктика XXI век. Естественные науки. 2015. № 2 (3). С. 48–59.
- Замолодчиков Д.Г. Оценка климатогенных изменений разнообразия древесных пород по данным учета лесного фонда // Успехи современной биологии. 2011. Т. 131. № 4. С. 382–392.
- Зеликсон Э.М., Борисова О.К., Величко А.А. Растительный покров // Климаты и ландшафты Северной Евразии в условиях глобального потепления: ретроспективный анализ и сценарии / ред. А.А. Величко. М.: Геос, 2010. Гл. 8. С. 110–119.

- Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А., Виноградова В.В. Тренды увлажнения и биофизических параметров засушливых земель европейской части России за период 2000–2014 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 2. С. 155–161.
- Иванов Н.Н. Об определении величин испаряемости // Изв. Всесоюзного геогр. общ-ва. 1954. Т. 86. № 2. С. 189–196.
- Ландшафтная карта СССР. М-б 1 : 4000000 / ред. А.Г. Исаченко. М., 1988.
- Национальный Атлас России. Ландшафты. 2007. Т. 2 / М-б: 1 : 30000000. 331 с. <https://nationalatlas.ru/tom2/398–399.html>
- Медведков А.А. Климатогенная динамика ландшафтов сибирской тайги в бассейне Среднего Енисея // География и природные ресурсы. 2018. № 4. С. 122–129.
- Мезенцев В.С. Водный баланс. Новосибирск, 1973. 229 с.
- Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / ред. С.М. Семенова. М.: Росгидромет, 2012. 512 с.
- Раунер Ю.Л. Тепловой баланс растительного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 210 с.
- Рябчиков А.М. Структура и динамика геосферы, ее естественное развитие и изменение человеком. М.: Мысль, 1972. 223 с.
- Сайгин И.А., Барталев С.А., Стыценко Ф.В. Метод детектирования долгосрочных усыхания темных лесов России на основе спутниковых данных: матер. 17-й Всерос. открытой конф. “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. М.: ИКИ РАН, 2019. <http://conf.rse.geosmis.ru>
- Сергиенко В.Г. Динамика границ лесорастительных зон России в условиях изменения климата // Труды Санкт-Петербург. НИИ лесного хозяйства. 2015. № 1. С. 5–19.
- Сергиенко В.Г., Константинов А.В. Прогноз влияния изменения климата на разнообразие природных экосистем и видов флористических и фаунистических комплексов биоты России // Труды Санкт-Петербург. научно-исслед. ин-та лесного хозяйства. 2016. № 2. С. 29–44.
- Соловьев А.Н. Климатогенная динамика сезонной активности биоты Востока Русской равнины в XX столетии // Изв. РАН. Сер. геогр. 2007. № 4. С. 54–65.
- Титкова Т.Б., Виноградова В.В. Отклик растительности на изменение климатических условий в бореальных и субарктических ландшафтах в начале XXI века // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 75–86.
- Титкова Т.Б., Виноградова В.В. Изменения климата в переходных природных зонах севера России и их проявление в спектральных характеристиках ландшафтов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 310–323. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-5-310-323>
- Титкова Т.Б., Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В. Спектральный портрет равнинных ландшафтов России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 117–126. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-3-117-126>
- Тишков А.А., Белоновская Е.А., Глазов П.М., Кренке А.Н., Титова С.В., Царевская Н.Г., Шматова А.Г. Антропогенная трансформация арктических экосистем России: подходы, методы, оценки // Арктика: экология и экономика. 2019. № 4 (36). С. 38–51.
- Третий оценочный докл. Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2022. 676 с.
- Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Харламов М.А., Самсонов Т.Е., Энтин А.Л., Лурье И.К. Картографирование современного состояния и трансформации водного режима рек Европейской территории России // Геодезия и картография. 2020. № 7. С. 14–26.
- Чебакова Н.М., Бажина Е.В., Парфенова Е.И., Сенашова В.А. В поисках фактора “икс”: обзор публикаций по проблеме усыхания темнохвойных лесов Северной Евразии // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 123–140.
- Шполянская Н.А., Осадчая Г.Г., Малкова Г.В. Современное изменение климата и реакция криолитозоны (на примере Западной Сибири и Европейского Севера России) // Географическая среда и живые системы. 2022. № 1. С. 6–30.
- Anisimov O., Kokorev V., Zhiltcova Y. Arctic Ecosystems and their Services under Changing Climate: Predictive-Modeling Assessment // Geographical Review. 2017. Vol. 107. № 1. P. 108–124. <https://doi.org/10.1111/j.1931-0846.2016.12199.x>
- Arctic Report Cards, 2019 / J. Richter-Mange, M.L. Druckenmiller, M. Jeffries (Eds.). 99 p. <http://www.arctic.noaa.gov/Report-Card>
- Brazhnik K., Hanley C., Shugart H.H. Simulating changes in fires and ecology of the 21st century Eurasian boreal forests of Siberia // Forests. 2017. Vol. 8. № 2. 49 p. <https://doi.org/10.3390/f8020049>
- Fedorov N.I., Martynenko V.B., Zhigunova S.N., Mikhailenko O.I., Shendel' G.V., Naumova L.G. Changes in the Distribution of Broadleaf Tree Species in the Central Part of the Southern Urals since the 1970s // Russian J. of Ecology. 2021. Vol. 52. P. 118–125. <https://doi.org/10.1134/S1067413621020053>
- IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / H.-O. Pörtner,

- D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (Eds.). Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2022.
- Jia G.J., Epstein H.E., Walker D.A. Greening of arctic Alaska, 1981–2001 // *Geophys. Res. Lett.* 2003. Vol. 30. № 20. 2067 p.
<https://doi.org/10.1029/2003GL018268>
- Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Golyukov A.S., Ranson K.J., Yagunov M.N. Climate-induced mortality of Siberian pine and fir in the Lake Baikal Watershed, Siberia // *Forest Ecology and Management*. 2017. Vol. 384. P. 191–199.
- Kravtsova V.I., Loshkareva A.R. Dynamics of vegetation in the tundra-taiga ecotone on the Kola Peninsula depending on climate fluctuations // *Russian J. Ecology*. 2013. № 4. P. 303–311.
<https://doi.org/10.1134/S1067413613040085>
- Kullman L., Oberg L. Post Little Ice Age tree line rise and climate warming in the Swedish Scandes: a landscape ecological perspective // *J. of Ecology*. 2009. Vol. 97. № 3. P. 415–429.
- Myers-Smith I.H., Hik D.S. Climate warming as a driver of tundra shrubline advance / R. Aerts (Ed.) // *J. of Ecology*. 2018. Vol. 106. P. 547–560.
- Pastick N.J., Jorgenson M.T., Goetz S.J., Jones B.M., Wylie B.K., Minsley B.J., Genet H., Knight J.F., Swanson D.K., Jorgenson J.C. Spatiotemporal remote sensing of ecosystem change and causation across Alaska // *Glob. Change Biol.* 2019. Vol. 25. P. 1171–1189.
- Tchebakova N.M., Parfenova E.I., Bazhina E.V., Soja A.J., Groisman P.Ya. Droughts are not the likely primary cause for *Abies sibirica* and *Pinus sibirica* forest dieback in the South Siberian Mountains // *Forests*. 2022. Vol. 13. Art. 1378.
<https://doi.org/10.3390/f13091378>
- Vinogradova V., Titkova T., Zolotokrylin A. How climate change is affecting the transitional natural zones of the Northern and Arctic regions of Russia // *Polar Sci.* 2021. Vol. 29. P. 100652.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100652>
- WMO, 2021: State of the Global Climate 2020. WMO, 2021. № 1264. 56 p.
https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10618

Climatic Prerequisites for Changes of Zonal and Subzonal Landscape Boundaries in European Russia and Western Siberia

V. V. Vinogradova^{a, b, *} and T. B. Titkova^{a, **}

^a*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*HSE University, Moscow, Russia*

*e-mail: vvvinog@yandex.ru

**e-mail: titkova@igras.ru

Global warming is manifesting itself in varying degrees of intensity in the changing landscapes of the Russian plains. Productivity, biomass and boundaries of vegetation vary according to the dynamics of heat supply and humidification. A shift in landscape zone boundaries may be a consequence of global warming in the last two decades. This work evaluates changes in the climatic characteristics of natural landscapes in the Russian plains. The studies were conducted in the European part of Russia and Western Siberia, from arctic to semi-desert landscapes. Data from 265 weather stations on the territory of Russia were used for the period 2000–2022, as well as the normalised vegetation index NDVI for the summer period (quantitative indicator of photosynthetic active biomass). The following climatic parameters were taken into account: mean annual temperature, temperature in January and July, sum of temperatures above 10°C, annual precipitation, humidification coefficient and their means and standard deviations and trends for the period 2000–2022. It was found that a positive trend of the sum of active temperatures and a negative trend of precipitation are observed in the forest tundra zone. The humidification coefficient is decreasing. Climatic conditions are changing at several sites, such as tundra, forest tundra, northern and middle taiga, and now correspond to more southern landscape zones. This creates favourable conditions for changes in vegetation and is reflected in the increase in NDVI, which may lead to a shift in the boundaries of landscape zones to higher latitudes. In southern Russia, an increase in the sum of active temperatures and drainage of the territory is observed, which is reflected in a decrease in NDVI and can lead to an expansion of steppe, dry steppe and semi-desert zones. The response of vegetation cover to climate change is confirmed by changes in the normalised vegetation index.

Keywords: landscape zones and subzones, climate changes, heat supply, temperature, sum of active temperatures, precipitation, humidification, Normalized Difference Vegetation Index NDVI

REFERENCES

- Anisimov O., Kokorev V., Zhiltcova Y. Arctic Ecosystems and their Services under Changing Climate: Predictive-Modeling Assessment. *Geogr. Rev.*, 2017, vol. 107, no. 1, pp. 108–124.
<https://doi.org/10.1111/j.1931-0846.2016.12199.x>
- Arctic Report Cards 2019*. Richter-Mange J., Druckenmiller M.L., Jeffries M., Eds. 2019. Available at: <https://arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2019> (accessed: 29.05.2024).
- Bazhina E.V., Storozhev E.V., Storozhev V.P., Tret'yakova I.N. Drying of fir and cedar forests of Kuznetsk Alatau under conditions of technogenic pollution. *Lesoved.*, 2013, no. 2, pp. 15–21. (In Russ.).
- Bazilevich N.I., Grebenshchikov O.S., Tishkov A.A. *Geograficheskie zakonomernosti struktury i funkcionirovaniya ekosistem* [Geographic Patterns of Ecosystem Structure and Functioning]. Isakov Yu.A., Ed. Moscow: Nauka Publ., 1986. 297 p.
- Belonovskaya E.A., Tishkov A.A., Vaisfel'd M.A., Glazov P.M., Krenke A.N., Morozova O.V., Pokrovskaya I.V., Tsarevskaya N.G., Tertitskii G.M. “Greening” of the Russian Arctic and current trends in changes in its biota. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2016, no. 3, pp. 28–39. (In Russ.).
- Brazhnik K., Hanley C., Shugart H.H. Simulating changes in fires and ecology of the 21st century Eurasian boreal forests of Siberia. *Forests*, 2017, vol. 8, no. 2, art. 49.
<https://doi.org/10.3390/f8020049>
- Chebakova N.M., Bazhina E.V., Parfenova E.I., Senashova B.A. In Search of an X Factor: A Review of Publications on the Issue of Dark-needled Forest Decline/Dieback in Northern Eurasia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2022, vol. 47, pp. 405–417.
<https://doi.org/10.3103/S1068373922050090>
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2016 god* [Report on Climate Features on the Territory of Russian Federation in 2016]. Moscow: Rosgidromet, 2018. 74 p.
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2022 god* [Report on Climate Features on the Territory of Russian Federation in 2022]. Moscow: Rosgidromet, 2023. 104 p.
- Fedorov N.I., Martynenko V.B., Zhigunova S.N., Mikhailenko O.I., Shendel' G.V., Naumova L.G. Changes in the Distribution of Broadleaf Tree Species in the Central Part of the Southern Urals since the 1970s. *Russ. J. Ecol.*, 2021, vol. 52, pp. 118–125.
<https://doi.org/10.1134/S1067413621020053>
- Frolova N.L., Kireeva M.B., Kharlamov M.A., Samsonov T.E., Entin A.L., Lurie I.K., Mapping the current state and transformation of the water regime of rivers in the European territory of Russia. *Geodeziya Cartogr.*, 2020, no. 7, pp. 14–26. (In Russ.).
- Grebenyuk G.N., Kuznetsova V.P. Modern climate dynamics and phenological variability of northern territories. *Vestn. Nizhnevart. Gos. Univ.*, 2014, no. 3, pp. 223–225. (In Russ.).
- IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pörtner H.-O., Roberts D.C., Tignor M., Poloczanska E.S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., Rama B., Eds. CUP, 2022.
- Ivanov N.N. Determination of evaporation values. *Izv. Vsesoyuzn. Geogr. Obshch.*, 1954, vol. 86, no. 2, pp. 189–196. (In Russ.).
- Jia G.J., Epstein H.E., Walker D.A. Greening of arctic Alaska, 1981–2001. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, vol. 30, no. 20, art. 2067.
<https://doi.org/10.1029/2003GL018268>
- Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Golyukov A.S., Ranson K.J., Yagunov M.N. Climate-induced mortality of Siberian pine and fir in the Lake Baikal Watershed, Siberia. *For. Ecol. Manag.*, 2017, vol. 384, pp. 191–199.
- Kravtsova V.I., Loshkareva A.R. Dynamics of vegetation in the tundra-taiga ecotone on the Kola Peninsula depending on climate fluctuations. *Russ. J. Ecol.*, 2013, vol. 4, pp. 303–311.
<https://doi.org/10.1134/S1067413613040085>
- Kullman L., Oberger L. Post Little Ice Age tree line rise and climate warming in the Swedish Scandes: A landscape ecological perspective. *J. Ecol.*, 2009, vol. 97, no. 3, pp. 415–429.
- Landshaftnaya karta SSSR. Masshtab 1:4000000* [Landscape Map of the USSR. Scale 1:4000000]. Isachenko A.G., Ed. Moscow, 1988.
- Medvedkov A.A. Climatogenic dynamics of Siberian taiga landscapes in the Middle Yenisei basin. *Geogr. Prir. Resur.*, 2018, no. 4, pp. 122–129. (In Russ.).
- Metody otsenki posledstviy izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem* [Methods for Assessing Climate Change Impacts on Physical and Biological Systems]. Semenov S.M., Ed. Moscow: Rosgidromet, 2012. 512 p.
- Mezentsev V.S. *Vodnyi balans* [Water Balance]. Novosibirsk, 1973. 229 p.
- Myers-Smith I.H., Hik D.S. Climate warming as a driver of tundra shrubline advance. *J. Ecol.*, 2018, vol. 106, pp. 547–560.
- Natsional'nyi Atlas Rossii. Landshafty. T. 2. Masshtab 1:30000000* [National Atlas of Russia. Landscapes. Vol. 2. Scale 1:30000000]. 2007. Available at: <https://national-atlas.ru/tom2/331.html> (accessed: 30.05.2024).
- Pastick N.J., Jorgenson M.T., Goetz S.J., Jones B.M., Wylie B.K., Minsley B.J., Genet H., Knight J.F., Swanson D.K., Jorgenson J.C. Spatiotemporal remote sensing of ecosystem change and causation across Alaska. *Glob. Change Biol.*, 2019, vol. 25, pp. 1171–1189.
- Rauner Yu.L. *Teplovoi balans rastitel'nogo pokrova* [Heat Balance of Vegetation Cover]. Leningrad: Rosgidromet, 1972. 210 p.
- Ryabchikov A.M. *Struktura i dinamika geosfery, ee estestvennoe razvitiye i izmeneniye chelovekom* [The Structure and Dynamics of the Geosphere, Its Natural Development and Changes by Man]. Moscow: Mysl' Publ., 1972. 223 p.

- Saigin I.A., Bartalev S.A., Stytsenko F.V. Method for detecting long-term decline of dark coniferous forests in Russia based on satellite data. In *Materialy 17-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* [Proc. of the 17th All-Russian Open Conf. "Modern Problems of Earth Remote Sensing from Space"]. Moscow: IKI RAS, 2019. (In Russ.).
- Sergienko V.G. Dynamics of the boundaries of forest growth zones in Russia under climate change conditions. *Tr. S.-Peterb. NII Lesn. Khoz.*, 2015, no. 1, pp. 5–19. (In Russ.).
- Sergienko V.G., Konstantinov A.V. Forecast of influence of climate change on ecosystems and natural diversity species of Russian flora and fauna biotic complexes. *Tr. S.-Peterb. NII Lesn. Khoz.*, 2016, no. 2, pp. 29–44. (In Russ.).
- Shpolyanskaya N., Osadchay G., Malkova G. Modern climate change and permafrost reaction (on the example of western Siberia and the European north of Russia). *Geogr. Sreda Zhivye Sistemy*, 2022, no. 1, pp. 6–30. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18384/2712-7621-2022-1-6-30>
- Solov'ev A.N. Climatogenic dynamics of seasonal activity of the biota of the East of the Russian Plain in the 20th century. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2007, no. 4, pp. 54–65. (In Russ.).
- Tchebakova N.M., Parfenova E.I., Bazhina E.V., Soja A.J., Groisman P.Ya. Droughts Are Not the Likely Primary Cause for *Abies sibirica* and *Pinus sibirica* Forest Dieback in the South Siberian Mountains. *Forests*, 2022, vol. 13, art. 1378.
<https://doi.org/10.3390/f13091378>
- Tishkov A.A., Belonovskaya E.A., Glazov P.M., Krenke A.N., Titova S.V., Tsarevskaya N.G., Shmatova A.G. Anthropogenic transformation of Arctic ecosystems in Russia: Approaches, methods, assessments. *Arktika Ekol. Ekon.*, 2019, vol. 36, no. 4, pp. 38–51. (In Russ.).
- Titkova T.B., Vinogradova V.V. Response of vegetation to changing climatic conditions in boreal and subarctic landscapes at the beginning of the 21st century. *Sovrem. Probl. Distant. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2015, vol. 12, no. 3, pp. 75–86. (In Russ.).
- Titkova T.B., Vinogradova V.V. Climate changes in transitional natural areas of Russian northern regions and their display in landscape spectral characteristics. *Sovrem. Probl. Distant. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2019, vol. 16, no. 5, pp. 310–323. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-5-310-323>
- Titkova T.B., Zolotokrylin A.N., Vinogradova V.V. Spectral portrait of lowland landscapes of Russia. *Sovrem. Probl. Distant. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 117–126. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-3-117-126>
- Tretii otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [The Third Assessment Report Hydromet about Climate Change and Its Consequences on the Territory of the Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet, 2022. 676 p.
- Vasiliev A.A., Gravis A.G., Gubarkov A.A., Drozdov D.S., et al. Permafrost degradation: results of the long term geocryological monitoring in the western sector of Russian Arctic. *Kriosf. Zemli*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 15–30. (In Russ.).
[https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-\(15-30\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-(15-30))
- Vinogradova V.V., Titkova T.B., Cherenkova E.A. Dynamics of moisture and heat fluxes in transitional landscape zones from satellite and meteorological data in the beginning of the XXI century. *Sovrem. Probl. Distant. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2015, vol. 12, no. 2, pp. 162–172. (In Russ.).
- Vinogradova V., Titkova T., Zolotokrylin A. How climate change is affecting the transitional natural zones of the Northern and Arctic regions of Russia. *Polar Sci.*, 2021, vol. 29, p. 100652.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100652>
- Voronin V.I., Sofronov A.P., Morozova T.I., Oskolkov V.A., Sukhovol'skii V.G., Kovalev A.V. Landscape occurrence of bacterial diseases in dark coniferous forests of the Khamar-Daban ridge (Southern Baikal region). *Geogr. Priir. Resur.*, 2019, no. 4, pp. 56–65. (In Russ.).
[https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-4\(56-65\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-4(56-65))
- Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [The Second Assessment Report Hydromet about Climate Change and Its Consequences on the Territory of the Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet, 2014. 1009 p.
- Vysotskaya A.A., Medvedkov A.A. Climate-driven "greening" of the kurum landscape in the valley of the lower reaches or the Podkamennaya Tunguska river. *InterKarto. InterGIS*, 2022, vol. 28, no. 1, pp. 305–313. (In Russ.).
- WMO. *State of the Global Climate 2020, No. 1264*. WMO, 2021. 56 p.
- Zamolodchikov D.G. Evaluation of changes climatogenic diversity of tree species according to the forest fund. *Uspekhi. Sovrem. Biol.*, 2011, vol. 131, no. 4, pp. 382–392. (In Russ.).
- Zelikson E.M., Borisova O.K., Velichko A.A. Vegetation cover. In *Klimaty i landshafty Severnoi Evrazii v usloviyakh global'nogo potepleniya: retrospektivnyi analiz i stsennarii* [Climates and Landscapes of Northern Eurasia under Conditions of Global Warming: Retrospective Analysis and Scenarios]. Moscow: GEOS Publ., 2010, pp. 110–119. (In Russ.).
- Zhil'tsova E.L., Anisimov O.A. Vegetation dynamics in Northern Eurasia: analysis of modern observations and forecast for the 21st century. *Arktika XXI Vek, Ser. Estest. Nauki*, 2015, vol. 3, no. 2, pp. 48–59. (In Russ.).
- Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Cherenkova E.A., Vinogradova V.V. Trends of moisture indexes and biophysical parameters of European Russia drylands for the period of 2000–2014. *Sovrem. Probl. Distant. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2015, vol. 12, no. 2, pp. 155–161. (In Russ.).

ЛАНДШАФТЫ И ЭКОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ
МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

УДК 551.34:528.88

РАЗВИТИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ЛАНДШАФТОВ
КРИОЛИТОЗОНЫ В СВЯЗИ С КЛИМАТИЧЕСКИМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ:
ИССЛЕДОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА

© 2024 г. А. С. Викторов¹, *, М. В. Архипова¹, В. Н. Капралова¹,
Т. В. Орлов¹, О. Н. Трапезникова¹

¹Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева Российской академии наук, Москва, Россия

*e-mail: vic_as@mail.ru

Поступила в редакцию 15.05.2023 г.

После доработки 02.04.2024 г.

Принята к публикации 16.05.2024 г.

Целью настоящего исследования явилась оценка характера эволюции морфологической структуры наиболее распространенных условно-коренных ландшафтов криолитозоны (озерно-термокарстовых равнин, эрозионно-термокарстовых равнин, пойменных равнин) в связи с климатическими изменениями на основе вероятностных подходов. В процессе исследования были выбраны 28 участков, находящихся в разных физико-географических условиях, в частности, сложенных разнообразными отложениями — дельтовыми, озерно-аллювиальными, аллювиальными и аллювиально-морскими, флювиогляциальными отложениями, а также озерно-болотными образованиями. По материалам космической съемки высокого разрешения были получены выборки количественных характеристик морфологических структур рассматриваемых ландшафтов (площадей термокарстовых озер для термокарстовых равнин и длин стрел формирующихся фрагментов для пойменных ландшафтов) за два срока съемки с интервалом 40–55 лет; выборки по каждому участку сравнивались по критерию Смирнова. В итоге сделан вывод, что вероятностный анализ изменений количественных характеристик морфологических структур типичных ландшафтов криолитозоны за 40–55-летний интервал свидетельствует об ограниченном характере изменений. В то же время для ряда участков наблюдаются статистически подтвержденная эволюция морфологических структур, при этом изменения развиваются в основном в пределах термокарстовых равнин, а в пределах пойменных ландшафтов на рассматриваемом временном интервале практически не фиксируются. Изменения морфологической структуры в пределах эрозионно-термокарстовых равнин протекают несколько более интенсивно, чем в пределах озерно-термокарстовых равнин, что может быть объяснено более активной реакцией на климатические изменения термоэрозионных процессов по сравнению с термокарстовыми. Наблюдаемые изменения морфологической структуры приурочены к западной части Западной Сибири, однако при этом показывают дифференцированность по ландшафтам даже в случае близкого расположения, это указывает на важную роль состава отложений и геокриологических условий.

Ключевые слова: рисунок ландшафта, математическая морфология ландшафтов, равнины криолитозоны, климатические изменения, отклик на изменения климата, термокарст, дистанционное зондирование

DOI: 10.31857/S2587556624030034 EDN: SOVOPJ

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Исследованиям того как климатические изменения влияют на ландшафтные условия криолитозоны были посвящены работы широкого ряда авторов, например, (Котляков и др., 2015; Morgenstern et al., 2021; Nicolsky et al., 2017; и др.), однако, как показывает анализ, в большей части исследований рассматривались изменения отдельных компонентов ландшафта или их сочетаний.

Одним из индикаторов изменений ландшафтов криолитозоны являются термокарстовые озера. Доступ к данным дистанционного зондирования и средствам их обработки предоставил возможность исследовать протяженные площади криолитозоны, в целом труднодоступной для прямых исследований. При этом в случае, например, озерно-термокарстовых и эрозионно-термокарстовых равнин работы касались преимущественно изучения изменения заозе-

ренности, динамики размеров озер и поиска связи с геоэкологическими и климатическими условиями конкретного региона (Кравцова, Родионова, 2016; Grosse et al., 2008; Nitze et al., 2017; Olefeldt et al., 2016; Pekel et al., 2016). Подобные работы выявили существенную изменчивость размеров и площадей озер, которая нередко носила разнонаправленный характер даже в пределах одного ландшафта (Капралова, 2014; Karjalova et al., 2019). Такая ситуация накладывалась на общие изменения ансамблей озер и ставила вопрос о реальности (значимости) зафиксированных изменений.

Динамика пойменных ландшафтов, в том числе в пределах криолитозоны, исследовалась во многих публикациях (Попов, 2012; Чалов, 1979; Joung, 1970; Lotsari et al., 2019; Peschke, 1973; Sylvester et al., 2019), при этом значительная часть работ посвящена рельефу пойменных равнин (Панин и др., 2011; Чалов, Чернов, 1985; Nanson and Croke, 1992). Однако вопросам оценки изменения морфологических структур в целом и оценке степени случайности выявленных различий уделялось сравнительно мало внимания.

Таким образом, рассмотрение литературы показывает, что, несмотря на большое число выполненных исследований, современное состояние изученности проблемы характеризуется следующими особенностями:

- значительным вниманием, уделяемым изменению отдельных компонентов и комплексов, и гораздо меньшим — уделяемым морфологической структуре ландшафтов, прежде всего их количественным характеристикам;
- незначительным количеством оценок статистической значимости выявляемых временных изменений, т.е. по сути степени случайности наблюдаемых изменений.

Целью настоящего исследования явилась оценка особенностей эволюции морфологической структуры наиболее распространенных ландшафтов криолитозоны в связи с климатическими изменениями на основе вероятностных подходов.

Исследование выполнено на базе трех наиболее распространенных ландшафтов криолитозоны: озерно-термокарстовых равнин, эрозионно-термокарстовых равнин, пойменных равнин.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Озерно-термокарстовые равнины представляют собой сочетание выровненных или пологоволнистых поверхностей с тундровой или лесотундровой растительностью на тундровых глеевых почвах и многочисленных термокарстовых озер (рис. 1а). Озера имеют, как правило, округлую или фестончатую форму и в беспорядке расположены в ландшафте. Основным про-

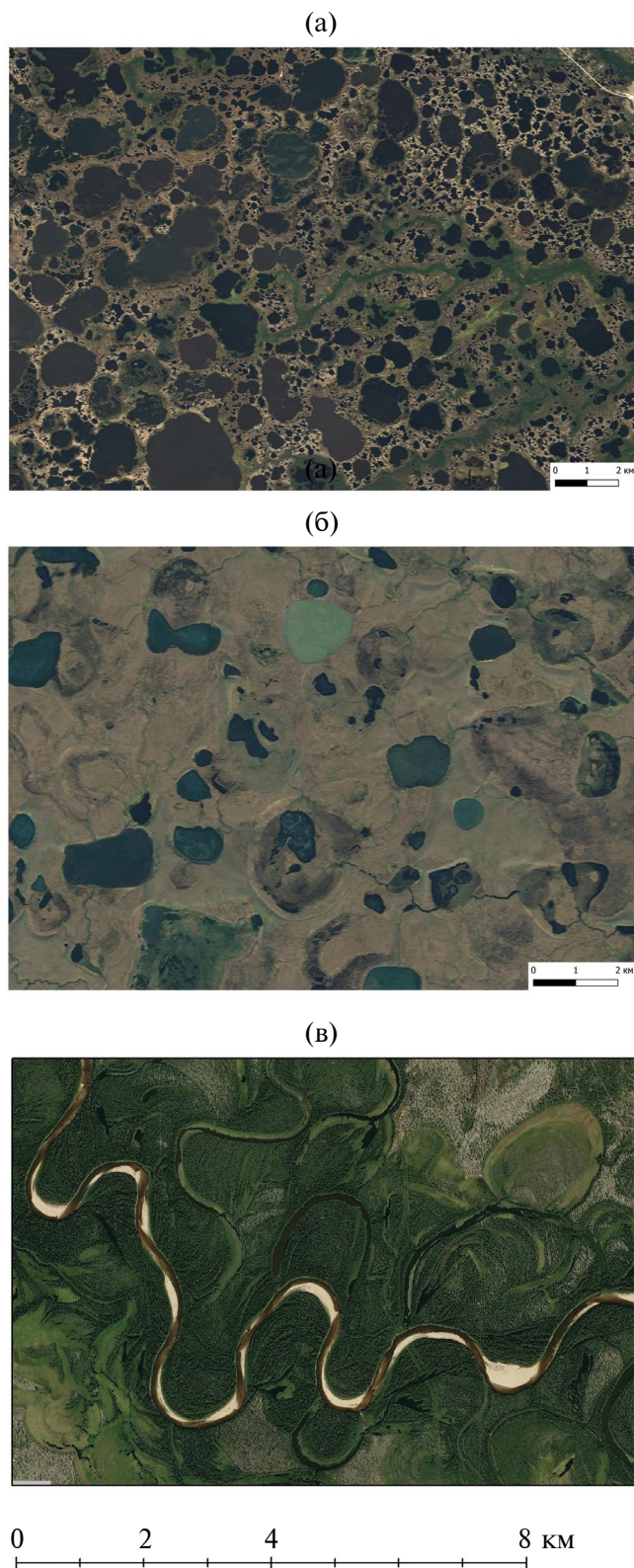


Рис. 1. Типичные изображения на материалах космической съемки: (а) озерно-термокарстовой равнины, (б) эрозионно-термокарстовой равнины, (в) грядистой пойменной равнины.

цессом является изменение площади озер за счет развития термоабразии. Возможным процессом является также появление новых озер, однако выполненные исследования показывают, что

количественные особенности морфологической структуры, точнее характер вероятностного распределения площадей озер, противоречит этой гипотезе (Викторов и др., 2015).

Эрозионно-термокарстовыми равнинами в рамках настоящей статьи называются ландшафты, представляющие собой выравненные или пологоволнистые поверхности с тундровой или лесотундровой растительностью на тундровых глеевых почвах с вкраплением многочисленных термокарстовых озер и хасыреев¹, а также эрозионных форм (рис. 1б). Озера и хасыреи имеют, как правило, округлую или фестончатую форму и в беспорядке расположены в ландшафте. Основными процессами являются изменение озер за счет термоабразионных процессов, спуск озер термоэрозионными процессами с превращением в хасыреи и появление новых озер, в особенности в пределах возникающих хасыреев.

Ландшафты гривистых пойменных равнин представляют собой сочетание грив с лесной и лесотундровой растительностью на аллювиальных почвах и межгривных понижений с более гидроморфными природными комплексами (рис. 1в). Гривы и межгривные понижения имеют форму согласованных по форме и направлению дуг, формирующих сегменты; сегменты в беспорядке прилегают друг к другу с угловым несогласием, часто стирая части друг друга, таким образом образуется ландшафтный рисунок пойменных равнин. Основными процессами изменения ландшафта является меандрирование русла; в процессе меандрирования происходит изгибание и последующее спрямление излучин со стиранием существующих сегментов и генерацией новых. Пойменный сегмент, замыкающийся руслом, является наиболее молодым, находящимся в процессе формирования, он еще не подвергался стиранию. Таким образом, в пределах пойменной равнины наблюдается комплекс разновозрастных, разнесенных во времени фрагментов пойменных сегментов.

Методика исследований включала следующие основные этапы:

- выбор ключевых участков и получение материалов дистанционных съемок;
- выделение необходимых для расчетов количественных характеристик элементов морфологической структуры на основе использования геоинформационной системы в виде векторного объекта;
- сравнение эмпирических распределений выбранных количественных характеристик морфологической структуры за два срока для каждо-

го участка на основе статистического критерия Смирнова;

- анализ полученных данных сравнения.

При анализе изменения морфологических структур озерно-термокарстовых и эрозионно-термокарстовых равнин использовались площади термокарстовых озер. Выделение термокарстовых озер и определение их площади производилось с помощью геоинформационной системы ArcGIS как автоматизированным, так и ручным методом. При этом использовались известные дешифровочные признаки термокарстовых озер, ставшие традиционными при проведении инженерно-геологической съемки (Методическое ..., 1978).

При анализе изменения морфологических структур пойменных равнин использовались стрелы молодых (т.е. формирующихся в настоящее время и ограничивающихся руслом) пойменных сегментов; стрелой сегмента по аналогии со стрелкой дуги в статье называется размер сегмента в направлении, перпендикулярном хорде его основания.

При исследовании был использован следующий комплекс материалов космической съемки:

- архивные снимки Согопа за июнь–август 1965–1976 гг. с разрешением 3–12 м/пикс.;
- современные снимки в основном за июнь–август 2011–2019 гг. со спутников IKONOS, QuickBird, WorldView 2, GeoEye-1, Pleiades, SPOT-5, SPOT-6 с разрешением 0.5–2.5 м/пикс. При использовании космических снимков производилось перепроецирование снимков Согопа с привязкой по опознаваемым точкам без ортотрансформирования, поскольку осуществлялось сравнение не отдельных морфологических элементов за первый и второй срок, а их ансамблей, что учитывает случайные вариации параметров.

Выбор ключевых участков производился с соблюдением следующих требований:

- внутренняя однородность морфологической структуры и геолого-геоморфологических и геоэкологических условий;
- охват разнообразия физико-географических условий;
- наличие материалов повторной космической съемки высокого разрешения со значительным временным интервалом между сроками съемки.

Для пойменных равнин участки выбирались, кроме того, с соблюдением требования свободного меандрирования.

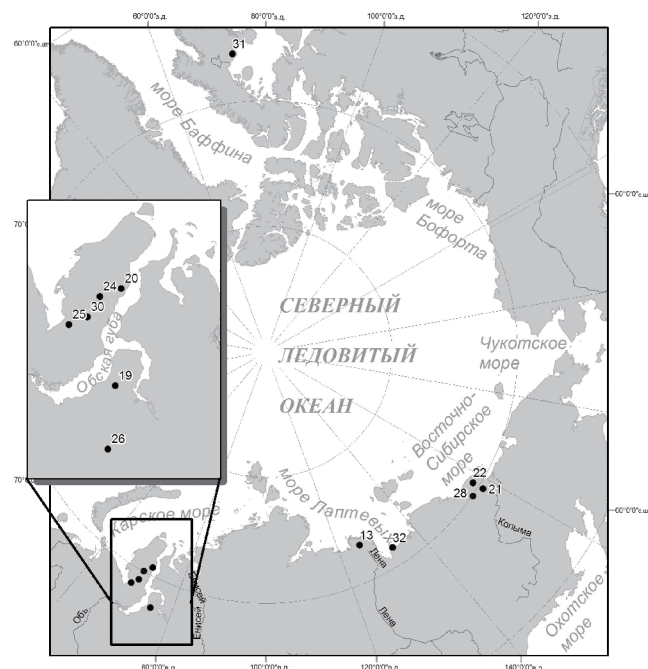
Для проведения исследований выбраны 28 участков, разных в геоморфологическом, геоэкологическом и физико-географическом отношении и расположенных в различных регионах – Печорская низменность, полуостров Ямал, Западно-Сибирская равнина, Северо-Сибир-

¹ Хасыреем (то же – алас) называют озерную котловину с лугово-болотной растительностью, возникающую при спуске термокарстового озера из-за деятельности термоэрозионных процессов.

(a)



(б)



(в)

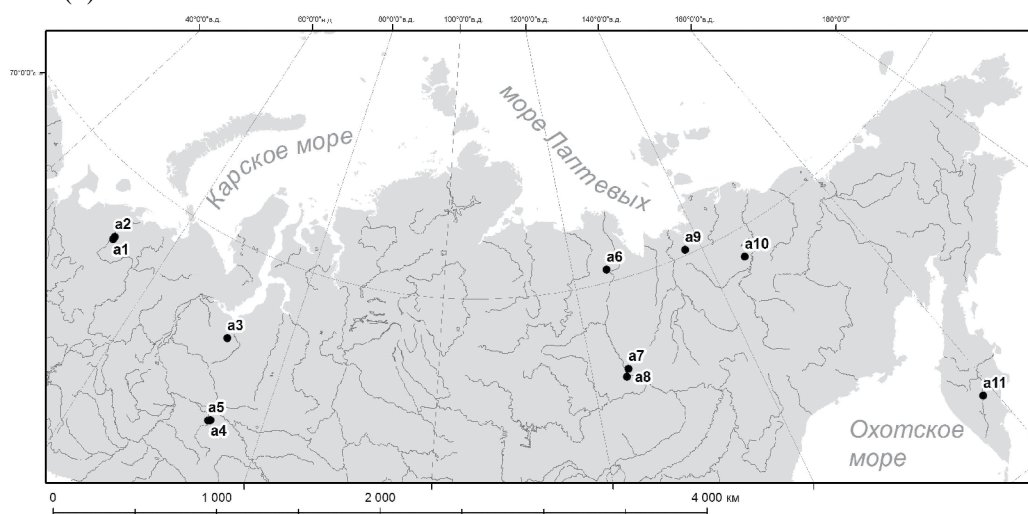


Рис. 2. Схема расположения ключевых участков: (а) озерно-термокарстовых равнин, (б) эрозионно-термокарстовых равнин, (в) пойменных равнин.

ская низменность, дельта р. Лены, Колымская низменность, Центрально-Якутская равнина, Центрально-Камчатская низменность, Арктическая низменность (Аляска). Площадь одного участка составляла в основном 200–1200 км². Участки, по данным государственной геологической съемки, сложены разнообразными отложениями – песчаными дельтовыми отложениями; озерно-аллювиальными горизонтально слоистыми алевритами, переслаивающимися с песками и торфами, а также суглинками и супесями, аллювиальными и аллювиально-морскими отложениями (суглинками, супесями и песками), флювиогляциальными песками и валунными суглинками, морскими отложениями, представ-

ленными пылеватými песками, песчаными, супесчаными и суглинистыми отложениями, озерно-болотными образованиями. Для возвышенных участков характерно сплошное распространение многолетнемерзлых пород. Расположение участков представлено на рис. 2.

В процессе статистической обработки строились эмпирические распределения соответствующих количественных характеристик за каждый срок съемки и проводилось сравнение эмпирических распределений по каждому участку за первый срок и за второй срок с использованием критерия Смирнова. Использование данного критерия свободно от предположений о справедливости какой-либо математической модели

Таблица 1. Сопоставление распределения площадей озер озерно-термокарстовых, эрозионно-термокарстовых равнин за два срока, сопоставление длин стрел формирующихся сегментов за два срока

Участок	Объем выборки		Значение критерия Смирнова	p^*
	срок 1	срок 2		
Озерно-термокарстовые равнины				
as3	180	176	0.152	$p < 0.05$
as10	167	167	0.036	$p > 0.10$
as14	153	154	0.048	$p > 0.10$
as16	584	576	0.031	$p > 0.10$
as19	209	209	0.038	$p > 0.10$
as21	351	345	0.024	$p > 0.10$
as23	109	108	0.048	$p > 0.10$
as31	207	210	0.028	$p > 0.10$
Эрозионно-термокарстовые равнины				
20	359	372	0.150	$p < 0.001$
21	430	433	0.040	$p > 0.10$
24	381	362	0.100	$p < 0.05$
25	314	309	0.073	$p > 0.10$
19	205	205	0.078	$p > 0.10$
22	291	298	0.056	$p > 0.10$
30	524	522	0.043	$p > 0.10$
31	100	95	0.040	$p > 0.10$
40	553	549	0.043	$p > 0.10$
Пойменные равнины				
a1 (р. Шапкина)	53	53	0.121	$p > 0.10$
a2 (р. Сэдзэва)	53	50	0.081	$p > 0.10$
a3 (р. Хейгияха)	56	56	0.102	$p > 0.10$
a4 (р. Юган)	51	52	0.087	$p > 0.10$
a5 (р. Малый Юган)	57	61	0.075	$p > 0.10$
a6 (р. Буор-Эекит)	57	54	0.119	$p > 0.10$
a7 (р. Кондюдей)	68	68	0.070	$p > 0.10$
a8 (р. Линде)	55	55	0.112	$p > 0.10$
a9 (р. Чондон)	57	52	0.109	$p > 0.10$
a10 (р. Уяндина)	56	53	0.109	$p > 0.10$
a11 (р. Камчатка)	57	58	0.230	$p > 0.10$

Примечание: *для статистически значимого различия двух выборок на уровне 0.95 должно быть $p < 0.05$, подобные случаи выделены жирным шрифтом.

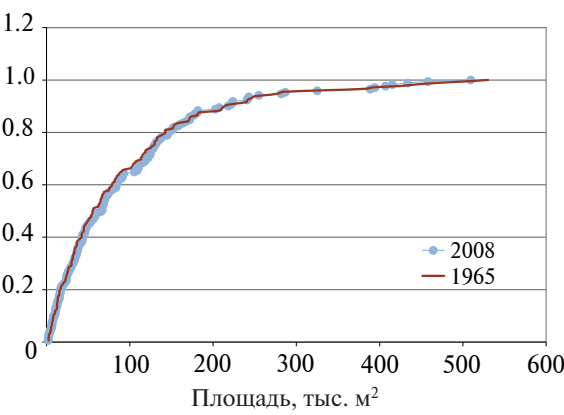


Рис. 3. Пример сопоставления графиков эмпирических распределений для участка озерно-термокарстовых равнин (участок 19).

морфологической структуры участка и не зависит от подчинения распределений какому-либо теоретическому распределению.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В целом данные по изменениям морфологической структуры рассматриваемых типичных ландшафтов криолитозоны получены на 28 участках – 8 в пределах озерно-термокарстовых равнин, 9 в пределах эрозионно-термокарстовых равнин и 11 в пределах пойменных равнин; при этом объемы выборок составили от 50 до 584 элементов (табл. 1²). Участки a4 и a5 включены в ключевые участки типичных ландшафтов криолитозоны, так как на геокриологической карте РФ масштаба 1 : 2500000 в этой области указано распространение перелетков мерзлых пород и возможно островов мерзлых пород.

В итоге проведенных исследований в пределах озерно-термокарстовых равнин получено, что на семи из восьми участков разница распределений не выходит за пределы случайных отличий при уровне значимости 0.95. Пример сопоставления графиков распределений приведен на рис. 3. Статистически значимые отличия зафиксированы только на одном участке из восьми при объемах выборок 109–584.

Сопоставление распределений площадей термокарстовых озер в пределах эрозионно-термокарстовых равнин выявило, что на 7 участках из 9 наблюдаются незначимые различия на уровне 0.95. Пример сопоставления графиков распределений приведен на рис. 4. Статистически значимые отличия распределений отмечаются только на двух участках (участки 20 и 24) при объемах выборок 95–553.

² При составлении части таблицы также использованы ранее опубликованные авторами данные (Викторов и др., 2023).

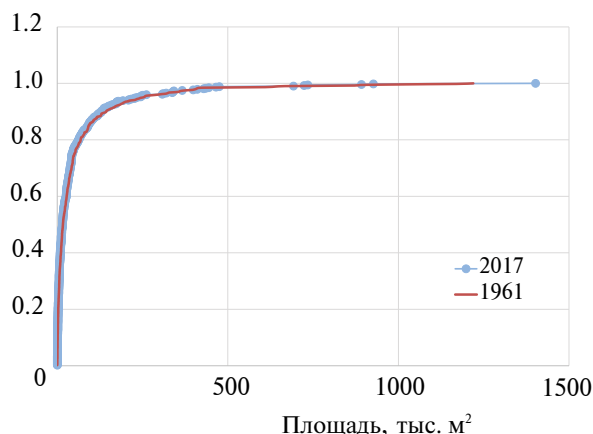


Рис. 4. Пример сопоставления графиков эмпирических распределений для участка эрозионно-термокарстовых равнин (участок 30).

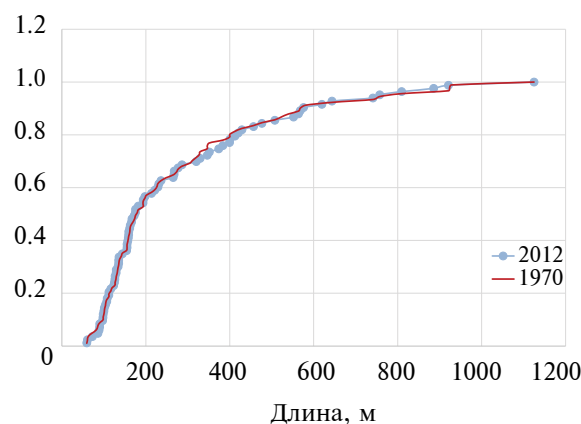


Рис. 5. Пример сопоставления графиков эмпирических распределений длин стрел формирующихся сегментов для участка пойменных равнин (участок а4).

В пределах пойменных равнин проведенное сопоставление показало, что статистически значимые отличия на уровне 0.95 отсутствуют на всех участках, при этом объемы выборок колеблются от 50 до 68 элементов. Пример сопоставления графиков распределений приведен на рис. 5.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ полученной совокупности данных позволяет наметить выводы по оценке изменения морфологической структуры наиболее типичных ландшафтов криолитозоны. Проведенное сопоставление по всей совокупности участков в целом позволяет утверждать, что на анализируемых временных интервалах (40–55 лет) в основном не наблюдается существенных изменений эмпирических распределений анализируемых параметров. Статистически значимые изменения, которые на уровне значимости 0.95 нельзя считать случайными, отмечаются в целом только на 3 участках из 28. При этом участки имеют различное географическое положение и значительную разницу в физико-географических условиях.

В пределах озерно-термокарстовых равнин статистически значимые изменения наблюдаются только на одном участке as3 (12% от числа участков). Участок расположен в восточной части полуострова Ямал. Подчеркнем, что на расположенном на том же полуострове недалеко и чуть южнее другом участке (as31) подобные изменения уже не фиксируются.

На территории развития эрозионно-термокарстовых равнин значимые различия наблюдаются на 2 участках из 9 (участки 20 и 24—22% от числа участков). Оба участка также расположены на полуострове Ямал, на других участках, расположенных в устье р. Лены, в пределах Колымской низменности и на Баффиновой Земле

отличия не выходят за пределы случайных на уровне значимости 0.95. Таким образом, территорией, на которой концентрируются выявленные изменения и для озерно-термокарстовых равнин, и для эрозионно-термокарстовых равнин оказывается Западная Сибирь — полуостров Ямал. Этот вывод безусловно является предварительным, его достоверность ограничена числом и расположением участков.

Полученный материал позволяет также сделать вывод, что изменения морфологической структуры в пределах эрозионно-термокарстовых равнин протекают несколько более интенсивно, чем в пределах озерно-термокарстовых равнин, это отражается в несколько большей доле участков с отмеченными изменениями морфологической структуры (22% против 12%). Возможным объяснением этой тенденции может быть то, что термоэрозионные процессы более активно реагируют на климатические изменения, чем термокарстовые и термоабразионные. В силу этого активизация термоэрозионных процессов, широко распространенных в ландшафтах эрозионно-термокарстовых равнин, может иметь следствием ускорение процесса спуска термокарстовых озер с превращением их в хасыреи и, соответственно, изменение распределений площадей термокарстовых озер.

Отсутствие статистически значимых изменений анализируемого параметра на участках ландшафта пойм может быть объяснено значительно меньшим распространением в их пределах многолетнемерзлых пород. Соответственно, значительно меньшей является возможность их деградации при климатических изменениях и влияния на русловые процессы, а значит, и на распределение анализируемого параметра (длин стрел). Конечно, из этого нельзя сделать вывод, что климатические изменения не влияют на морфологическую структуру пойменных ландшафтов, однако механизм их влияния существенно

другой (например, через изменение водности) и, возможно, имеет большее запаздывание, чем анализируемые временные интервалы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вероятностный анализ изменений за интервал 40–55 лет количественных характеристик морфологических структур типичных ландшафтов криолитозоны (площадей термокарстовых озер для термокарстовых равнин и длин стрел формирующихся фрагментов для пойменных ландшафтов) заставляет сделать вывод об ограниченном характере изменений. В то же время для ряда участков наблюдается статистически подтвержденная эволюция морфологических структур, при этом изменения развиваются в основном в пределах термокарстовых равнин, а в пределах пойменных ландшафтов на рассматриваемом временном интервале практически не фиксируются.

Изменения морфологической структуры в пределах эрозионно-термокарстовых равнин протекают несколько более интенсивно, чем в пределах озерно-термокарстовых равнин, что может быть объяснено более активной реакцией на климатические изменения термоэрозионных процессов по сравнению с термокарстовыми.

Наблюдаемые изменения морфологической структуры приурочены к западной части Западной Сибири, однако при этом показывают дифференцированность по ландшафтам даже в случае близкого расположения, как например, показали исследования двух рядом расположенных участков озерно-термокарстовых равнин, это указывает на важную роль состава отложений и геокриологических условий.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках Государственного задания Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН № FMWM-2022-0010.

FUNDING

The study was carried out within the framework of the State Assignment of the Sergeev Institute of Environmental Geoscience of the Russian Academy of Sciences № FMWM-2022-0010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В., Трапезникова О.Н., Архипова М.В., Березин П.В., Зверев А.В., Панченко Е.Н., Садков С.А. Анализ развития морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин на основе математической модели // Геоморфология. 2015. № 3. С. 3–13.
<https://doi.org/10.15356/0435-4281-2015-3>
- Викторов А.С., Архипова М.В., Капралова В.Н., Орлов Т.В., Трапезникова О.Н. Оценка эволюции развития морфологической структуры термокарстовых равнин криолитозоны в связи с климатическими изменениями по материалам космической съемки // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. М.: Наука, 2023. № 2. С. 76–86.
<https://doi.org/10.31857/S0869780923020091>
- Капралова В.Н. Закономерности развития термокарстовых процессов в пределах озерно-термокарстовых равнин (на основе подходов математической морфологии ландшафта). Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ИГЭ РАН, 2014. 24 с.
- Котляков В.М., Величко А.А., Глазовский А.Ф., Тумской В.Е. Прошлое и современность криосферы Арктики // Вестн. РАН. М.: МАИК "Наука/Интерпериодика", 2015. Т. 85. № 5–6. С. 463–471.
- Кравцова В.И., Родионова Т.В. Исследование динамики площади и количества термокарстовых озер в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 1. С. 81–89.
- Методическое руководство по инженерно-геологической съемке масштаба 1 : 200000 (1 : 100000–1 : 500000). М.: ВСЕГИНГЕО, Недра, 1978. 391 с.
- Панин А., Сидорчук А., Чернов А. Основные этапы формирования пойм равнинных рек Северной Евразии // Геоморфология. 2011. № 3. С. 20–31.
- Полищук В.Ю., Полищук Ю.М. Геоимитационное моделирование полей термокарстовых озер в зонах мерзлоты. Мин-во образования и науки Российской Федерации, ФГБОУ ВПО "Югорский гос. ун-т", Ин-т мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Ин-т химии нефти СО РАН. Ханты-Мансийск: УИП ЮГУ, 2013. 128 с.
- Попов И.В. Методологические основы гидроморфологической теории руслового процесса: Изб. тр. СПб.: Нестор-История, 2012. 304 с.
- Трифонов Т.А. Методика морфометрической характеристики типов и подтипов поймы реки Оби на основе дешифрирования аэрофотоснимков // Вестн. Моск. ун-та. Серия Биология, почвоведение. 1975. № 5. С. 15–26.
- Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
- Чалов Р.С., Чернов А.В. Геоморфологическая классификация пойм равнинных рек // Геоморфология. 1985. № 3. С. 3–11.
- Grosse G., Romanovsky V., Walter K., Morgenstern A., Lantuit H., Zimov S. Distribution of thermokarst lakes and ponds at three yedoma sites in Siberia // Ninth international conference on permafrost. Univ. of Alaska Fairbanks, 2008. Vol. 1. P. 551–556.
- Joung R.W. The patterns of some meandering valleys in New South Wales // Austral. Geogr. 1970. Vol. 11. № 3. P. 269–277.

- Kapralova V.N., Chesnokova I.V., Makarycheva E.M., Sergeev D.O. Importance of the Variability of Geocryological Conditions in the Determination of the Significance of the Lakes in the Structure of Regional Water Discharge // *Water Res.* 2019. Vol. 46. Suppl. 2. P. S81–S86.
- Lotsari E., Hackney C., Salmela J., Kasvi E., Kemp J., Alho P., Darby S.E. Sub-arctic river bank dynamics and driving processes during the open-channel flow period // *Earth Surface Processes and Landforms.* 2019. Vol. 45. № 5.
<https://doi.org/10.1002/esp.4796>
- Morgenstern A., Overduin P.P., Gnther F., Stettner S., Ramage J., Schirrmeister L., Grigoriev M.N., Grosse G. Thermo-erosional valleys in Siberian ice-rich permafrost // *Permafrost and Periglac Process.* 2021. Vol. 32. № 1. P. 59–75.
<https://doi.org/10.1002/ppp.2087>
- Muster S., Riley W.J., Roth K., Langer M., Cresto Aleina F., Koven Ch.D., Lange S., Bartsch A., Grosse G., Wilson C.J., Jones B.M., Boike J. Size distributions of Arctic waterbodies reveal consistent relations in their statistical moments in space and time // *Frontiers in Earth Science.* 2019. Vol. 7. Art. 5.
<https://doi.org/10.3389/feart.2019.00005>
- Muster S., Roth K., Langer M., Lange S., Cresto Aleina F., Bartsch A., Morgenstern A., Grosse G., Jones B., Sannel A.B.K., Sjöberg Y., Günther F., Andresen C., Veremeeva A., Lindgren P.R., Bouchard F., Lara M.J., Fortier D., Charbonneau S., Virtanen T.A., Hugelius G., Palmtag J., Siewert M.B., Riley W.J., Koven C.D., Boike J. PerL: a circum-Arctic Permafrost Region Pond and Lake database // *Earth System Science Data.* 2017. Vol. 9. P. 317–348.
<https://doi.org/10.5194/essd-9-317-2017>
- Nanson G.C., Croke J.C. A genetic classification of floodplains. *Floodplain Evolution // Geomorphology.* 1992. Vol. 4. № 6. P. 460–486.
- Nicolsky D.J., Romanovsky V.E., Panda S.K., Marchenko S.S., Muskett R.R. Applicability of the ecosystem type approach to model permafrost dynamics across the Alaska North Slope // *Geophys. Res. Earth Surf.* 2017. Vol. 122. P. 50–75.
<https://doi.org/10.1002/2016JF003852>
- Nitze I., Grosse G., Jones B.M., Arp C.D., Ulrich M., Fedorov A., Veremeeva A. Landsat-Based Trend Analysis of Lake Dynamics across Northern Permafrost Regions // *Remote Sens.* 2017. Vol. 9. № 7. 640 p.
<https://doi.org/10.3390/rs9070640>
- Olefelt D., Goswami S., Grosse G., Hayes D.J., Hugelius G., Kuhry P., Sannel B., Schuur E.A.G., Turetsky M.R. Arctic Circumpolar Distribution and Soil Carbon of Thermokarst Landscapes // *Nature.* 2016. Vol. 7. P. 1–11.
<https://doi.org/10.1038/ncomms13043>
- Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // *Nature.* 2016. Vol. 540. P. 418–422.
<https://doi.org/10.1038/nature20584>
- Peschke G. Zur Anwendbarkeit statistischer Modelle für die Untersuchung des Maanderproblems // *Acta Hydrophys.* 1973. Vol. 17. № 2–3. P. 235–247.
- Sylvester Z., Durkin P., Covault J.A. High curvatures drive river meandering // *Geology.* 2019. № 47 (3). P. 263–266.
<https://doi.org/10.1130/G45608.1>

Probabilistic Study of the Evolution of Landscape Morphological Patterns in the Cryolithozone in Relation to Climate Change

A. S. Victorov^{a,*}, M. V. Arhipova^a, V. N. Kapralova^a, T. V. Orlov^a,
and O. N. Trapeznikova^a

^a*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

*e-mail: vic_as@mail.ru

The aim of this research is to assess the nature of morphological pattern evolution related to climatic changes for the most typical landscapes in the permafrost zone, including lacustrine thermokarst plains, thermokarst plains with fluvial erosion, and floodplains, based on the probabilistic approach. Twenty-eight key sites in different physiographic environments were selected for study. The key sites were composed of different deposits, such as deltaic, lacustrine-alluvial, alluvial and alluvial-marine, fluvio-glacial, and lake-marsh formations. Based on high-resolution satellite imagery, samples of quantitative characteristics of the landscape morphological patterns under consideration, such as thermokarst lake areas for thermokarst plains and arrow lengths of forming fragments for floodplains, were obtained for two survey dates with 40–55 year intervals. Samples for each site were compared using the Smirnov test. The probabilistic analysis of the quantitative characteristics of morphological patterns for typical permafrost landscapes over 40–55 years leads to the conclusion that the morphological pattern changes are rather limited. At the same time, a statistically confirmed evolution of morphological patterns is observed for a number of key sites of thermokarst plains, but the changes are practically not recorded within the floodplain

landscapes in the considered time interval. The changes of morphological patterns are more intensive for the thermokarst plains with fluvial erosion in comparison with the lacustrine thermokarst plains, which can be explained by a more active response of thermal erosion to climatic changes in comparison with the thermokarst process. The observed changes in morphological patterns are limited to the western part of Western Siberia, but they show landscape differentiation even in the case of close location, which indicates the important role of sediment composition and geocryological conditions.

Keywords: landscape pattern, mathematical morphology of landscapes, cryolithozone plains, climate changes, response to climate changes, thermokarst, remote sensing data

REFERENCES

- Chalov R.S. *Geograficheskie issledovaniya ruslovykh protsessov* [Geographic Studies of Channel Processes]. Moscow: Izd-vo Mosk. Univ., 1979. 232 p.
- Chalov R.S., Chernov A.V. Geomorphological classification of plain rivers flood-plains. *Geomorfol.*, 1985, no. 3, pp. 3–11. (In Russ.).
- Grosse G., Romanovsky V., Walter K., Morgenstern A., Lantuit H., Zimov S. Distribution of thermokarst lakes and ponds at three yedoma sites in Siberia. In *Ninth international conference on permafrost. Vol. 1*. University of Alaska Fairbanks, 2008, pp. 551–556.
- Joung R.W. The patterns of some meandering valleys in New South Wales. *Austral. Geogr.*, 1970, vol. 11, no. 3, pp. 269–277.
- Kapralova V.N. Regularities of the development of thermokarst processes within lake-thermokarst plains (based on approaches of mathematical morphology of the landscape). *Extended Abstract Cand. Sci. (Geolog.) Dissertation*. Moscow: IEG RAS, 2014. 24 p.
- Kapralova V.N., Chesnokova I.V., Makarycheva E.M., Sergeev D.O. Importance of the variability of geocryological conditions in the determination of the significance of the lakes in the structure of regional water discharge. *Water Resour.*, 2019, vol. 46, pp. S81–S86.
- Kotlyakov V.M., Velichko A.A., Glazovsky A.F., Tumskii V.E. The past and present-day Arctic cryosphere. *Her. Russ. Acad. Sci.*, 2015, vol. 85, pp. 251–259. <https://doi.org/10.1134/S1019331615030132>
- Kravtsova V.I., Rodionova T.V. Investigation of the dynamics in area and number of thermokarst lakes in various regions of Russian cryolithozone, using satellite images. *Kriosf. Zemli*, 2016, vol. 20, no. 1, pp. 81–89. (In Russ.).
- Lotsari E., Hackney C., Salmela J., Kasvi E., Kemp J., Alho P., Darby S.E. Sub-arctic river bank dynamics and driving processes during the open channel flow period. *Earth Surf. Process. Landf.*, 2019, vol. 45, no. 5, pp. 1198–1216. <https://doi.org/10.1002/esp.4796>
- Metodicheskoe rukovodstvo po inzhenerno-geologicheskoi s'emke masshtaba 1 : 200000 (1 : 100000–1 : 500000)* [Methodological Guide for Engineering-Geological Survey on the Scale of 1 : 200000 (1 : 100000–1 : 500000)]. Moscow: Nedra Publ., 1978. 391 p.
- Morgenstern A., Overduin P.P., Günther F., Stettner S., Ramage J., Schirrmeister L., Grigoriev M.N., Grosse G. Thermo erosional valleys in Siberian ice-rich permafrost. *Permafr. Periglac. Process.*, 2021, vol. 32, no. 1, pp. 59–75. <https://doi.org/10.1002/ppp.2087>
- Muster S., Riley W.J., Roth K., Langer M., Cresto Aleina F., Koven Ch.D., Lange S., Bartsch A., Grosse G., Wilson C.J., Jones B.M., Boike J. Size distributions of Arctic waterbodies reveal consistent relations in their statistical moments in space and time. *Front. Earth Sci.*, 2019, vol. 7, art. 5. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00005>
- Muster S., Roth K., Langer M., Lange S., Cresto Aleina F., Bartsch A., Morgenstern A., Grosse G., Jones B., Sannel A.B.K., Sjöberg Y., Günther F., Andresen C., Veremeeva A., Lindgren P.R., Bouchard F., Lara M.J., Fortier D., Charbonneau S., Virtanen T.A., Hugelius G., Palmtag J., Siewert M.B., Riley W.J., Koven C.D., Boike J. PeRL: a circum-Arctic Permafrost Region Pond and Lake database. *Earth Syst. Sci. Data*, 2017, vol. 9, pp. 317–348. <https://doi.org/10.5194/essd-9-317-2017>
- Nanson G.C., Croke J.C. A genetic classification of floodplains. *Floodplain Evolution. Geomorphology*, 1992, vol. 4, no. 6, pp. 460–486.
- Nicolisky D.J., Romanovsky V.E., Panda S.K., Marchenko S.S., Muskett R.R. Applicability of the ecosystem type approach to model permafrost dynamics across the Alaska North Slope. *Geophys. Res. Earth Surf.*, 2017, vol. 122, pp. 50–75. <https://doi.org/10.1002/2016JF003852>
- Nitze I., Grosse G., Jones B.M., Arp C.D., Ulrich M., Fedorov A., Veremeeva A. Landsat-based trend analysis of lake dynamics across northern permafrost regions. *Remote Sens.*, 2017, vol. 9, no. 7, art. 640. <https://doi.org/10.3390/rs9070640>
- Olefelt D., Goswami S., Grosse G., Hayes D.J., Hugelius G., Kuhry P., Sannel B., Schuur E.A.G., Turetsky M.R. Arctic circumpolar distribution and soil carbon of thermokarst landscapes. *Nature*, 2016, vol. 7, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1038/ncomms13043>
- Panin A.V., Sidorchuk A.Yu., Chernov A.V. Main stages of the flood-plain formation in Northern Eurasia. *Geomorfol.*, 2011, no. 3, pp. 20–31. (In Russ.).
- Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 2016, vol. 540, pp. 418–422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>

- Peschke G. Zur Anwendbarkeit statistischer Modelle für die Untersuchung des Maanderproblems. *Acta Hydrophys.*, 1973, vol. 17, no. 2–3, pp. 235–247. (In German).
- Polishchuk V.Yu. Polishchuk Yu.M. *Geoimitatsionnoe modelirovanie polei termokarstovykh ozer v zonakh merzloty* [Geosimulation Modeling of Fields of Thermokarst Lakes in Permafrost Zones]. Khanty-Mansiysk: UIP YUGU, 2013. 128 p.
- Popov I.V. *Metodologicheskie osnovy gidromorfologicheskoi teorii ruslovogo protsessa: Izbrannye trudy* [Methodological Foundations of the Hydromorphological Theory of the Channel Process. Selected Works]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya Publ., 2012. 304 p.
- Sylvester Z., Durkin P., Covault J.A. High curvatures drive river meandering. *Geology*, 2019, vol. 47, no. 3, pp. 263–266.
<https://doi.org/10.1130/G45608.1>
- Trifonova T.A. Methods of morphometric characterization of types and subtypes of the Ob river floodplain based on interpretation of aerial photographs. *Vestn. Mosk. Univ., Ser.: Biol., Pochvoved.*, 1975, no. 5, pp. 15–26. (In Russ.).
- Viktorov A.S., Arkhipova M.V., Kapralova V.N., Orlov T.V., Trapeznikova O.N. Evaluation of climate-induced evolution of the morphological structure of thermokarst plains in the permafrost zone using remote sensing data. *Geoekol. Inzh. Geol. Gidrogeol. Geokriol.*, 2023, no. 2, pp. 76–86. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S0869780923020091>
- Viktorov A.S., Kapralova V.N., Orlov T.V., Trapeznikova O.N., Arkhipova M.V., Berezin P.V., Zverev A.V., Panchenko E.N., Sadkov S.A. Analysis of the morphological structure development of the thermokarst-lake plains on the base of the mathematical model. *Geomorfol.*, 2015, no. 3, pp. 3–13. (In Russ.).
<https://doi.org/10.15356/0435-4281-2015-3>

ЛАНДШАФТЫ И ЭКОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ
МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

УДК 519.876.5:551.343(1–924.81/.82)

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ОЗЕРНЫХ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ЛАНДШАФТОВ БОЛЬШЕЗЕМЕЛЬСКОЙ
ТУНДРЫ ДЛЯ ПРОГНОЗА ИХ РАЗВИТИЯ
В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

© 2024 г. Т. Ю. Зенгина^{1,*}, Г. Г. Осадчая^{2,**}, В. В. Баранов^{1,***}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Россия

*e-mail: tzengina@mail.ru

**e-mail: galgriosa@yandex.ru

***e-mail: bv2000rus@mail.ru

Поступила в редакцию 21.05.2023 г.

После доработки 11.02.2024 г.

Принята к публикации 16.05.2024 г.

На примере Большеземельской тундры рассмотрен опыт прогнозного моделирования термокарстовых проявлений к 2040 г., основанный на платформе Biomod2 и методах ансамблевого моделирования с использованием в качестве входных шести биоклиматических переменных WorldClim, ЦМР SRTM и набора данных о распределении термокарстовых ландшафтов циркумполярной криолитозоны проекта Arctic Circumpolar Distribution and Soil Carbon of Thermokarst Landscapes. Обоснован выбор наиболее значимых для развития термокарста биоклиматических параметров моделирования, предложен алгоритм предподготовки исходных данных. На основе четырех встроенных в Biomod2 алгоритмов проведено ансамблевое моделирование и использован алгоритм SRC. Результаты визуализированы в двух картах. Первая оценивает вероятность образования термокарстовых озерных ландшафтов к 2040 г. Вторая отображает возможную направленность процесса с выделением четырех типов территорий (1 – термокарстовых озер нет и не будет в 2040 г.; 2 – состояние озерных термокарстовых ландшафтов не изменится; 3 – образование озер активизируется; 4 – дренирование и высыхание озер). Анализ карт показал, что частично зона вероятной активизации термокарстовых процессов в 2040 г. сместится к северу и останется наиболее высокой для аazonальных приморских ландшафтов и вдоль нижнего течения р. Печоры. Направленность развития термокарстовых озерных ландшафтов на севере зоны современного сплошного распространения мерзлоты значительно не изменится, однако на юге этой зоны выделяются территории, где термокарстовые озера будут дренированы и превратятся в хасыреи, что приведет к промерзанию приповерхностного талого слоя, формированию слоистой мерзлоты и, несмотря на тренд климатического потепления, увеличению площади мерзлоты. Прогнозируемое появление области активизации термокарста в подзоне островного распространения многолетнемерзлых пород севернее Инты не согласуется с современной геокриологической ситуацией, что очевидно связано с недоучетом геокриологических особенностей региона авторами проекта “Arctic Circumpolar Distribution and Soil Carbon of Thermokarst Landscapes.”

Ключевые слова: Большеземельская тундра, озерные термокарстовые ландшафты, климатические изменения, прогнозное моделирование, ансамблевые методы машинного обучения, нефтяные и газоконденсатные месторождения

DOI: 10.31857/S2587556624030045 EDN: SOLEKE

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время хозяйственное развитие в пределах Большеземельской тундры, связанное, в первую очередь, с освоением сырьевых ресурсов, сталкивается с целым рядом геоэкологи-

ческих проблем, многие из которых возникают в связи со спецификой северной природы и часто усугубляются современными климатическими трендами, способствующими, в том числе, активизации термокарстовых процессов. Термокарстовые проявления, обусловленные как

современными климатическими изменениями, так и хозяйственным освоением территории, приводят к постепенному изменению площади мерзлых пород (главным образом — к увеличению площадей с несливающимися мерзлыми породами), повышению их температуры и изменению мощности. Все это может создавать серьезные проблемы для дальнейшего успешного осуществления хозяйственной деятельности в регионе.

Одним из наиболее ярких термокарстовых проявлений можно считать изменение состояния и площади термокарстовых озер. Для Большеземельской тундры (БЗТ) обилие таких озер является характерной ландшафтной особенностью и во многом обуславливает специфику тундровых и лесотундровых ландшафтов региона (Кравцова, 2009).

В связи с этим, изучение современной динамики озерных термокарстовых ландшафтов, а также скорости и направленности развития термокарстовых проявлений в их пределах представляется одной из наиболее значимых задач, решение которой может обеспечить принятие оптимальных и экономически обоснованных на сегодняшний день инженерных решений при проектировании и эксплуатации в регионе различных хозяйственных объектов, и, в первую очередь, — объектов нефтегазовой и транспортной инфраструктуры (Зенгина и др., 2011).

Учитывая значительные площади, занятые многолетнемерзлыми породами (ММП) и озерными термокарстовыми ландшафтами (Осадчая и др., 2016), их изучение может достаточно успешно проводиться с использованием ГИС-технологий и методов компьютерного моделирования. Результаты прогнозного моделирования тенденций развития термокарстовых проявлений и сопутствующих проблем мерзлотно-экологического характера в дальнейшем могут быть эффективно использованы для визуализации и анализа ситуации в структуре геоинформационных пакетов для создания соответствующих карт, а также для решения задач приоритизации в принимаемых превентивных мерах в зонах повышенного риска развития термокарстовых процессов в районах хозяйственного освоения территории.

Целью данного исследования являлось выявление обусловленных климатическими изменениями потенциальных зон активизации термокарстовых процессов в районах хозяйственного освоения БЗТ с использованием методов прогнозного геоинформационного моделирования. В задачи работы входило: ознакомление с имеющимся опытом и методиками компьютерного моделирования термокарстовых процессов и выбор наиболее значимых для развития озерных термокарстовых ландшафтов биоклиматических

параметров моделирования; формирование на основе материалов свободного доступа соответствующей базы геопространственных данных, а также выбор и отработка алгоритма их подготовки; опробование предложенной методики моделирования и разработка алгоритма обучения модели. В задачи работы также входило создание по результатам моделирования прогнозных карт развития озерных термокарстовых ландшафтов на 2040 г., определение зон их максимального ожидаемого изменения и сопоставление полученных результатов как с современной геокриологической ситуацией, так и с районами современного и перспективного развития нефтегазового комплекса для выявления месторождений, площади которых максимально подвержены угрозе потенциального риска развития термокарста.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использованные материалы. Для выбора основных параметров моделирования был проведен анализ литературных источников, который показал, что среди основных природных факторов, влияющих на развитие термокарстовых процессов, наиболее значимыми являются: климатические изменения (изменение прихода тепла и влаги, смена среднегодовой температуры и др.), льдистость пород, растительный покров и его изменения, а также — неотектонические движения и особенности рельефа (Гречищев и др., 1980; Качурин, 1961; Маслов и др., 2005; Тумель, Зотова, 2014; Фельдман, 1984; Шур, 1988).

В работе использовались только открытые данные, доступные для пользователей сети интернет. Ввиду того что результаты моделирования предполагалось в дальнейшем использовать для картографирования, подбирались геопривязанные данные из числа наиболее значимых для развития изучаемого процесса. Из всех проанализированных доступных материалов было решено использовать: 1) набор данных о современном распределении термокарстовых ландшафтов северной циркумполярной криолитозоны; 2) набор биоклиматических переменных, представленных в базе глобальных данных о погоде и климате WorldClim; 3) цифровую модель рельефа SRTM. Рассмотрим их подробнее.

1. Данные о современном распределении термокарстовых ландшафтов в пределах БЗТ были взяты из проекта “Арктическое циркумполярное распределение и почвенный углерод термокарстовых ландшафтов” (Arctic Circumpolar Distribution and Soil Carbon of Thermokarst Landscapes) (Olefeldt et al., 2016). Материалы проекта представлены в виде векторных данных на сайте Центра распределенных активных архивов Ок-Риджской национальной лаборатории, входящей в струк-

туру Центра системы данных и информации системы наблюдения за Землей НАСА (<https://daac.ornl.gov/about/>). В рамках названного проекта термокарстовые ландшафты определяются как “ландшафты, где термокарстовые проявления в настоящее время присутствуют или могут развиваться”. Помимо оценки содержания органического углерода в почве в наборе представлена территориальная оценка трех типов термокарстовых ландшафтов (озерных, водно-болотных и склоновых) по состоянию на 2015 г. Нами была в первую очередь использована информация по термокарстовым озерным ландшафтам, соответствующая столбцу атрибутивной таблицы слоя TKThLP (Lake thermokarst terrain coverage). Кроме того, в проекте все термокарстовые ландшафты оценены по уровню регионального охвата термокарстовыми проявлениями и разделены по этому критерию на 5 классов: 1) Very High – очень высокий уровень (60–100% регионального охвата); 2) High – высокий (30–60%); 3) Moderate – средний (10–30%); 4) Low – низкий (1–10%); 5) None – нулевой (0–1%).

Важным аргументом в пользу выбора именно этого набора данных послужил тот факт, что региональное распространение термокарстовых ландшафтов в рамках этого проекта было получено на основе моделирования с использованием 6 слоев пространственных циркумполярных данных, описывающих ключевые характеристики ландшафта: районирование вечной мерзлоты (островное, спорадическое, прерывистое или непрерывное), содержание грунтового льда (<10%, 10–20% или >20%), толщина осадочных пород, наземный экорегион (бореальный или тундровый), рельеф местности (плоский, холмистый, холмистый или горный/неровный) и ландшафтный охват (<10%, 10–30% или >30%). В результате пересечения этих слоев был получен один полигональный слой в виде шейп-файла (shp), содержащий более 130 тыс. полигонов (Olefeldt et al., 2016).

Использование именно этого набора данных фактически обеспечило косвенное включение в моделирование ряда таких природных факторов, влияющих на развитие термокарстовых процессов, которые не могли быть использованы нами при моделировании напрямую в силу отсутствия в свободном доступе иных геопривязанных данных такой детальности и содержания на столь обширную территорию.

От особенностей распространения ММП (островного, спорадического, прерывистого или непрерывного) зависит сам процесс развития термокарста. Например, озерные термокарстовые ландшафты сосредоточены в основном в северной части криолитозоны, где распространение многолетней мерзлоты имеет сплошной характер. Содержание грунтового

льда (льдищность пород) определяет распространение термокарстовых форм рельефа. Так, чем выше льдищность, тем на территории более широко распространены формы рельефа, имеющие термокарстовый генезис. Тип растительности (бореальный или тундровый) может рассматриваться как дополнительный фактор развития процесса, являясь индикатором геокриологической зональности. Так, наличие древесной растительности сдерживает развитие термокарста. В свою очередь современный ландшафтный охват территории термокарстовыми проявлениями (<10%, 10–30% или >30%) определяет возраст термокарста, степень его зрелости и, следовательно, потенциал дальнейшего развития. Таким образом, использование описанных данных Ок-Риджской лаборатории обеспечило косвенное включение ряда достаточно значимых предикторов развития термокарста в моделирование.

II. Набор биоклиматических переменных, представленных в базе глобальных данных о погоде и климате WorldClim – это геопривязанные растровые картографические материалы о погодных и климатических показателях высокого разрешения по всему миру, представленные группами по моделированию климата, а также Федерацией сетей системы Земли (ESGF) на сайте worldclim.org. Представлено 2 типа данных – для так называемых исторических условий (т.е. близких к текущим) и для будущих (спрогнозированных) условий.

Текущие (исторические) климатические данные WorldClim версии 2.1 (v2) относятся к 1970–2000 гг. и стали доступны с января 2020 г. Они формировались при поддержке гранта от Feed the Future Консорциума геопространственных и сельскохозяйственных систем Лаборатории инноваций в области устойчивой интенсификации (Fick and Hijmans, 2017; Ziehn et al., 2019).

Будущие (т.е. спрогнозированные) климатические данные представляют собой прогнозы климата CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Projects/Проекты взаимного сравнения связанных моделей). CMIP6 представляет собой существенное расширение по сравнению с CMIP5 с точки зрения количества участвующих групп моделирования и количества рассмотренных будущих сценариев. Для 23 глобальных климатических моделей были обработаны переменные самой низкой температуры, максимальной температуры и осадков за каждый месяц. Расчет также проводился и для четырех общих сценариев социально-экономического развития человечества SSP (socioeconomic pathways): 126, 245, 370 и 585. В нашей работе использовался сценарий SSP-126 с низким радиационным воздействием к концу века, который представляет собой нижний предел диапазона вероятных будущих путей

развития и отображает “лучший вариант” будущего с точки зрения устойчивого развития. Месячные значения были рассчитаны как средние значения за 20 лет для разных периодов: 2021–2040, 2041–2060, 2061–2080, 2081–2100 гг. В работе были использованы спрогнозированные данные на период 2021–2040 гг.

Биоклиматические данные являются важнейшими факторами зонального ряда, влияющими на развитие термокарста. В рассмотренном наборе данных приводятся 19 биоклиматических переменных. Нами были выбраны 6 из них. Термокарст относят к процессам летнего ряда. Его развитие определяется изменением прихода тепла и влаги как в среднегодовом цикле, так и особенно для летнего периода. Следовательно, для термокарста важны параметры, характеризующие теплый период (максимальная и средняя температура самого теплого месяца, температура и осадки самого теплого квартала), а также годовой диапазон температуры, годовое количество осадков и среднегодовая температура. Поэтому из всех биоклиматических переменных были выбраны 6: BIO1 – среднегодовая температура; BIO5 – максимальная температура самого теплого месяца; BIO7 – годовой диапазон температуры (разница между BIO5 – максимальной температурой самого теплого месяца и BIO6 – минимальной температурой самого холодного месяца); BIO10 – средняя температура самого теплого квартала; BIO12 – годовое количество осадков; BIO18 – осадки самого теплого квартала. Данные доступны в четырех пространственных разрешениях – от 30 с до 10 мин и представлены в формате GeoTiff (.tif). Нами в работе были использованы данные с разрешением 10 и 2.5 мин.

III. В качестве цифровой модели рельефа (ЦМР) использовались находящиеся в открытом доступе данные SRTM, полученные с помощью Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) и агрегированные до 30 угловых секунд.

Включение рельефа (как значимого регионального фактора) для моделирования развития термокарстовых процессов необходимо, поскольку рельеф во многом определяет условия увлажнения и направление развития термокарстовых проявлений, их затухание или активизацию. Влияние рельефа проиллюстрируем на следующих примерах. Например, слабонаклонная поверхность (крутизной менее 1°) способствует развитию термокарста, тогда как на плоской поверхности (т.е. без выраженного уклона) происходит быстрое затухание термокарстовых процессов после их начала, поэтому на таких поверхностях образование озер маловероятно. Более возвышенные участки характеризуются меньшей мощностью снежного покрова, что способствует большему охлаждению грунтов и стабилизации мерзлотных условий.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вопросам возможности использования компьютерного моделирования для изучения и прогнозирования развития термокарстовых процессов в последние годы посвящено много работ как отечественных, так и зарубежных. При этом многие авторы указывают на сложность реализации такого типа исследований, так как моделирование процесса термокарста осложняется отсутствием на сегодняшний день единой математической модели термокарста, описывающей процесс с момента его зарождения до затухания, а также тесной взаимосвязью инженерно-геокриологических процессов между собой (Хабибуллин и др., 2007).

Проведенный анализ публикаций показал, что российский опыт подобных исследований в большей степени основан на классическом вероятностном подходе к моделированию (Викторов и др., 2019; Капралова и др., 2013; Кирикова, Осадчая, 1998; Полищук и др., 2013), а в зарубежных публикациях отмечается тенденция более широкого использования методов компьютерного моделирования, основанных на алгоритмах машинного обучения (Huang et al., 2018; Nitze et al., 2020; Yin et al., 2021). Наиболее интересными показались работы, реализующие прогнозное моделирование на основании сразу нескольких алгоритмов машинного обучения с их последующим объединением для множественного ансамблевого моделирования. Такой подход, например, был реализован в 2021 г. в работе китайских специалистов, посвященной моделированию на основе машинного обучения подверженности термокарстовым оползням региона вечной мерзлоты на Тибетском нагорье (Yin et al., 2021). Алгоритмы машинного обучения были реализованы ими в программной среде R на базе платформы Biomod2, а результаты затем были перенесены в ГИС-пакет ArcGIS для построения прогнозных карт. Этот подход и был взят нами за основу при разработке алгоритма прогнозного моделирования термокарстовых проявлений к 2040 г. в пределах БЗТ.

Компьютерная платформа для моделирования Biomod2 представляет собой обновленную версию пакета BIOMOD, который изначально был предназначен для ансамблевого прогнозирования распределения видов с помощью нескольких методов в различных условиях окружающей среды. BIOMOD реализован в среде R и представляет собой бесплатный пакет с открытым исходным кодом. Обновленная версия Biomod2 предлагает возможность запуска сразу 10 современных методов моделирования для описания и прогнозирования отношения между видом и средой его обитания. Пакет разработан в основном для решения задач в сфере экологии,

однако, как и BIOMOD, может и достаточно широко используется для моделирования практически любых данных в зависимости от любых связанных и определяющих их переменных (Thuiller et al., 2009; Yin et al., 2021).

Учитывая особенности набора использованных нами материалов, которые включали как векторные, так и растровые данные, в качестве базового программного обеспечения также использовались: 1) свободная геоинформационная система QGIS3.16.4 with GRASS7.8.5 с открытым кодом, в которой проводилась подготовка векторных и растровых слоев для моделирования, проводились все расчеты, а потом осуществлялась картографическая визуализация результатов моделирования; 2) программное обеспечение Jupyter Notebook для интерактивных вычислений с использованием языка программирования Python 3.9; 3) программная среда разработки R-Studio (R4.1.1) с установленной платформой Biomod2, в которой проводилось моделирование.

Алгоритм прогнозного моделирования развития термокарстовых проявлений в пределах БЗТ на 2040 г. включал два этапа (Zengina et al., 2023). Первый – отработка методики на материалах с низким пространственным разрешением в 10 мин, в рамках которого осваивалась алгоритмы машинного обучения для обработки разнотипных данных (векторных, табличных, растровых). Второй – процесс итогового прогнозного моделирования, который осуществлялся по уже опробованной методике на данных более высокого разрешения в 2.5 мин.

Вначале исходные растровые слои с биоклиматическими данными, растровый слой SRTM и векторный слой с данными о современном распространении термокарстовых ландшафтов (по версии проекта “Arctic Circumpolar Distribution and Soil Carbon of Thermokarst Landscapes”), были обрезаны в программе QGIS-3.16 по границе района исследования.

Далее для удобства последующей работы при загрузке данных в R-Studio, полигональный слой Circumpolar_Thermokarst_Landscapes был преобразован в точечный слой. Для данных с разрешением 2.5 мин алгоритма создания центроидов на каждый отдельно взятый полигон оказалось недостаточно, и поэтому был использован алгоритм создания случайных точек. Создание 25 точек на каждый полигон при загрузке данных в R-Studio обеспечило покрытие территории в 90%. После того как для каждой точки полученного слоя были определены и добавлены координаты, слой был сохранен в табличном формате CSV (comma-separated values). Далее в среде разработки Jupyter Notebook из таблицы были удалены все лишние данные и оставлена только информация о наличии термокарстовых

проявлений, а также данные о координатах. Для этого данные таблицы были переведены в формат boolean (true/false), т.е. в формат, указывающий присутствует ли в данной точке природное явление, или отсутствует. Использовались значения колонки ‘TKThLP’, которые были преобразованы исходя из пяти значений, соответствующих разным уровням регионального охвата термокарстовыми ландшафтами (Very High, High, Moderate, Low, None). Если значение было ‘None’, то оно приравнялось к нулю, все остальные – к единице. После этого были удалены все позиции с нулевыми значениями. Таким образом, был получен и окончательно сохранен преобразованный табличный файл в формате CSV с данными о распространении термокарстовых озер.

Следующим необходимым этапом работы была проверка выбранных для процесса моделирования параметров на мультиколлинеарность с помощью коэффициента Пирсона. Мультиколлинеарность отрицательно влияет на результаты моделирования и на обучение моделей. Анализ корреляционной матрицы Пирсона между биоклиматическими переменными и переменной высоты (elevation) показал, что есть положительная корреляция ≥ 0.9 между BIO5 и BIO10, а также между BIO18 и BIO12, что говорит о наличии мультиколлинеарности. Существует несколько методов борьбы с этим явлением, одним из которых является стандартное удаление одного из признаков. Однако Biomod2, на базе которого будет осуществляться моделирование, предлагает выбор из нескольких алгоритмов машинного обучения, одним из которых является RF (random forest), который считается алгоритмом, устойчивым к мультиколлинеарности (Breiman, 2001). Эту проблему решает также и ансамблевое моделирование.

Далее полученный и загруженный в R-Studio слой с данными о распространении термокарстовых озер был использован для обучения модели (Zengina et al., 2023). Из всех возможных встроенных в Biomod2 алгоритмов машинного обучения были выбраны четыре: обобщенная линейная модель (GLM), обобщенная аддитивная модель (GAM), обобщенный метод бустинга (GBM), случайный лес (RF). Последние два являются методами ансамблевого моделирования и объединяют множество деревьев классификации для формирования единой модели с повышенной точностью прогнозирования. Выбранные алгоритмы машинного обучения хорошо работают с подобного рода природными данными, что подтверждается в публикациях многих исследователей (Guisan et al., 2017; Nitze et al., 2020; Wood, 2011; Yin et al., 2021). Для каждого алгоритма были настроены индивидуальные стандартные параметры, количество основных

прогнозов было установлено равным двум. Рассчитанные метрики эффективности каждого из четырех алгоритмов машинного обучения показали, что лучше всего сработал алгоритм RF (random forest) ввиду его устойчивости к мультиколлинеарности. Проведенная после этого оценка природных факторов показала, что все они в большинстве случаев действительно оказывают влияние на развитие термокарстовых процессов. Например, по большинству алгоритмов (кроме RF) такие природные факторы, как BIO18 (осадки самого теплого квартала) и elev (высота), оказались влияющими в более чем 50% случаев.

Для усовершенствования результатов работы всех алгоритмов было также проведено ансамблевое обучение (ensemble learning), которое обеспечивает получение более высокой прогностической эффективности и учитывает преимущества каждого отдельного алгоритма модельного обучения, которое оно объединяет (Kuncheva et al., 2003; Opitz et al., 1999). В нашем случае для ансамблевого обучения были выбраны все использованные модели, поскольку у всех значения метрики TSS (true skill statistics) больше 0.6.

Далее для создания математической проекции прогнозируемой ситуации 2040 г. был использован растровый слой, содержащий 19 биоклиматических переменных, соответствующих будущему климату, спрогнозированному на 2040 г. в рамках проекта CMIP6 по сценарию ssp126 (Ziehn et al., 2019). В R-Studio этот слой был разделен на 19 отдельных растровых слоев, соответствующих 19 биоклиматическим переменным. Из них были выбраны только растры с теми же биоклиматическими переменными, которые до этого использовались для обучения модели (BIO1, BIO5, BIO7, BIO10, BIO12, BIO18). В качестве растра, описывающего гипсометрические параметры территории, был использован тот же файл elevation_data. Полученный на основе математического ансамблевого моделирования результат пространственного прогнозирования термокарстовых проявлений может интерпретироваться как расчет вероятности образования термокарстовых озер в 2040 г., выраженной в процентах.

Следующим шагом стало определение изменений распространения термокарстовых проявлений к 2040 г. на основании алгоритма SRC (species range change), встроенного в функцию BIOMOD_RangeSize, который определяет изменение пределов распространения природного явления (Thuiller et al., 2014). Для расчета использовались прогнозы динамики термокарстовых озерных ландшафтов на 2040 г., созданные по результатам ансамблевого моделирования (по характеристикам са – commute average и wm – weighted mean) (Zengina et al., 2023). После отработки алгоритма был получен растро-

вый файл со значениями: –2 (lost), –1 (pres), 0 (abs), 1 (gain). Интерпретация этих значений соответствует четырем типам территорий с разной направленностью развития термокарстовых озерных ландшафтов: 1) территории, где термокарстовых проявлений нет сейчас и не будет в 2040 г. (abs); 2) где они будут протекать без изменений по сравнению с современной ситуацией (pres); 3) где они будут активизироваться (gain); 4) где они будут угасать (lost).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты, полученные при моделировании, были перенесены в геоинформационный пакет QGIS и оформлены как две прогнозные карты: карта вероятности развития термокарстовых озерных ландшафтов в 2040 г. (рис. 1) и карта направленности развития термокарстовых озерных ландшафтов в 2040 г. (рис. 2).

Полученные прогнозные карты методом наложения слоев в ГИС были сопоставлены с современной геокриологической картой БЗТ, представленной в работах российских исследователей (Осадчая, Зенгина, 2012; Осадчая, Пижанкова, 2023; Осадчая и др., 2015) и основанной на классификации геокриологических зон В.Н. Достовалова и В.А. Кудрявцева (1967), а затем сопоставлены с картографическим представлением векторного слоя распространения современных озерных термокарстовых ландшафтов проекта “Arctic Circumpolar Distribution and Soil Carbon of Thermokarst Landscapes” (Olefeldt et al., 2016), который был использован для обучения модели.

Сравнение прогнозируемой и современной ситуации показало следующее. Вероятность развития термокарстовых процессов в 2040 г. останется наиболее высокой на севере БЗТ в пределах азональных приморских ландшафтов и вдоль нижнего течения р. Печоры, где и в настоящее время отмечается максимальная плотность проявления таких процессов, как термокарст и термоабразия. На востоке–юго-востоке БЗТ к 2040 г. появится новая область, протянувшаяся к северу от города Инты от южной тундры до крайнесеверной тайги, где по прогнозным расчетам вероятность развития термокарстовых процессов может составить 70–80%. Однако в настоящее время в этом регионе, в соответствии с работами российских исследователей, этот показатель очень незначителен, поскольку территория относится к бореальному экорегиону и приходится на район не сплошного, а островного распространения ММП (Осадчая и др., 2015; Ророва et al., 2005). Острова ММП существуют здесь в массивах бугристых торфяников и приурочены к буграм, тогда как межбугровые понижения преимущественно талые. Таким образом, прогнозируемое активное развитие

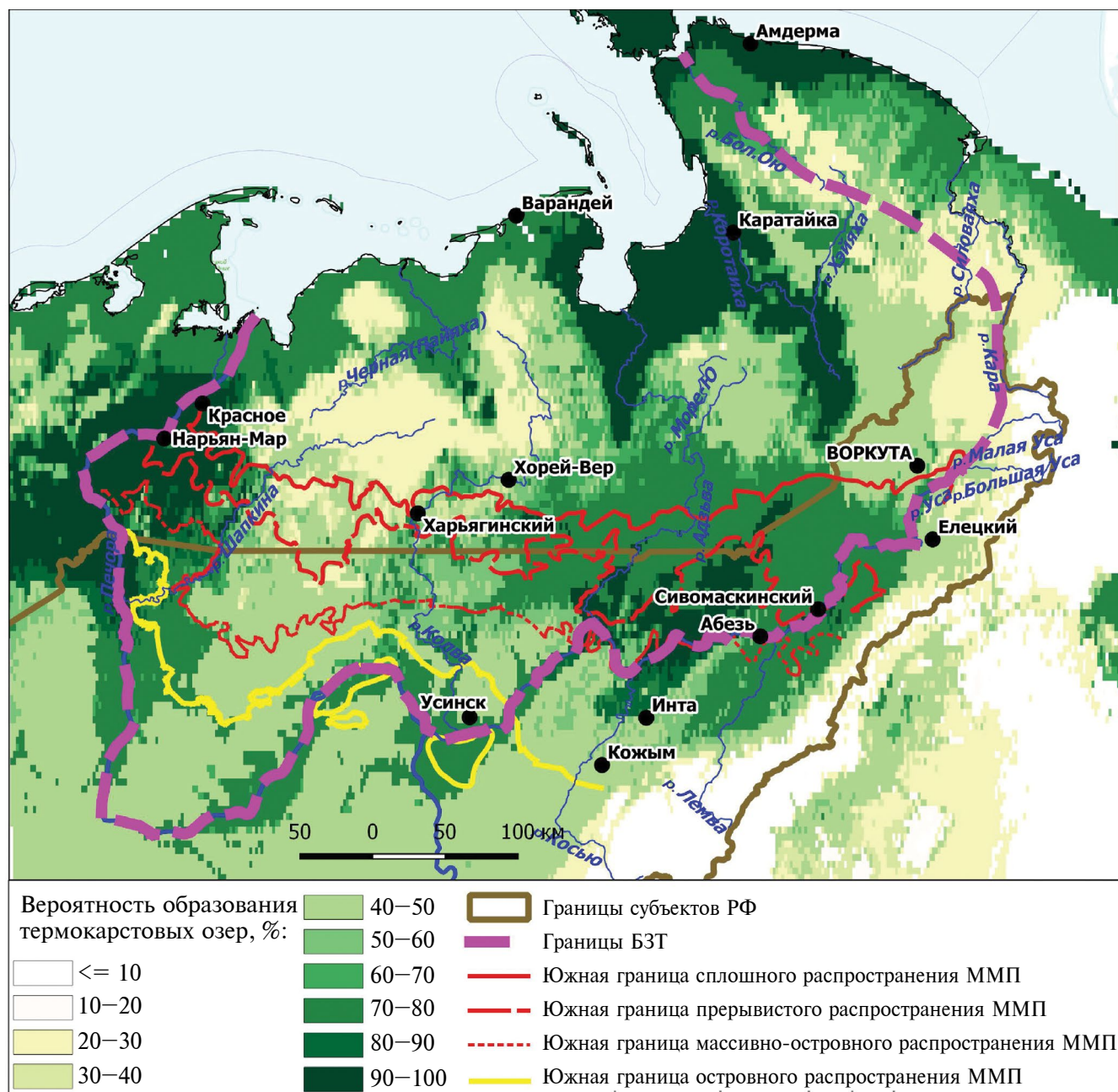


Рис. 1. ГИС-визуализация результатов ансамблевого прогнозирования вероятности развития термокарстовых озерных ландшафтов в 2040 г.

озерных термокарстовых ландшафтов в зонах современного островного, а также массивно-островного распространения ММП не вполне согласуется с существующей в представлении российских исследователей геоэкологической обстановкой.

Подобное несоответствие, по всей видимости, связано с тем, что подходы к картографированию геоэкологической зональности российских и зарубежных исследователей для изучаемого региона, а также представления о современных границах криолитозоны существенно отличаются. Так, при создании слоя термокарстовых ландшафтов северной бореальной и тундровой циркумполярной области распро-

странения ММП большая часть рассматриваемой территории была отнесена зарубежными исследователями (Olefelt et al., 2016) к зоне прерывистого распространения ММП с очень широким диапазоном современного уровня покрытия территории озерными термокарстовыми ландшафтами от 10 до 90%. Такой подход очевидно соответствует классификации, предложенной в 1990-е годы Дж. Брауном (Brown et al., 1997), которую, по мнению российских мерзлотоведов, можно считать слишком общей для Европейского северо-востока России и слабо отражающей специфику региональных причинно-следственных связей в системе климат–вечная мерзлота в пределах БЗТ. В тоже время при создании со-

временной геокриологической карты БЗТ использовалась традиционная для российского мерзловедения классификация геокриологической зональности (Достовалов, Кудрявцев, 1967; Общее ..., 1974), согласно которой борельная часть БЗТ (подзона южной лесотундры) относится российскими специалистами к зоне массивно-островного распространения ММП, где преобладают участки без мерзлоты, а следовательно на большей части территории практически отсутствуют природные (мерзлотные) предпосылки для формирования термокарстовых озер. По-разному также проводится российскими и зарубежными исследователями южная граница криолитозоны региона. Таким образом, расхождения в интерпретации особенностей современной геокриологической обстановки, заложенные во входные данные моделирования (Olefelt et al., 2016), с представлениями российских мерзловедов привели к появлению спорных результатов прогнозирования вероятности развития термокарстовых проявлений для ряда участков в пределах зоны массивно-островного и островного распространения ММП.

Интересным представляется также рассмотрение *результатов моделирования направленности развития термокарстовых озерных ландшафтов* на базе Biomod2 (алгоритм SRC — species range change) (см. рис. 2) с современной геокриологической картой БЗТ.

Фактически вся зона *современного сплошного распространения* по результатам моделирования на 2040 г. попадает либо в стабильную зону, где термокарстовые проявления будут протекать без изменений по сравнению с современной ситуацией, либо в зону, где будут протекать процессы дренирования и высыхания термокарстовых озер. Во втором случае при активизации процесса дренирования уже сформированных термокарстовых озер они будут превращаться в хасыреи (спущенные озера). Как только почти вся вода из хасырея уходит, как правило, с поверхности начинается процесс многолетнего промерзания. Это приводит к развитию процессов многолетнего пучения и постепенному промерзанию приповерхностного талого слоя, т.е. к формированию слоистой мерзлоты (Осадчая, 2021; Шполянская и др., 2022). Таким образом, несмотря на тренд климатического потепления, площадь мерзлоты с поверхности будет увеличиваться. Это может представлять угрозу для объектов нефтегазовой инфраструктуры. Случаи разрыва трубопроводов, проходящих по подобным участкам, уже отмечались на юго-востоке этой зоны.

На юг от современной границы сплошного распространения ММП согласно результатам моделирования территория фактически разбивается на 4 фрагмента.

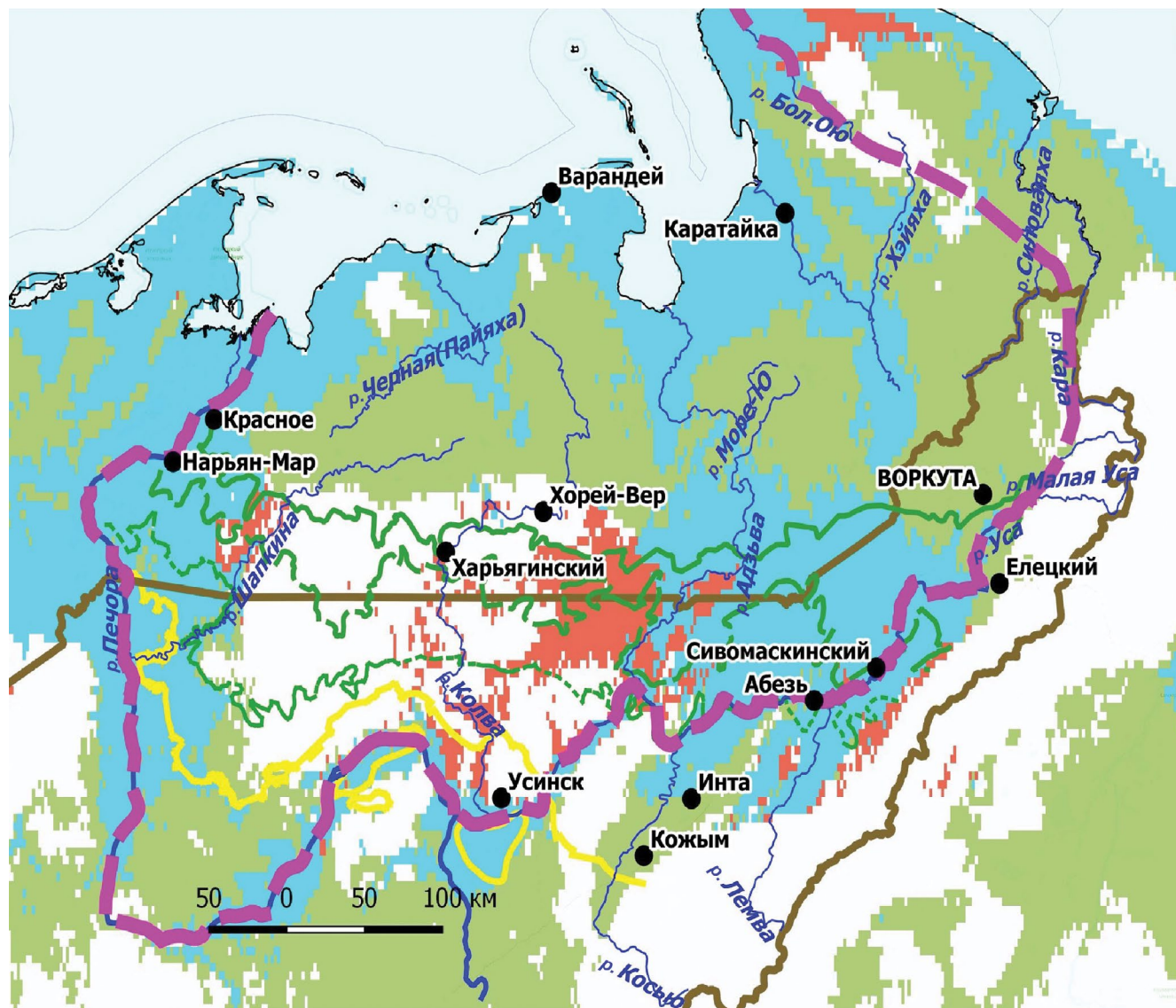
1. На востоке прогнозируется стабильное состояние без существенных изменений по сравнению с современной ситуацией.

2. На самом западе вдоль р. Печоры выделяется небольшой участок, где развитие термокарстовых процессов будет тоже протекать стабильно, т.е. так же, как и в настоящее время.

3. Восточнее, в пределах центральной части Большеземельского (Земляного) хребта в пределах северной лесотундры и более северных участков уже в южной тундре (сплошное распространение ММП), выделяется участок, где, как и в настоящее время, прогнозируется отсутствие процесса образования термокарстовых озер.

4. В центральной части прогнозируется небольшая зона возможного образования новых термокарстовых озер, захватывающая территории современной зоны сплошного распространения ММП (очень небольшой фрагмент), прерывистого и массивно-островного распространения ММП. По всей видимости, процессы увеличения степени заозеренности вполне возможны в зоне сплошной мерзлоты в полигональных торфяниках, так как таяние жильных льдов при потеплении приведет к термокарстовым просадкам и образованию озер (Shpolyanskaya, 2021). В зоне прерывистой мерзлоты незначительный рост площади озер может наблюдаться для уже существующих термокарстовых озер. Однако в зоне массивно-островного распространения ММП образование новых термокарстовых озер маловероятно, как и в пределах небольших выделившихся участков островного распространения мерзлоты.

Таким образом, можно предположить, что к 2040 г. наибольшую опасность с точки зрения хозяйственного освоения территории могут представлять районы в пределах зоны современного сплошного распространения ММП, где по результатам моделирования в 2040 г. прогнозируется дренирование и высыхание термокарстовых озер и, следовательно, формирование хасыреев. Проблемы могут возникать в связи с тем, что освоение территории в подзоне сплошной мерзлоты ориентируется на результаты предварительно проведенных инженерно-геологических изысканий. На момент изысканий под свежими хасырями при бурении до 10–12 м фиксируются талые породы. Соответственно, эти площади могут быть задействованы под строительство именно как талые участки. Через 10–15 лет, при прогнозируемом дренировании озер и формировании хасыреев, на этих участках могут начать развиваться процессы многолетнего пучения и промерзания грунтов. В результате, сооружения (как правило, линейные) могут прийти в негодность. Так, межпромысловые или внутрипромысловые нефтепроводы могут быть деформированы или разрушены, что может при-



Изменение распространения
термокарстовых озер к 2040 г. (алгоритм SRC)

- 2 (lost — дренирование и высыхание)
- 1 (pres — стабильное состояние без изменений)
- 0 (abs — отсутствие раньше и в 2040 г.)
- 1 (gain — образование новых в 2040 г.)
- Границы субъектов РФ
- Граница БЗТ
- Южная граница сплошного распространения ММП
- Южная граница прерывистого распространения ММП
- Южная граница массивно-островного распространения ММП
- Южная граница островного распространения ММП

Рис. 2. ГИС-визуализация результатов моделирования направленности развития термокарстовых озерных ландшафтов на базе Biomod2 с использованием алгоритма SRC (species range change).

водить к разливам нефти, ее попаданию на поверхность и далее в гидросеть. Подобные варианты развития событий уже имели место.

Сравнение результатов моделирования с *районами современного и перспективного развития нефтегазового комплекса* позволило выявить месторождения, максимально подверженные угрозе потенциального риска развития термокарста. Для этого специально подготовленный векторный слой, отражающий размещение и стадию освоения нефтяных и газоконденсатных месторождений БЗТ, был сопоставлен методом оверлея в ГИС QGIS с результатами моделирования. Результаты сопоставления были введены в атрибутивную таблицу слоя месторождений как принадлежность каждого из месторождений к той или иной зоне. Расчет числа месторождений разной стадии освоения в пределах зон разной направленности развития термокарстовых проявлений представлен в табл. 1.

Анализ карт и расчетной таблицы показал, что почти половина месторождений находится в пределах территорий, где хозяйственное освоение без особых мер предосторожности в будущем может приводить к неблагоприятным последствиям (Природные ..., 2000). Так, в районах возможного дренирования термокарстовых озер и превращения их в хасыреи находится более 26% всех месторождений. Около 20% всех месторождений находится в зонах возможной активизации термокарстовых проявлений и формирования новых озер. Причем большая часть месторождений, находящихся в зонах опасных для хозяйственного освоения, относится к категории разрабатываемых в настоящее время, планируемых или подготовленных к разработке.

Среди крупнейших эксплуатируемых месторождений, располагающихся в опасных для хозяйственного освоения зонах, следует отметить следующие, находящиеся в зоне возможного дренирования термокарстовых озер и образования хасыреев: Лавоажское, им. А.Н. Титова, Инзырейское и Ярейюское. В зонах возможной

активизации термокарстовых процессов и формирования новых озер расположены такие крупнейшие эксплуатируемые месторождения, как Сандивейское-I, Харьягинское и Северо-Мусюршорское. Все перечисленные месторождения располагаются в зонах сплошного и прерывистого распространения ММП согласно классификации В.Н. Достовалова и В.А. Кудрявцева (1967).

Таким образом, согласно полученным результатам прогнозного моделирования в 2040 г. в пределах БЗТ из 121 месторождения, находящихся сейчас на разных стадиях освоения, порядка 20 могут оказаться в зоне активизации термокарстовых проявлений и появления новых термокарстовых озер, а 32 попадают в зону, для которой будет характерно дренирование озерных термокарстовых ландшафтов, обсыхание озер и формирование хасыреев. В числе этих месторождений находятся крупнейшие на сегодняшний день нефтяные и газоконденсатные месторождения Европейской территории России.

Участки активизации термокарстовых проявлений, попадающие по результатам моделирования в пределы зон массивно-островного и островного распространения ММП, угрозы для хозяйственной инфраструктуры не представляют, поскольку в соответствии с существующей в представлении российских исследователей геокриологической обстановкой характеризуются отсутствием природных (мерзлотных) предпосылок для формирования термокарстовых озер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пространственно-временное прогнозное моделирование развития озерных термокарстовых ландшафтов на основе биоклиматических параметров с использованием метода ансамблевого машинного обучения на базе компьютерной платформы моделирования Biomod2 по-

Таблица 1. Расположение месторождений БЗТ в пределах зон прогнозируемого изменения термокарстовых озерных ландшафтов

Стадия освоения месторождения	Месторождения БЗТ (в числителе – общее число месторождений, в знаменателе – % от общего числа месторождений)			
	в эксплуатации	разведываемые	подготовленные к разработке	непромышленные или списанные
Зона прогнозируемого изменения термокарстовых озерных ландшафтов				
Дренирования и высыхания озер	17/25.37	15/31.91	0/0.00	0/0.00
Без изменений современного состояния	18/26.87	9/19.15	1/33.33	1/25.00
Образования новых озер	15/22.39	7/14.89	1/33.33	1/25.00
Отсутствие озер сейчас и в 2040 г.	14/20.90	11/23.40	1/33.33	1/25.00
Отсутствие данных	3/4.48	5/10.64	0/0.00	1/25.00

зволило получить результаты, пригодные для их дальнейшей визуализации и анализа в структуре геоинформационных пакетов, а также для создания соответствующих прогнозных карт регионального уровня.

Полученные карты в дальнейшем могут использоваться для оценки вероятности и направленности развития обусловленных климатическими изменениями термокарстовых проявлений на региональном уровне, а также для выявления и анализа потенциально возможных сопутствующих проблем мерзлотно-экологического характера и зон активизации термокарстовых процессов в районах хозяйственного освоения.

Так, анализ полученных на примере БЗТ результатов моделирования показал, что вероятность развития термокарстовых процессов в 2040 г. останется наиболее высокой в пределах азональных приморских ландшафтов на севере и вдоль нижнего течения р. Печоры. Предположительно, зона вероятной активизации термокарстовых проявлений частично сместится к северу. На севере зоны современного сплошного распространения мерзлоты к 2040 г. направленность развития термокарстовых озерных ландшафтов существенно не изменится. Однако на некоторых участках в ее южной части возможна активизация процессов дренирования термокарстовых озер и превращения их в хасыреи, что приведет к промерзанию приповерхностного талого слоя, формированию слоистой мерзлоты и, несмотря на тренд климатического потепления, увеличению площади мерзлоты. В центральной части БЗТ в зоне прерывистого распространения ММП выделяется участок возможного образования новых термокарстовых озер, хотя в целом в пределах зоны сохранится стабильная ситуация.

Прогнозируемое в результате моделирования развитие термокарстовых процессов в пределах небольших участков в зонах массивно-островного и островного распространения ММП маловероятно, в связи с преобладанием в настоящее время в их пределах территорий без мерзлоты и, следовательно, с отсутствием природных (мерзлотных) предпосылок для термокарстовых проявлений.

Сопоставление полученных результатов моделирования с районами хозяйственного освоения БЗТ показало, что в зоне возможной активизации термокарстовых проявлений (появления новых термокарстовых озер или дренирования озер и формирования хасыреев) в пределах зон сплошного и прерывистого распространения ММП находятся крупнейшие на сегодняшний день нефтяные и газоконденсатные месторождения Европейской территории России.

Достоверность полученных результатов моделирования может быть увеличена, если детали-

зировать входные данные в соответствии с традиционной для российского мерзловедения классификацией геокриологической зональности, в большей степени учитывающей специфику региональных геокриологических условий в пределах БЗТ (например, исключить из используемого в качестве входного слоя территории с незначительным по площади развитием ММП или их отсутствием согласно российской классификации). Достоверность результатов моделирования может быть существенно увеличена за счет улучшения пространственного разрешения входных данных, а также расширения числа используемых в модели биоклиматических переменных и большего числа используемых параметров неклиматического ряда, таких как фоновая температура многолетнемерзлых пород, глубина сезонного протаивания, льдистость грунтов, их теплофизические свойства, особенности растительного покрова и др. Интересным представляется расширение количества используемых алгоритмов моделирования из числа 10 встроенных в Biomod2. В дальнейшем также возможно применение методов глубокого обучения на основе материалов дистанционного зондирования Земли.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках темы НИР по Государственному заданию географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова №121051100162-6 и Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ имени М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”.

FUNDING

The study was carried out within the framework of the State Assignment of the Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University no. 121051100162-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Викторов А.С., Капралова В.Н., Архипова М.В. Моделирование развития морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин с использованием материалов дистанционных съемок // Исследование земли из космоса. 2019. № 2. С. 55–64.
- Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. М.: Недра, 1980. 383 с.
- Достовалов В.Н., Кудрявцев В.А. Общее мерзловедение: Учеб. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1967. 403 с.
- Зенгина Т.Ю., Осадчая Г.Г., Парада Н.Н. Биосферные функции криолитозоны Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции в условиях промыш-

- ленного освоения // Вестн. Рос. ун-та дружбы народов. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. Изд-во Российского университета дружбы народов. 2011. № 3. С. 32–38.
- Капранова В.Н., Викторов А.С. Количественные закономерности изменения размеров термокарстовых озер и оценка рисков // Сергеевские чтения. М.: ГЕОС, 2013. Вып. 15. С. 437–442.
- Качурин С.П. Термокарст на территории СССР. М., 1961. 291 с.
- Кирикова Н.С., Осадчая Г.Г. К вопросу о вероятности развития термокарста в Тимано-Печорской провинции // Инженерно-геологическое изучение термокарстовых процессов и методы управления ими при строительстве и эксплуатации сооружений (ИГК-98). СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1998. С. 32–35.
- Кравцова В.И. Распространение термокарстовых озер в России в пределах зоны современной мерзлоты // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2009. № 3. С. 33–42.
- Малкова Г.В., Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г. и др. Температурный режим верхних горизонтов пород в нарушенных и ненарушенных криогенных ландшафтах европейского севера: матер. V конф. геокриологов России. Ч. 6: Динамическая геокриология. Москва, 14–17 июня 2016 г. Сумы: Университетская книга, 2016. С. 63–69.
- Маслов А.Д., Осадчая Г.Г., Тумель Н.В., Шполянская Н.А. Основы геокриологии: Учеб. пособие. Ухта: Институт управления, информации и бизнеса, 2005. 176 с.
- Общее мерзловедение / под ред. П.И. Мельникова, Н.И. Толстихина. Новосибирск: Наука, Сибирское отд., 1974. 302 с.
- Осадчая Г.Г. Торфяники криолитозоны европейского северо-востока: зональные особенности развития // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике / под ред. В.П. Мельникова и М.Р. Садуртдинова. Салехард, 2021. С. 327–330.
- Осадчая Г.Г., Зенгина Т.Ю. Возможности сбалансированного использования биосферного и ресурсного потенциала Большеземельской тундры // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 2. С. 43–51.
- Осадчая Г.Г., Пижанкова Е.И. Мерзлотно-ландшафтные условия Большеземельской тундры и их картографирование на основе использования дистанционных данных // Криосфера Земли. 2023. Т. XXVII. № 6. С. 12–26.
- Осадчая Г.Г., Тумель Н.В., Королева А.М. Морфологическая структура криогенных ландшафтов Большеземельской тундры // Криосфера Земли. 2016. Т. XX. № 3. С. 14–23.
- Осадчая Г.Г., Тумель Н.В., Зенгина Т.Ю., Лаптева Е.М. Обзорная геокриологическая карта Большеземельской тундры (Республика Коми и Ненецкий автономный округ) М-6 1 : 1000000 // В рамках проекта ПРООН/ГЭФ/ЕС “Укрепление системы особо охраняемых природных территорий Республики Коми в целях сохранения биоразнообразия первичных лесов в районе верховьев р. Печора”, 2015. С. 1–112.
- Полищук В.Ю., Полищук Ю.М. Геоимитационное моделирование полей термокарстовых озер в зонах мерзлоты. Ханты-Мансийск: УИП ЮГУ, 2013. 129 с.
- Природные опасности России. Геокриологические опасности. М.: Изд-во фирма “Крук”, 2000. 315 с.
- Тумель Н.В., Зотова Л.И. Геоэкология криолитозоны: Учеб. пособие. М.: Географический фак-тет МГУ, 2014. 244 с.
- Фельдман Г.М. Термокарст и вечная мерзлота. Новосибирск: Наука, 1984. 261 с.
- Хабибуллин И.Л., Лобастова С.А., Хусаинова З.Р., Солдаткин М.В., Бураншина А.Р. Моделирование процесса термокарста // Вестн. Башкирского ун-та. 2007. № 1. С. 21–24.
- Шполянская Н.А., Осадчая Г.Г., Малкова Г.В. Современные изменения климата и реакция криолитозоны (на примере Западной Сибири и Европейского севера России) // Географическая среда и живые системы. 2022. № 1. С. 6–29.
<https://doi.org/10.18384/2712-7621-2022-1-6-30>
- Шур Ю.Л. Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст. Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1988. 213 с.
- Brown J., Ferrians O.J., Hegginkbottom J.A., Melnikov E.S. Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions. Map CP-45. In Circum-Pacific Map Series. Washington: U.S. Geological Survey, 1997.
<https://doi.org/110.3133/cp45>
- Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // Int. J. Climatol. 2017. Vol. 37. P. 4302–4315.
<https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Guisan A., Thuiller W., Zimmermann N. The Biomod2 Modeling Package Examples. In Habitat Suitability and Distribution Models: With Applications in R // Ecology, Biodiversity and Conservation. P. 357–400. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2017.
<https://doi.org/10.1017/9781139028271.027>
- Huang L., Liu L., Jiang L., Zhang T. Automatic Mapping of Thermokarst Landforms from Remote Sensing Images Using Deep Learning: A Case Study in the Northeastern Tibetan Plateau // Remote Sens. 2018. Vol. 10. 2067 p.
<https://doi.org/10.3390/rs1012206>
- Kuncheva L., Whitaker C. Measures of diversity in classifier ensembles // Machine Learning. 2003. Vol. 51. P. 181–207.
<https://doi.org/10.1023/A:1022859003006>
- Malkova G., Drozdov D., Vasiliev A., et al. Spatial and Temporal Variability of Permafrost in the Western Part of the Russian Arctic // Energies. 2022. Vol. 15. 2311 p.
<https://doi.org/10.3390/en15072311>
- Nitze I., Cooley S.W., Duguay C.R., Jones B.M., Grosse G. The catastrophic thermokarst lake drainage events of 2018 in northwestern Alaska: fast-forward into the future // The Cryosphere. 2020. Vol. 14. P. 4279–4297.
<https://doi.org/10.5194/tc-14-4279-2020>

- Olefelt D., Goswami S., Grosse G., Hayes D.J., Hugelius G., Kuhry P., Sannel B., Schuur E.A.G., Turetsky M.R. Arctic Circumpolar Distribution and Soil Carbon of Thermokarst Landscapes. 2015.
https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1332
- Opitz D., Maclin R. Popular ensemble methods: An empirical study // J. of Artificial Intelligence Res. 1999. Vol. 11. P. 169–198.
https://doi.org/10.1613/jair.614
- Popova A.A., Rivkin F.M., Ivanova N.V. Map of Engineering-Geocryological Zoning of European North-East, Scale 1 : 1000000 / 2nd European Conference on Permafrost. Potsdam, 2005. P. 190–191.
- Shpolianskaya N. Permafrost dynamics and Global Climate Change // Biodiversity and Ecosystem Insecurity. A Planet in Peril. London–Washington, DC: Earthscan, 2011. P. 130–140.
- Thuiller W., Lafourcade B., Engler R., Araujo M.B. BIOMOD—a platform for ensemble forecasting of species distributions // Ecography. 2009. Vol. 32. P. 369–373.
https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2008.05742.x
- Thuiller W., Georges D., Engler R. biomod2: Ensemble platform for species distribution modelling, 2014.
- Wood S.N. Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models // J. R. Stat. Soc. B. 2011. Vol. 73. P. 3–36.
https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2010.00749.x
- Yin G., Luo J., Niu F., et al. Machine learning-based thermokarst landslide susceptibility modeling across the permafrost region on the Qinghai-Tibet Plateau // Landslides. 2021. Vol. 18. P. 2639–2649.
https://doi.org/10.1007/s10346-021-01669-7
- Zengina T., Baranov V., Kirillov S., Slipenchuk M. Using Ensemble Machine Learning Methods for Regional Forecasting of Geocryological Manifestations (on the Example of the European North-East of Russia). In: Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems. Second International Conference, ITIDMS2022, Virtual Event, December 12–14, 2022, Revised Selected Papers / A. Gibadullin (Ed.). Cham: Springer, 2023.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-31353-0_10
- Ziehn T., Chamberlain M., Lenton A., Law R., Bodman R., Dix M., Mackallah Ch., Druken K., Ridzwan S.M. CSIRO ACCESS-ESM1.5 model output prepared for CMIP6 C4MIP // Earth System Grid Federation. 2019.
https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.2286

Geoinformation Modeling of Lake Thermokarst Landscapes of the Bolshezemelskaya Tundra to Predict Their Development under Climate Changes

T. Yu. Zengina^{a, *}, G. G. Osadchaya^{b, **}, and V. V. Baranov^{a, ***}

^aLomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^bUkhta State Technical University, Ukhta, Russia

*e-mail: tzengina@mail.ru

**e-mail: galgriosa@yandex.ru

***e-mail: bv2000rus@mail.ru

Using the Bolshezemelskaya tundra as an example, the experience of predictive modeling of thermokarst manifestations until 2040 is considered. The Biomod2 platform and ensemble modeling methods were used. Six WorldClim bioclimatic variables, the SRTM DEM, and a dataset on the distribution of thermokarst landscapes in the circumpolar permafrost zone from the project “Arctic Circumpolar Distribution and Soil Carbon of Thermokarst Landscapes” were used as input. The selection of the most important bioclimatic modeling parameters for the development of thermokarst is justified, and an algorithm for the pre-processing of initial raster and vector data is proposed. On the basis of four of the algorithms included in the Biomod2 platform, an ensemble modeling was carried out and the SRC algorithm was used. The results are visualized in two maps. The first map evaluates the probability of lake formation until 2040. The second map reflects the possible direction of the process with the assignment of 4 types of areas (1, there are no thermokarst lakes and will not be in 2040; 2, the state of lacustrine thermokarst landscapes will not change; 3, the formation of lakes will intensify; 4, lakes will drain and dry up). Analysis of the maps showed that a part of the zone of probable activation of thermokarst processes in 2040 will shift to the north and will remain highest for azonal coastal landscapes and along the lower course of the Pechora River. The direction of development of thermokarst lake landscapes in the north of the zone of modern continuous permafrost will not change significantly, however, in the south of this zone there are areas where thermokarst lakes will drain and turn into khasyreyes, which will lead to freezing of the near-surface thawed layer, formation of layered permafrost, and despite the trend of climate warming will lead to an increase in the area of permafrost. The predicted appearance of an area of activation of thermokarst manifestations in the subzone of sporadic permafrost north of the city of Inta is not consistent with the modern geocryological situation, which is obviously due to the underestimation of the geocryological features of the region by the authors of the project “Arctic Circumpolar Distribution and Soil Carbon of Thermokarst Landscapes.”

Keywords: Bolshezemelskaya tundra, thermokarst landscapes, climate changes, predictive modeling, ensemble methods of machine learning, oil and gas condensate fields

REFERENCES

- Brown J., Brown J., Ferrians O.J., Heggibottom J.A., Melnikov E.S. Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions. Map CP-45. In *Circum-Pacific Map Series*. Washington: U.S. Geological Survey, 1997. <https://doi.org/10.3133/cp45>
- Dostovalov V.N., Kudryavtsev V.A. *Obshchee merzlotovedenie: Uchebnik* [General Permafrost Science: Textbook]. Moscow: Izd-vo Mosk. Univ., 1967. 403 p.
- Fel'dman G.M. *Termokarst i vechnaya merzlota* [Thermokarst and Permafrost]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1984. 261 p.
- Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.*, 2017, vol. 37, pp. 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Grechishchev S.E., Chistotinov L.V., Shur Yu.L. *Kriogennye fiziko-geologicheskie protsessy i ikh prognoz* [Cryogenic Physical-Geological Processes and Their Forecast]. Moscow: Nedra Publ., 1980. 383 p.
- Guisan A., Thuiller W., Zimmermann N. The Biomod2 Modeling Package Examples. In *Habitat Suitability and Distribution Models: With Applications in R*. CUP, 2017, pp. 357–400. <https://doi.org/10.1017/9781139028271.027>
- Huang L., Liu L., Jiang L., Zhang T. Automatic Mapping of Thermokarst Landforms from Remote Sensing Images Using Deep Learning: A Case Study in the Northeastern Tibetan Plateau. *Remote Sens.*, 2018, vol. 10, no. 12, art. 2067. <https://doi.org/10.3390/rs10122067>
- Kachurin S.P. *Termokarst na territorii SSSR* [Thermokarst in the USSR]. Moscow, 1961. 291 p.
- Kapralova V.N., Viktorov A.S. Quantitative regularities of changes in the size of thermokarst lakes and risk assessment. In *Sergeevskie chteniya. Vyp. 15*. [Sergeyev Readings. Vol. 15]. Moscow: GEOS Publ., 2013, pp. 437–442. (In Russ.).
- Khabibullin I.L., Lobastova S.A., Khusainova Z.R., Soldatkin M.V., Buranshina A.R. Simulation of the thermokarst process. *Vestn. Bashkir. Univ.*, 2007, no. 1, pp. 21–24. (In Russ.).
- Kirikova N.S., Osadchaya G.G. On the question of the probability of thermokarst development in the Timan-Pechora province. In *Inzhenerno-geologicheskoe izucheniye termokarstovykh protsessov i metody upravleniya imi pri stroitel'stve i ekspluatatsii sooruzhenii (IGK-98)* [Engineering-Geological Study of Thermokarst Processes and Methods of Their Management During the Construction and Operation of Structures (IGK-98)]. St. Petersburg: VNIIG im. B.E. Vedeneva, 1998, pp. 32–35. (In Russ.).
- Kravtsova V.I. Distribution of thermokarst lakes in Russia within the modern permafrost zone. *Vestn. Mosk. Univ., Ser.5. Geogr.*, 2009, no. 3, pp. 33–42. (In Russ.).
- Kuncheva L., Whitaker C. Measures of diversity in classifier ensembles. *Mach. Learn.*, 2003, vol. 51, pp. 181–207. <https://doi.org/10.1023/A:1022859003006>
- Malkova G., Drozdov D., Vasiliev A., et al. Spatial and temporal variability of permafrost in the western part of the Russian Arctic. *Energies*, 2022, vol. 15, art. 2311. <https://doi.org/10.3390/en15072311>
- Malkova G.V., Sadurtdinov M.R., Skvortsov A.G., et al. Temperature regime of the upper horizons of rocks in disturbed and undisturbed cryogenic landscapes of the European North. In *Materialy V konf. geokriologov Rossii. Ch. 6: Dinamicheskaya geokriologiya. Moskva, 14–17 iyunya 2016 g.* [Proceedings of the 5th Conf. of Geocryologists of Russia. Part 6: Dynamic Geocryology. Moscow, June 14–17, 2016]. Sumy: Univ. Kniga Publ., 2016, pp. 63–69. (In Russ.).
- Maslov A.D., Osadchaya G.G., Tumel' N.V., Shpolyanskaya N.A. *Osnovy geokriologii: Uchebnoe posobie* [Fundamentals of Geocryology: Textbook.]. Ukhta: Inst. Upravl., Inform. Biznesa, 2005. 176 p.
- Nitze I., Cooley S.W., Duguay C.R., Jones B.M., Grosse G. The catastrophic thermokarst lake drainage events of 2018 in northwestern Alaska: fast-forward into the future. *Cryosphere*, 2020, vol. 14, pp. 4279–4297. <https://doi.org/10.5194/tc-14-4279-2020>
- Obshchee merzlotovedenie* [General Permafrost Science]. Melnikova P.I., Tolstikhina N.I., Eds. Novosibirsk: Nauka Publ., 1974. 302 p.
- Olefelt D., Goswami S., Grosse G., Hayes D.J., Hugelius G., Kuhry P., Sannel B., Schuur E.A.G., Turetsky M.R. *Arctic circumpolar distribution and soil carbon of thermokarst landscapes*, 2015. <https://doi.org/10.3334/ORNDAAC/1332>
- Opitz D., Maclin R. Popular ensemble methods: An empirical study. *J. Artif. Intell. Res.*, 1999, vol. 11, pp. 169–198. <https://doi.org/10.1613/jair.614>
- Osadchaya G.G., Tumel' N.V., Koroleva A.M. Morphological structure of cryogenic landscapes of the Bolshezemelskaya tundra. *Kriosf. Zemli*, 2016, vol. 20, no. 3, pp. 14–23. (In Russ.).
- Osadchaya G.G., Zengina T.Yu. Opportunities for balanced use of the biosphere and resource potential of the Bolshezemelskaya tundra. *Kriosf. Zemli*, 2012, vol. 16, no. 2, pp. 43–51. (In Russ.).
- Osadchaya G.G., Pizhankova E.I. Permafrost–landscape conditions of the Bolshezemelskaya tundra and their mapping based on remote sensing data. *Kriosf. Zemli*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 12–26. (In Russ.).
- Osadchaya G.G. Peatlands of the permafrost zone of the European northeast: zonal features of development. In *Sovremennyye issledovaniya transformatsii kriosfery i voprosy geotekhnicheskoi bezopasnosti sooruzhenii v Arktike* [Modern Research of the Transformation of the Cryosphere and Issues of Geotechnical Safety of Structures in the Arctic]. Melnikov V.P., Sadurtdinova M.R., Eds. Salekhard, 2021, pp. 327–330. (In Russ.).
- Osadchaya G.G., Tumel' N.V., Zengina T.Yu., Lapteva E.M. *Obzornaya geokriologicheskaya karta Bol'shezemel'skoi tundry (Respublika Komi i Nenetskii avtonomnyi okrug), M. 1 : 1000000* [Overview Geocryological Map of the Bolshezemelskaya Tundra (Republic of Komi and Nenets Autonomous Okrug), Scale 1 : 1 000 000], 2015. 112 p.

- Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M. *Geoimitatsionnoe modelirovanie polei termokarstovykh ozer v zonakh merzloty* [Geosimulation Modeling of Fields of Thermokarst Lakes in Permafrost Zones]. Khanty–Mansiisk: UIP YUGU, 2013. 129 p.
- Popova A.A., Rivkin F.M., Ivanova N.V. Map of Engineering–Geocryological Zoning of European North–East, Scale 1 : 1000000. In *2nd European Conference on Permafrost*. Potsdam, 2005, pp. 190–191.
- Prirodnye opasnosti Rossii. Geokriologicheskie opasnosti* [Natural Hazards of Russia. Geocryological Hazards]. Moscow: Kruk Publ., 2000. 315 p.
- Shpolianskaya N. Permafrost dynamics and Global Climate Change. In *Biodiversity and Ecosystem Insecurity. A Planet in Peril*. London, Washington: Earthscan, 2011, pp. 130–140.
- Shpolyanskaya N.A., Osadchaya G.G., Malkova G.V. Modern climate changes and permafrost response (on the example of Western Siberia and the European North of Russia). *Geograf. Sreda Zhivye Sist.*, 2022, no. 1, pp. 6–29. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18384/2712-7621-2022-1-6-30>
- Shur Yu.L. *Verkhnyy gorizont tolshchi merzlykh porod i termokarst* [Upper Horizon of Permafrost and Thermokarst]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1988. 213 p.
- Thuiller W., Lafourcade B., Engler R., Araujo M.B. BIOMOD—a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography*, 2009, vol. 32, pp. 369–373.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2008.05742.x>
- Thuiller W., Georges D., Engler R. *biomod2: Ensemble platform for species distribution modelling*, 2014.
- Tumel' N.V., Zotova L.I. *Geoekologiya kriolitozony: Uchebnoe posobie* [Geocology of Permafrost: Textbook]. Moscow: Geogr. Fakul. MGU, 2014. 244 p.
- Viktorov A.S., Kapralova V.N., Arkhipova M.V. Modeling the development of the morphological structure of erosion–thermokarst plains using remote sensing data. *Issled. Zemli Kosmosa*, 2019, no. 2, pp. 55–64. (In Russ.).
- Wood S.N. Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. *J. R. Stat. Soc. B.*, 2011, vol. 73, pp. 3–36.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2010.00749.x>
- Yin G., Luo J., Niu F., et al. Machine learning–based thermokarst landslide susceptibility modeling across the permafrost region on the Qinghai–Tibet Plateau. *Landslides*, 2021, vol. 18, pp. 2639–2649.
<https://doi.org/10.1007/s10346-021-01669-7>
- Zengina T.Yu., Osadchaya G.G., Parada N.N. Biospheric functions of the permafrost zone of the Timan–Pechora oil and gas province under conditions of industrial development. *Vestn. RUDN, Ser. Ekol. Bezopasn. Zhiznedeyat.*, 2011, no. 3, pp. 32–38. (In Russ.).
- Zengina T., Baranov V., Kirillov S., Slipenchuk M. Using ensemble machine learning methods for regional forecasting of geocryological manifestations (on the example of the European North–East of Russia). In *Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems. Second International Conference, ITIDMS2022, Virtual Event, December 12–14, 2022, Revised Selected Papers*. Gibadullin A., Ed. Cham: Springer, 2023.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-31353-0_10
- Ziehn T., Chamberlain M., Lenton A., Law R., Bodman R., Dix M., Mackallah Ch., Druken K., Ridzwan S.M. CSIRO ACCESS–ESM1.5 model output prepared for CMIP6 C4MIP. Version YYYYMMDD. Earth System Grid Federation, 2019.
<https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.2286>

ЛАНДШАФТЫ И ЭКОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ
МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

УДК 574.42

СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ДРЕВОСТОЕВ *PINUS SIBIRICA* DU TOUR
НА ВЕРХНЕМ ПРЕДЕЛЕ ИХ ПРОИЗРАСТАНИЯ
В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАТУНСКОГО ХРЕБТА (АЛТАЙ)
В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

© 2024 г. А. А. Григорьев¹*, С. О. Выхин¹, Ю. В. Шалаумова¹, Д. С. Балакин¹,
А. С. Тимофеев¹, А. М. Громов¹, Д. Ю. Голиков², Н. Ф. Низаметдинов¹, П. А. Моисеев¹

¹Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Ботанический сад УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: grigoriev.a.a@ipae.uran.ru

Поступила в редакцию 30.09.2023 г.

После доработки 06.12.2023 г.

Принята к публикации 16.05.2024 г.

Граница леса характеризуется высокой чувствительностью к изменениям климата. В этой связи мониторинг распределения лесопокрытых площадей на южной и северной границах леса в равнинных условиях, а также верхней и нижней границах леса в горных регионах является одним из наиболее простых и эффективных методов изучения реакции растительности на климатические изменения. В западной части Катунского хребта (Центральный Алтай) на основе использования классических методов дендрохронологии был установлен возраст 891 дерева *Pinus sibirica* Du Tour, произрастающих на разной высоте над уровнем моря. Сравнение высотного положения верхней границы древесной растительности по данным топографических карт 1956 г. и современных спутниковых снимков позволило установить скорость изменения лесопокрытых площадей в зависимости от наличия или отсутствия эдафических ограничений для успешного возобновления древесных видов. Показано, что, начиная со второй половины XX в., происходит интенсивная экспансия *Pinus sibirica* – наиболее распространенного в районе исследования древесного вида, в пояс горных лугов и тундр. Характер и темпы заселения древесной растительностью имеют значительные различия в зависимости от экспозиции склона и его гипсометрических характеристик. Наиболее тесные связи обнаружены между появлением кедра и климатическими показателями холодного периода (температурой и осадками), особенно это характерно для склонов северной и восточной экспозиций. Показано, что экспансии леса благоприятствовало общее изменение климатических условий в районе исследований.

Ключевые слова: верхняя граница древесной растительности, возрастная структура древостоев, топографические карты и спутниковые изображения, горы Южной Сибири

DOI: 10.31857/S2587556624030052 **EDN:** SOKVII

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Проблема современного изменения климата и его влияние на животный и растительный мир в настоящее время остро обсуждается в мировом научном сообществе (Büntgen et al., 2015; Chapin et al., 2005). Согласно данным последнего доклада МГЭИК (Climate ..., 2022), начиная с 1850 г. каждое из последних четырех десятилетий было более теплым по сравнению с любым предшествующим десятилетием. Масштабы происходящих изменений в глобальной климатической системе и показатели текущего состояния мно-

гих ее компонентов являются беспрецедентными для периодов от многих столетий до многих тысячелетий. Запасы снега и льда сократились, уровень моря повысился, удлинился вегетационный период (Climate ..., 2022).

Мониторинг распределения лесопокрытых площадей на южной и северной границах леса в равнинной местности, а также на верхней и нижней границах леса в горных регионах является одним из наиболее простых и эффективных методов изучения реакции растительности на климатические изменения (Горчаковский, Шиятов, 1985; Harsch et al., 2009). В горах значительно

легче проводить такой мониторинг, поскольку продвижение границы леса за столетие происходит на расстоянии сотен метров, на равнинах — сотен километров (Горчаковский, Шиятов, 1985). Горы являются своеобразной “ареной” приспособления древесных и кустарниковых видов к экстремальным условиям, растительность которых чутко реагирует на изменения условий среды (Holtmeier, 2009; Pauli et al., 2012). К настоящему времени накоплено большое количество доказательств того, что в последние десятилетия произошли сдвиги верхних пределов лесов во многих горных регионах планеты (Hansson et al., 2021; Harsch et al., 2009). Эти изменения способствовали увеличению площади высокогорных лесов и повышению углерод депонирующей функции высокогорных лесов, а также влияли на биоразнообразие регионов, в основном снижая его (Им, Харук, 2013; Körner, 2012; Pauli et al., 2012). Как правило, в данном контексте наибольший интерес представляют горные регионы, расположенные на севере: Скандинавия, Хибины, Полярный Урал, плато Путорана, Аляска, где влияние температуры на рост растений является наиболее выраженным (Kullman and Öberg, 2009; Mazepa, 2005). Эта связь проявляется в первую очередь в изменении радиального прироста (Ваганов и др., 1996), сезонном росте (Rossi et al., 2007) и специфике смещения границ ареалов деревьев вверх по склонам (Шиятов, 2009; Im and Kharuk, 2013). Однако, в центральной и восточной частях Евразии есть горные регионы, в которых до настоящего времени мониторинг верхней границы леса проводился либо эпизодически (локально), либо такие исследования не проводились, например, Кавказ, Алтай, Саяны, Становое нагорье и Алданское нагорье. Данные регионы имеют свои географические, геоморфологические, климатические различия, дифференциацию по составу доминирующих видов растений и другие особенности, отличные от более северных гор Субарктики и представляют значительный интерес для исследований.

Алтае-Саянская физико-географическая страна — горный регион с современным оледенением в центральной части евразийского континента, где в основном климат определяет высотное положение границы распространения древостоя (Volkov et al., 2021). Биогеографическая изоляция этих гор и особенно их расположение в окружении степей и полупустынь приводит к высокому уровню эндемизма и предполагает большое биоразнообразие и чувствительность региональной экосистемы к текущему периоду потепления климата (Volkov et al., 2021).

В ряде сценариев прогнозных оценок на конец XXI в. показано, что изменение климата в западной части Алтая будет продолжаться,

в частности, увеличиваться летняя и зимняя температуры воздуха, возрастет суммарное количество осадков зимнего периода, тогда как для летнего периода показаны разнонаправленные тренды изменения осадков (Третий ..., 2022). До недавнего времени этот регион привлекал исследователей в основном для оценки динамики баланса массы ледников (Паромов и др., 2018; Narozhniy and Zemtsov, 2011) и дендрохронологических (Jiao et al., 2021; Taynik et al., 2016) исследований на моренах ледников. Существенный вклад в решение проблемы динамики растительного покрова внесли Е.Е. Тимошок с коллегами-соавторами (Timoshok et al., 2016) и Е.В. Волков с соавторами (Volkov et al., 2021), проводившие исследования в долине р. Актру (Северо-Чуйский хребет). Эти работы в основном были направлены на выявление и описание феномена динамики растительности и объяснение их возможных причин.

В ряде недавних работ (Grigoriev et al., 2022; Moiseev et al., 2022) было показано, что в горах Субарктики, таких как Хибины и плато Путорана, одним из ключевых факторов, от которого зависит максимальная высота произрастания деревьев и скорость их продвижения вверх по склонам, является экспозиция склоновых поверхностей. Было показано, что наиболее интенсивное смещение древесной растительности в этих регионах происходит на более теплообеспеченных склонах с преимущественно южной экспозицией. В этой связи значительный интерес представляет изучение влияния экспозиции на особенности продвижения древесной растительности вверх по склонам в горах центральной части Евразии, где особенности воздействия климатических изменений на биоту могут иметь свою специфику в сравнении с северными регионами. Это может сказываться на видовом составе древесной растительности, ее распространении, а также специфике расселения по склонам гор. Алтае-Саянский регион в этом отношении является одним из малоизученных.

Цель работы — оценка современной экспансии *Pinus sibirica* Du Tour в западной части Катунского хребта (Алтай) и изучение влияния экспозиционного фактора в этом процессе.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Район исследований расположен в западной части Катунского хребта Центрального Алтая (рис. 1). Климат Алтая резко-континентальный и характеризуется чрезвычайным разнообразием в зависимости от высоты и географического положения местности. На климат оказывают влияние три основных фактора: внутриконтин-

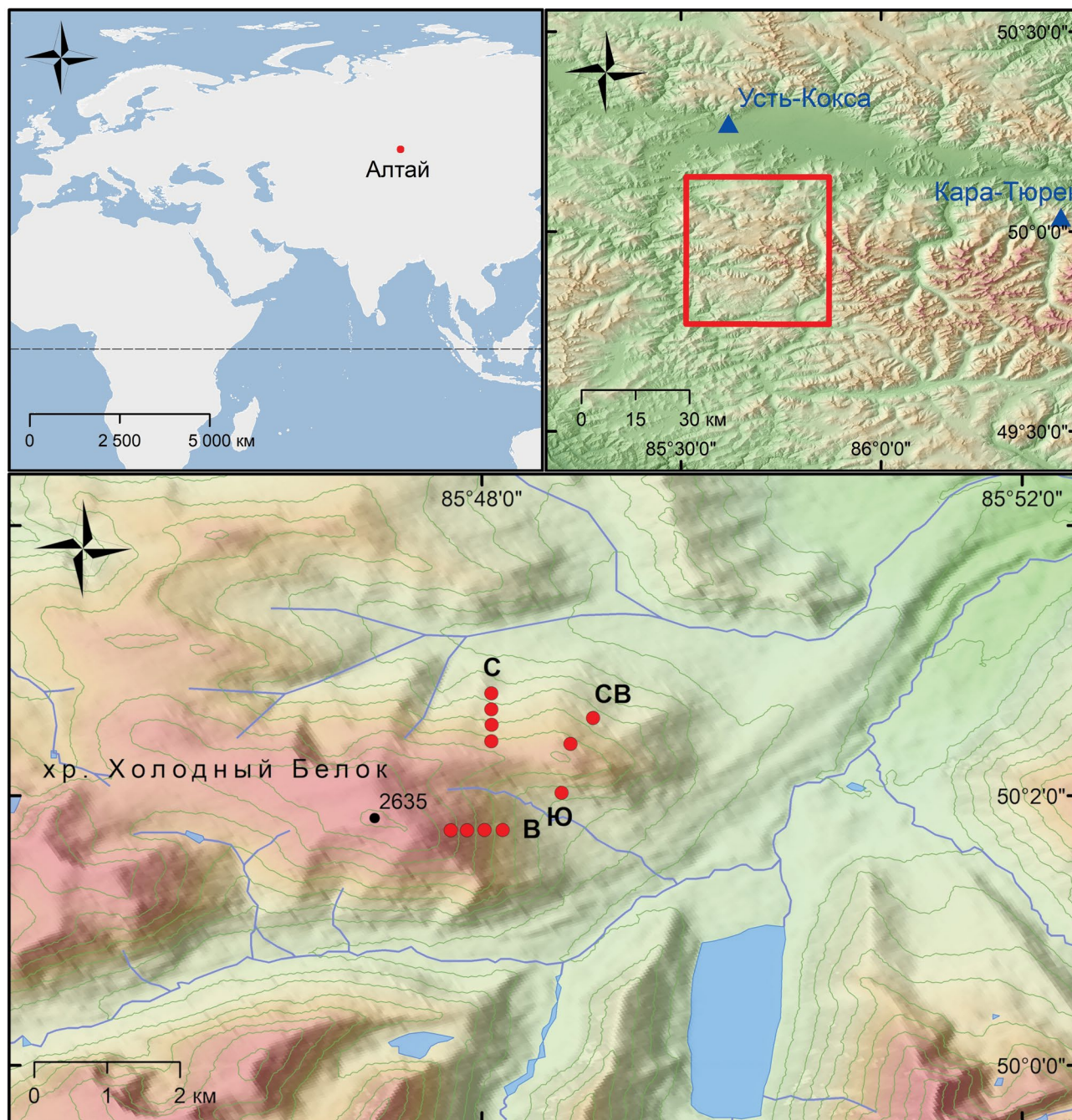


Рис. 1. Расположение района исследования на хр. Холодный Белок, Алтай (синими треугольниками отмечены метеостанции, красными кружками – высотные профили).

нентальное положение (значительное удаление от океана), господство западного переноса воздушных масс с Атлантики, влияние в зимнее время азиатского антициклона. Средние температуры июля составляют $16.2 \pm 1.2^\circ\text{C}$ для высоты 980 м (по данным метеостанции Усть-Кокса) и $7.1 \pm 1.3^\circ\text{C}$ для высоты 2600 м (по данным высокогорной метеостанции Кара-Тюрек); средние температуры января опускаются, соответственно, до $-20.9 \pm 3.8^\circ\text{C}$ и $-16.4 \pm 2.5^\circ\text{C}$. Температура воздуха в зимний период может опускаться ниже -42°C . Суммарное годовое количество осадков составляет 497 ± 98 мм на высоте 980 м

и 623 ± 90 мм на высоте 2600 м. Средние значения скорости ветра на этих высотных отметках составляют 2.8 и 8.6 м/с, зимой они могут достигать 50 м/с. Температура поверхности почвы на двух рассматриваемых метеостанциях в опускается в январе до -19.7 ± 6.5 и $-21.9 \pm 9.8^\circ\text{C}$ и повышается в июле до 20.9 ± 11.4 и $9.8 \pm 7.9^\circ\text{C}$. Высота снега в зимние месяцы на этих высотных отметках составляет 6–24 см и 2–11 см.

Верхняя граница леса здесь поднимается до 2200 м над ур. м., где ее формируют древесостой *Larix sibirica* Ledeb и *Pinus sibirica* Du Tour. Почвообразование на склонах хр. Холодный

Белок протекает на элюво-делювии и коллювии коренных пород — зеленокаменных, серо-зеленых, серых алевролитах и аргиллитах¹. В высокогорном поясе субальпийских и альпийских лугов на более теплых и увлажненных склонах южной и западной экспозиции широко распространены горно-луговые почвы, в то время как на более холодных — северных и восточных склонах (выше пояса альпийских лугов) площади горно-луговых почв существенно сокращаются и замещаются горно-тундровыми торфянистыми и перегнойными почвами.

1. Количественная оценка сдвига верхней границы распространения редколесий

Для северной части Катунского хребта (Холодный Белок) было проведено дешифрирование и выделение контуров растительных сообществ на современных спутниковых снимках Sentinel-2 (2018–2022 гг. съемки, каналы 1–12). Для анализа были использованы снимки середины вегетационного периода (июль–начало августа) и его окончания (начало сентября). В программе SAGA GIS была проведена процедура классификации без обучения, по алгоритму k-means, методом iterative minimum distance (MacQueen, 1967). В результате был получен растр, содержащий 14 неопределенных категорий наземных объектов. Далее была проведена векторизация растра, в результате чего получен векторный полигональный слой. Часть полигонов из этого слоя была использована в качестве эталонов для классификации с обучением в SAGA GIS. Результат позволил определить границы следующих категорий: водный объект, тень, сомкнутый лес, редколесье, редина, травянистая растительность на вершинах склонов, луг, кустарниковые заросли, скала, каменистая россыпь и горная тундра. Пиксели, отнесенные к древесной растительности, были конвертированы в слой точек, далее все точки были соединены линиями длиной ≤ 60 м при помощи триангуляции Делоне в QGIS. Этот линейный слой был конвертирован в единый полигон, ограничивающий зону распространения лесов и редколесий в настоящее время. Такой алгоритм позволил получить консолидированную границу древесной растительности.

Для изучаемых склонов на основании топографической карты масштаба 1 : 500 м был получен единый полигон границ лесов и редколесий для 60-х годов XX в. На основе привязанного растра топографической карты в SAGA GIS автоматически выделялись области с древесной растительностью. Далее по описанной выше методике была получена консолидиро-

ванная линия границы древостоев в виде полигона. Для определения значений сомкнутости древостоев, выделенных на топографических картах, на отдельных участках была проведена реконструкция этого параметра с помощью лидарной съемки и древесно-кольцевого анализа, в результате которого было получено значение 20–40%. Путем пересечения слоев лесов и редколесий разных временных интервалов был получен полигон сдвига верхней границы редколесий, используемый для расчета площади сдвига при исключении областей ≥ 1 га, не занятых деревьями. По спутниковым изображениям высокого разрешения из открытых источников (Google, ArcGIS MapServer) была проведена визуальная коррекция этого полигона с целью выделения современных границ древостоев с сомкнутостью $\geq 20\%$. По этим же снимкам были выделены полигоны областей, где предположительно на положение верхней границы редколесий влияли неблагоприятные почвенные условия (каменистые или избыточно увлажняемые участки, моренные отложения). Таким образом, вся исследуемая линия распространения редколесий дифференцировалась на два типа: климатическая (выше границы распространения редколесий есть все благоприятные почвенные условия для заселения древесных видов — тундры, луга) и эдафическая (выше линии распространения редколесий имеются неблагоприятные почвенные условия, сдерживающие возобновление древесных видов). Территории, подверженные выпасу скота в прошлом или настоящем, были исключены из анализа. По цифровой модели рельефа (SRTM, разрешение 30 м/пиксель) происходило разделение на макросклоны по преобладающей экспозиции: юго-восток, юг, юго-запад, запад, северо-запад, север, северо-восток, восток (рис. 2). Цифровая модель рельефа использовалась для получения высотных отметок вдоль выделенных границ. Для расчета продвижения редколесий по высоте линии их верхней границы распространения в 1960-х и 2020-х годах, они были преобразованы в слой точек с интервалом 12 м. В атрибуты этого слоя из соответствующих растров и полигонов при помощи модуля Point Sampling Tool в QGIS была включена информация об экспозиции макросклона, влиянии почвенных условий, высоте над уровнем моря. Далее были проведены расчеты медианы для высотного расположения верхней границы редколесий в начале и конце анализируемого периода для склонов разных экспозиций и с учетом участков, различных по почвенным условиям. Также были рассчитаны горизонтальные и площадные сдвиги верхней границы редколесий.

¹ <https://www.geolokarta.ru> (дата обращения 03.07.2023).

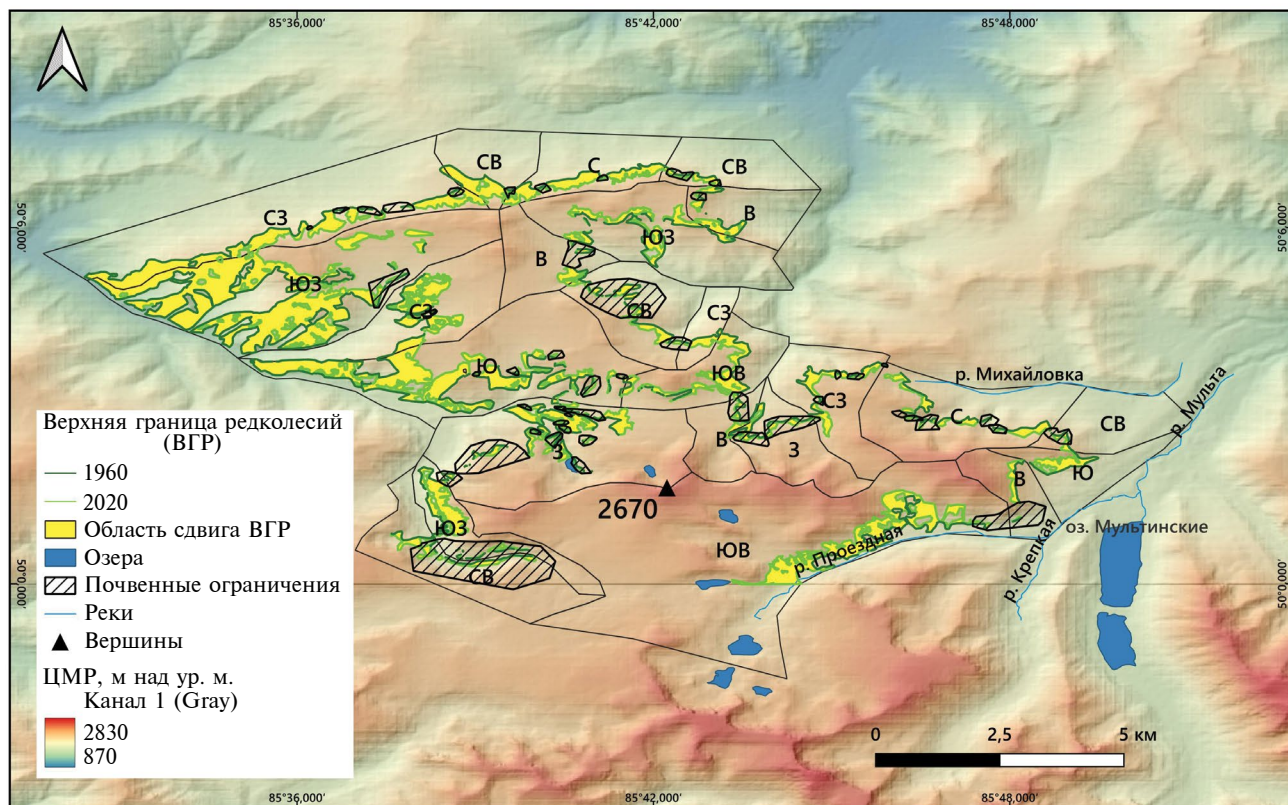


Рис. 2. Карта-схема изменения высотного и пространственного положения верхней границы редколесий (ВГР) в восточной части хр. Холодный Белок в 1960 и 2020 гг.

2. Морфологическая и возрастная структура древостоев

В период с 2021 по 2022 г. на хр. Холодный Белок было заложено 4 высотных профиля на склонах четырех экспозиций (восточный, северный, северо-восточный и южный), не имеющих значительных различий по крутизне и не включающих участки каменистых россыпей на месте произрастания древесной растительности. На каждом склоне было заложено от 1 до 4 высотных уровней, в зависимости от наличия древостоев определенной сомкнутости. Главным критерием при выделении высотных уровней являлись высота произрастания древостоев и сомкнутость крон. На восточном и северном склонах фиксировалось 4 высотных уровня: “1 уровень” – на границе отдельных деревьев в тундре, “2 уровень” – на границе распространения редин, “3 уровень” – у верхней границы распространения редколесий, “4 уровень” – у верхней границы распространения сомкнутых лесов. На северо-восточном склоне фиксировались: “уровень 1” – на границе отдельных деревьев в тундре и “уровень 3” – на границе распространения редколесий. На южном склоне фиксировался только один уровень – “3” (верхняя граница распространения редколесий). На каждом высотном уровне было заложено от 3 до 8 пробных круговых площадей размером 0.0227 га. На высотных профилях северной и се-

веро-восточной экспозиции в живом напочвенном покрове доминируют кустарники и мхи в верхней части профиля, на восточном профиле – кустарники и травянистые растения, на южном профиле – травянистые растения.

На каждой пробной площади фиксировалось точное местоположение каждого дерева, диаметр у основания, диаметр на высоте 1.3 м, диаметр кроны в двух взаимно перпендикулярных направлениях, возраст, высота и жизненное состояние (Grigoriev et al., 2022). Возраст деревьев определялся путем взятия радиальных кернов древесины у основания ствола дерева с последующей их обработкой в лабораторных условиях. Керны древесины были наклеены на деревянные основы и зачищены опасным лезвием. Для лучшей визуализации годичных колец керны были пигментированы зубным порошком. Все образцы были измерены на полуавтоматической установке Lintab 5 с точностью до 0.01 мм. Дальнейшая обработка проводилась согласно общепринятым методам дендрохронологии (Шиятов и др., 2000). Для выявления ложных и выпадающих колец была построена обобщенная древесно-кольцевая хронология для района исследований, в сравнении с которой проводилась датировка индивидуальных древесно-кольцевых хронологий. С целью определения поправки на высоту бурения были исследованы ход роста деревьев в молодом возрасте. При обследовании радиальных кернов древесины, спи-

Таблица 1. Сдвиг верхней границы редколесий на хр. Холодный Белок (Алтай) за период 1956–2020 гг.

Тип верхней границы распространения редколесий	Экспозиция	Уклон, градусы	Высотное положение (медиана), м над ур. м.		Сдвиг			
			1956	2020	высотный, м	высотный, м/10 лет	горизонтальный, м	горизонтальный, м/10 лет
Климатическая	С	35	1971.5	2117.5	146.1	24.3	177.3	29.5
	СВ	18	2032.8	2082.7	49.9	8.3	102.5	17.1
	В	18	2055.6	2098.7	43.1	7.2	87.2	14.5
	ЮВ	27	1982.3	2085.1	102.8	17.1	90.1	15.0
	Ю	28	1924.6	1946.1	21.5	3.6	75.1	12.5
	ЮЗ	21	1799.1	2055.8	256.6	42.8	141.4	23.6
	З	14	1997.6	2017.6	20.0	3.3	86.8	14.5
	СЗ	24	2024.7	2103.6	78.9	13.1	172.2	28.7
	Среднее	23	1973.5	2063.4	89.9	15.0	116.6	19.4
Эдафическая	С	35	2027.6	2068.1	40.5	6.7	43.9	7.3
	СВ	18	2004.1	2038.0	33.9	5.6	56.3	9.4
	В	18	1998.9	2061.3	62.5	10.4	59.3	9.9
	ЮВ	27	1861.0	1985.7	124.7	20.8	38.6	6.4
	Ю	28	2082.3	2101.3	19.0	3.2	31.0	5.2
	ЮЗ	21	1969.6	1995.0	25.4	4.2	33.2	5.5
	З	14	2035.1	2057.5	22.3	3.7	36.7	6.1
	СЗ	24	2025.6	2031.3	5.8	1.0	30.2	5.0
	Среднее	23	2000.5	2042.3	41.8	7.0	41.2	6.9

лов деревьев, а также визуальном осмотре стволов деревьев было установлено, что исследуемые древостои за последние 500 лет не подвергались интенсивным пожарам, так как следы от повреждения пожаром отсутствовали. В общей сложности были определены морфометрические параметры 1316 деревьев, возраст установлен для 891 дерева на общей площади 1.14 га. В настоящем исследовании приводятся данные по наиболее распространенному древесному виду в районе исследования — кедру сибирскому (*Pinus sibirica*). Также на исследованных участках склонов преимущественно в виде отдельных деревьев встречается лиственница сибирская (*Larix sibirica*).

3. Климатические данные и статистический анализ

Оценка климата в районе исследования проводилась по данным о средней температуре воздуха и количестве осадков на двух метеостанциях горного Алтая: Усть-Кокса (синоптический индекс 36229, расположение 50°16' с.ш., 85°37' в.д., 977 м над ур. м.) и Кара-Тюрек (синоптический индекс 36442, расположение 50°02' с.ш., 86°27' в.д., 2601 м над ур. м.)². Для анализа данных о температуре воздуха и количестве осадков было выбрано на-

чало лета (с июня по июль) и холодный период (с ноября по март). Аномалии средней температуры воздуха и суммарного количества осадков за теплый и холодный периоды каждого года определялись через разность между текущим значением и средним значением в базовом периоде (1961–1990 гг.). При анализе метеопараметров значения были сгруппированы по пятилетиям, для которых вычислялось среднее, дальнейшая оценка проводилась на основе моделей линейной регрессии. Также были проанализированы связи между количеством появившихся деревьев кедра за пятилетие и средним пятилетним значением климатических параметров (температуры, осадков, высоты снежного покрова, продолжительности солнечного сияния) с помощью непараметрического коэффициента корреляции Спирмена (Rs), поскольку распределения данных отличались от нормального закона по критерию Шапиро–Уилка.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Количественная оценка сдвига верхней границы распространения редколесий

На участках с климатическим типом верхней границы редколесий средний сдвиг по высоте на хр. Холодный Белок составляет 15.0 м/10 лет, горизонтальный сдвиг — 19.4 м/10 лет (см. рис. 2, табл. 1).

² <http://meteo.ru/data> (дата обращения 17.08.2023).

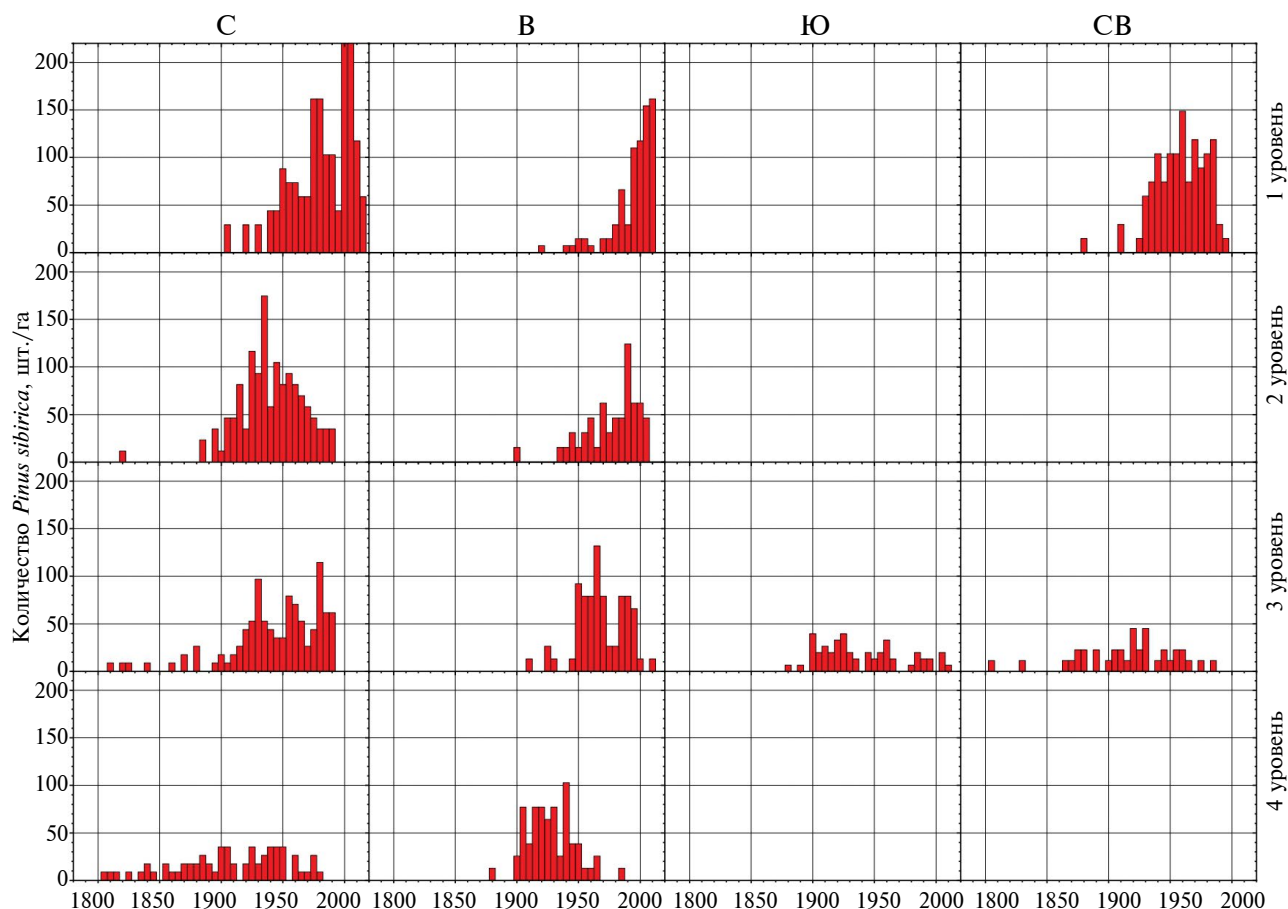


Рис. 3. Распределение количества деревьев кедра сибирского по периодам его появления на заложенных высотных профилях.

Сравнительный анализ экспансии древостоев на склонах разной экспозиции показал, что наиболее заметный высотный сдвиг 42.8 м/10 лет произошел на юго-западном макросклоне, наибольший горизонтальный сдвиг — на северном и северо-западном направлениях (29.5 и 28.7 м/10 лет соответственно). На участках, где продвижение верхней границы редколесий может быть ограничено каменистыми почвами или избыточным увлажнением (эдафический тип), средний сдвиг по высоте составляет 7.0 м/10 лет, горизонтальный сдвиг — 6.9 м/10 лет. При дифференциации по экспозициям максимальный высотный сдвиг 20.8 м/10 лет произошел на юго-восточном макросклоне, наибольший горизонтальный сдвиг 9.9 м/10 лет отмечается на восточном макросклоне.

2. Морфологическая и возрастная структура древостоев

Представленные в табл. 2 данные свидетельствуют о том, что на исследованных высотных профилях наблюдается закономерное изменение в сторону уменьшения в 1.5–3 раза средних морфометрических и площадных показателей древостоев кедра. Так, если средний диаметр дерева на высоте 1.3 м на нижнем уровне восточ-

ного профиля составляет 15.3 см (при среднем возрасте 91 год), то на верхнем уровне он равен 5.8 см (средний возраст 28 лет). Площадь проективного покрытия крон на восточном профиле уменьшается с повышением высотного положения в 15 раз, на северном — в 6 раз. Особое внимание обращает на себя закономерное уменьшение среднего возраста исследованных древостоев по мере продвижения в верх по склону, обуславливающее ухудшение условий для роста. Данные табл. 2 демонстрируют, что в зависимости от экспозиции склона наблюдаются различия в максимальной высоте произрастания древостоев, а также в площади, занимаемой различными по сомкнутости древостоями на изученных участках. Максимальной высоты достигают древостои, произрастающие на восточном склоне, тогда как для южного склона отмечаются минимальные высотные позиции экотона верхней границы леса, и древостои являются более разреженными.

Анализ представленных на рис. 3 данных свидетельствует о том, что заселение восточного склона кедром началось только в конце XIX в. на нижнем высотном уровне. На высотных уровнях 1, 2 и 3 деревья стали появляться только в 1920-х годах. Чем ниже высота над ур. м., тем раньше

Таблица 2. Средние морфометрические и площадные показатели древостоев кедров сибирского на высотных профилях

Профиль и уровень	Экспозиция	Высота, м над ур. м.	Диаметр на высоте 1,3 м, см	Высота ствола, м	Возраст, лет		Диаметр кроны, м	Площадь проективного покрытия кроны, м²/га	Густота, шт./га	
					Средний	Максимальный			<1.5 м	≥1.5 м
1_1	В	2290	5.8 ± 2.9	2.4 ± 0.7	28 ± 18	96	1.7 ± 0.5	500	470	191
1_1	В									
1_2	В	2230	7.4 ± 5.2	3.6 ± 1.5	38 ± 22	116	2.0 ± 0.9	1046	154	529
1_2	В									
1_3	В	2170	12.7 ± 8.2	5.5 ± 2.7	48 ± 18	104	2.8 ± 1.3	3001	55	760
1_3	В									
1_4	В	2110	15.3 ± 8.8	9.8 ± 4.5	91 ± 19	137	3.4 ± 1.5	7610	0	881
1_4	В									
2_1	С	2120	3.9 ± 2.4	2.1 ± 0.5	37 ± 23	110	1.6 ± 0.6	1395	1894	646
2_1	С									
2_2	С	2090	6.6 ± 4.5	3.5 ± 1.8	74 ± 26	171	1.8 ± 1.1	4813	220	1806
2_2	С									
2_3	С	2060	8.2 ± 5.5	4.4 ± 2.7	76 ± 36	210	1.9 ± 0.9	3639	414	1057
2_3	С									
2_4	С	2030	24.6 ± 23.9	8.4 ± 5.4	187 ± 140	575	3.2 ± 2.0	8511	476	775
2_4	С									
3_3	Ю	2050	23.9 ± 14.2	7.8 ± 3.6	80 ± 28	130	3.9 ± 1.9	4923	11	325
3_3	Ю									
4_1	СВ	2120	4.2 ± 2.7	2.3 ± 0.6	59 ± 20	105	1.4 ± 0.5	1204	954	675
4_1	СВ									
4_3	СВ	2080	16.5 ± 11.9	6.4 ± 2.9	91 ± 32	166	2.9 ± 1.3	3348	319	440
4_3	СВ									

происходил период массового заселения восточного склона кедром, в частности, всплеск появления деревьев на верхнем высотном уровне охватывает период с 1995 по 2015 г., когда появилось 72% существующих особей. На северном склоне заселение кедром происходило по иному сценарию. Первые деревья на данном склоне стали появляться еще в середине XV в. на нижнем высотном уровне. На высотных уровнях “4”, “3” и “2” отдельные деревья заселялись в течение всего XIX в. без явных пиков их численности. В целом, наиболее массовые периоды пополнения деревьев наблюдаются на протяжении XX в., однако раньше на 30–40 лет по сравнению с восточным склоном. На северо-восточном склоне в пределах высотного уровня “3” первые деревья стали появляться в XVII в., далее весь XIX и XX вв. пополнение кедром было поступательным без явных пиков численности. На верхнем высотном уровне

массовое заселение деревьев происходило после 1930-х годов и продолжается по настоящее время. На южном склоне основной период массового заселения деревьев произошел в период с 1900 по 1940-е годы.

3. Климатические данные и статистический анализ

Анализ метеорологических данных в районе исследования показал, что климат стал более теплым, при этом наиболее заметные изменения произошли в предгорной части Алтая по сравнению с ее высокогорной областью (рис. 4). Увеличение средней годовой температуры воздуха на метеостанции Усть-Кокса (980 м над ур. м.) составляло 3.0°C/100 лет ($R^2 = 0.75$, $p < 0.001$), тогда как аналогичный показатель для высокогорной метеостанции Кара-Тюрек (2600 м над ур. м.) принимает значение 2.2°C/100 лет

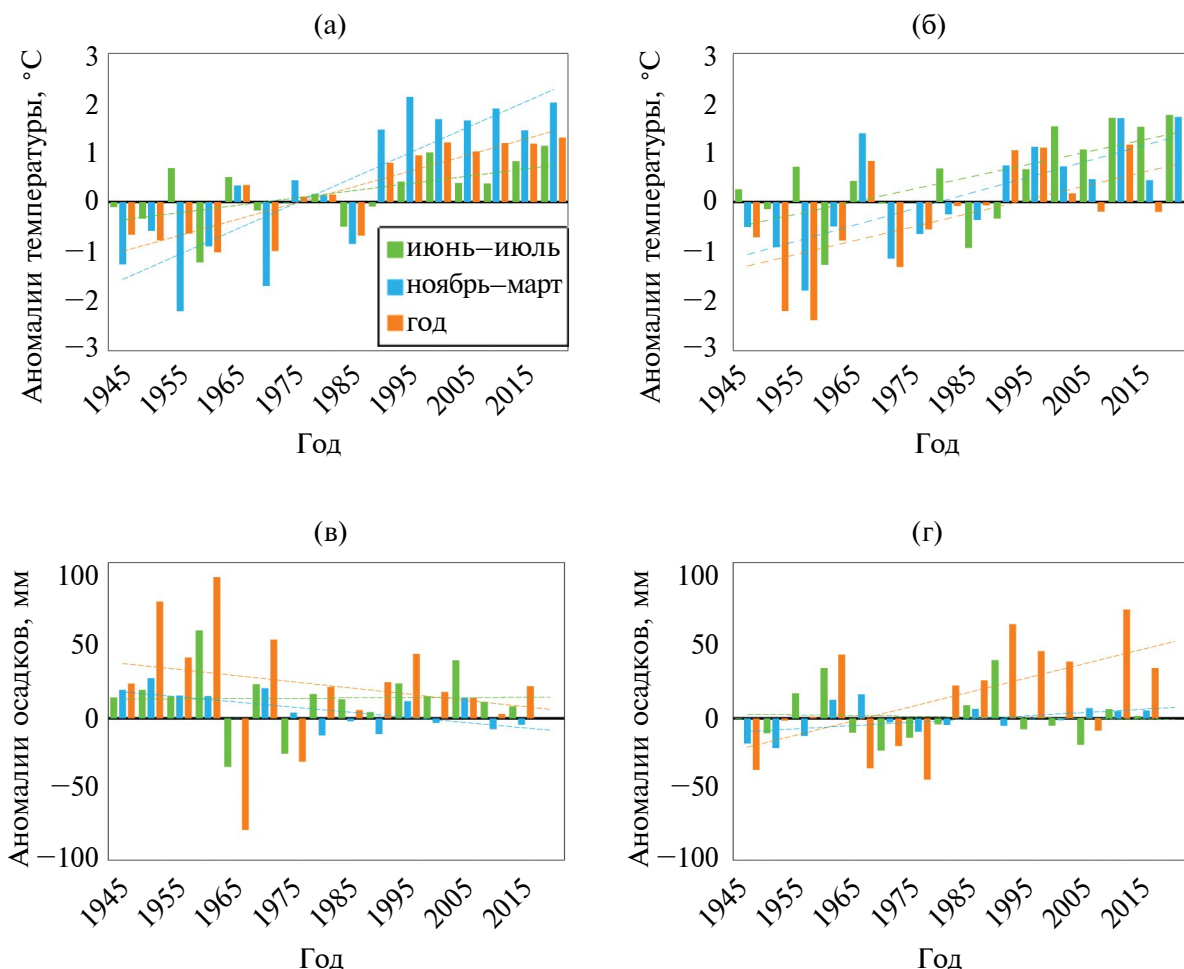


Рис. 4. Временные ряды аномалий средней температуры воздуха и суммарных осадков на метеостанциях Усть-Кокса (а, в) и Кара-Тюрек (б, г). Пунктирной линией обозначен линейный тренд.

($R^2 = 0.38$, $p < 0.011$). Увеличение средней температуры воздуха в период ноябрь–март по данным метеостанции Усть-Кокса было в 2 раза выше, чем по данным метеостанции Кара-Тюрек, тренды потепления на которых составляют $5.1^\circ\text{C}/100$ лет ($R^2 = 0.71$, $p < 0.001$) и $2.7^\circ\text{C}/100$ лет ($R^2 = 0.52$, $p = 0.002$). В холодный период года температура менялась более быстрыми темпами в сравнении с теплым сезоном. Кроме того, для теплого периода отмечена обратная тенденция больших значений скорости потепления на большей высотной отметке, составивших на этих метеостанциях $1.5^\circ\text{C}/100$ лет ($R^2 = 0.34$, $p = 0.019$) и $2.1^\circ\text{C}/100$ лет ($R^2 = 0.42$, $p = 0.006$) соответственно. Уменьшение суммарных осадков на 36.0 мм/100 лет ($R^2 = 0.39$, $p = 0.002$) выявил анализ данных холодного периода для метеостанции Усть-Кокса.

Корреляционный анализ показал наличие наиболее тесных связей между количеством появившихся деревьев на восточном склоне хребта Холодный Белок и климатическими показателями температуры приземного воздуха и суммарных осадков (табл. 3). Максимальные положительные

корреляции отмечаются для связи между появлением кедров и температурой холодного периода на первом и втором высотном уровнях склонов северной и восточной экспозиции ($R_s = 0.72$), так же, как и наибольшие по модулю отрицательные значения коэффициента корреляции, но уже для средней и нижней частей экотона верхней границы леса (R_s принимает значения до -0.73). Таким образом, по мере увеличения высоты над ур. м. для этих параметров можно проследить тенденцию изменения отрицательных корреляций на положительные, также отмечаемую для температуры теплого периода, но менее выраженную.

Противоположный тренд выявлен для связи между осадками холодного периода и появлением кедров, при котором максимальные положительные корреляции отмечаются на нижних высотных уровнях (для северного и восточного склона значения R_s составляют 0.46 и 0.68), и с продвижением вверх по склону значения коэффициента корреляции уменьшаются, а для северного и восточного склонов знак меняется на противоположный (R_s составляют -0.58 и -0.64 соответственно).

Таблица 3. Коэффициенты корреляции Спирмена для связи между количеством появившихся деревьев кедра сибирского и климатическими параметрами метеостанции Усть-Кокса в холодном (ноябрь—март) и теплом (июнь—июль) периодах

Высотный уровень	Экспозиция	Температура		Осадки	
		Холодный период	Теплый период	Холодный период	Теплый период
1	С	0.38	0.14	−0.58	−0.01
	В	0.72	0.46	−0.64	−0.13
	СВ	−0.46	−0.34	0.06	−0.42
	Все	0.38	0.21	−0.70	−0.35
2	С	−0.73	−0.48	0.63	0.17
	В	0.72	0.18	−0.26	−0.02
	Все	−0.25	−0.32	0.48	0.20
3	С	−0.39	−0.56	0.11	0.07
	В	−0.29	0.01	0.18	0.08
	СВ	−0.6	−0.4	0.39	0.14
	Ю	0.08	−0.05	0.03	−0.09
	Все	−0.39	−0.32	0.24	0.03
4	С	−0.71	−0.21	0.46	−0.1
	В	−0.72	−0.35	0.68	0.11
	Все	−0.19	−0.30	−0.11	−0.17

Примечание. Корреляции были рассчитаны для данных, сгруппированных по пятилетним периодам, за период 1940–2010 гг. Коэффициенты корреляции на уровне значимости $p < 0.05$ выделены жирным шрифтом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты проведенных исследований убедительно подтверждают, что в западной части Алтайских гор на хр. Холодный Белок на рубеже последних двух столетий происходила интенсивная экспансия кедра сибирского в горные луга и тундры. Наиболее активно этот процесс происходил во второй половине XX в. и продолжается в настоящее время. Доказательством этого являются различия в распределении лесопокрываемых площадей на топографических картах 60-х годов XX в. и современных спутниковых изображениях, а также закономерное уменьшение среднего возраста и морфометрических параметров древостоя по мере продвижения вверх по склонам. Установлено, что на хр. Холодный Белок наибольшей высоты верхняя граница леса достигает на склонах северных экспозиций (2117 м над ур. м.), а наименьшей — на южной (1946 м над ур. м.). Результаты исследования возрастной и морфологической структуры древостоев в экотоне верхней границы древесной растительности также свидетельствуют, что на склонах, ориентированных в южном направлении, продвижение кедра вверх по склону происходило менее интенсивно относительно других склонов. Здесь в настоящее время древесная растительность, которая по сомкнутости отно-

сятся больше к редколесьям, заселяется в виде отдельных островков леса преимущественно вдоль скал. Причем этот процесс относительно других участков склонов здесь начался относительно недавно (старые деревья отсутствуют). Это связано с тем, что в зависимости от экспозиции существуют различия по теплообеспеченности и инсоляции склонов. Наибольшее количество солнечной энергии поступает на склонах южной экспозиции, где, судя по данным о возрастной структуре и смещении верхней границы редколесий, затруднено заселение и выживание молодого поколения и взрослых деревьев. Вероятно, здесь быстрее сходит снежный покров и условия в начале периода вегетации более засушливые. Также возможным затруднением облесения данных участков склонов может являться сильно развитая луговая растительность, вызывающая задержание. Таким образом, если в горах Субарктики России (плато Путорана, Хибины) наибольшая высота верхней границы древесной растительности и наибольшее возобновление наблюдаются на склонах более теплообеспеченных — южных экспозиций (Grigoriev et al., 2019; Moiseev et al., 2022), то в горах юга России (на Алтае) отмечается противоположная закономерность — чем больше тепла, тем менее выражено происходит смещение древесной рас-

тительности вверх по склонам и тем меньших высот достигает верхняя граница их распространения. Подобная закономерность отмечается в горах южной части Южного Урала (Gaisin et al., 2020), также характеризуемых крайней неравномерностью распределения лесопокрытых площадей — склоны южных экспозиций либо безлесны, либо граница распространения деревьев на них располагается значительно ниже других склонов. Причем в последние десятилетия на фоне изменения климатических условий и отсутствия пожаров установлено активное возобновление подроста сосны обыкновенной на этих участках склонов. Аналогичный процесс наблюдается в Крыму (хр. Хыр-Аланский и хр. Абдуга) и в горах юга Сахалина (южная часть Западно-Сахалинских гор). Известно, что экспозиция склона может оказывать влияние на ветровой режим (Holtmeier and Broll, 2010), тепловой режим в течение вегетационного периода (Shrestha et al., 2015), начало вегетационного периода из-за большего прогревания стволов деревьев весной (Rossi et al., 2007), начало таяния снега весной (Körner, 2012), а также на степень минерализации азота в почве (Sturm et al., 2005). В условиях северных горных территорий большее количество солнечной радиации и более теплые условия могут повысить приживаемость саженцев деревьев и молодняков и развитие деревьев в целом (Körner, 2012). В лесах средних широт на северо-западе Британской Колумбии затененные склоны, ориентированные на север, показали более низкую продуктивность, чем те, что расположены на более солнечных и теплых склонах, ориентированных на юг (Kuyek and Thomas, 2019). На юго-западе Юкона (Канада), граница распространения деревьев *Picea glauca* продвигалась быстрее по склонам, ориентированным на юг, чем на север (Danby and Hik, 2007). Однако на южных склонах Алтая, который находится в центральной части Евразии, наблюдается противоположная ситуация. Кроме того, на границе леса в штате Невада *Pinus monophylla* показывала меньшие приросты и образовывала меньшие трахеиды в самых сухих местах (Ziaco et al., 2014). В работе Cazolla с соавт. (2019) отмечается, что на высокогорных участках в районе ледника Актру, где не было зафиксировано ни одного дерева, значительная часть дневной поверхности представлена лугами с высоким уровнем биологического разнообразия.

Значительный высотный и горизонтальный сдвиг на склонах северной экспозиции возможно обусловлен тем, что данные участки получают меньше солнечной радиации. По этой причине они не испытывают недостатка влаги. Это обеспечивает более благоприятные условия для древесной растительности на северных склонах,

чем на более освещенных южных. Подобная ситуация наблюдается в Монголии, где древесная растительность распространена только на северных склонах гор (Klinge et al., 2018). Большой вертикальный сдвиг на склонах юго-западной экспозиции можно объяснить тем, что эти склоны имеют небольшую крутизну, достаточно большое количество каменистых участков, где древесная растительность успешно конкурирует с травянистой. Внутри сдвига на юго-западных склонах на каменистых участках в прошлом присутствовало большое количество одиночных деревьев — семенников. В благоприятных условиях они могли обеспечить значительное продвижение древесной растительности в вертикальном и горизонтальном направлении. Минимальные значения сдвигов на склонах западной экспозиции можно объяснить сочетанием малой инсоляции и пологостью склона, что способствует переувлажнению почв.

Выявленные нами различия на разных высотах над ур. м. в возрастной структуре исследованных древостоев кедра хорошо согласуются с другими исследованиями в горах Алтая. Например, на основе анализа возрастной структуры ранее было установлено смещение древостоев кедра и лиственницы вдоль высотного градиента в долине ледника Актру, причем кедр сибирский возобновлялся успешнее по сравнению с лиственницей (Timoshok et al., 2016). Cazolla с соавт. (2019) установили, что в этом же районе на больших высотах растут только молодые деревья, и зафиксировали относительно быстрое смещение вверх по склону древесной растительности. За последние 52 года линия границы распространения отдельных деревьев продвинулась примерно на 150 м вверх, и скорость перемещения ускорялась до недавнего времени.

Мы предполагаем, что наблюдаемые в течение последних столетий (особенно во второй половине XX в.) изменения в распределении лесопокрытых площадей, реди́н, и отдельных деревьев в тундре на склонах различной экспозиции, вероятно, могут быть обусловлены общим изменением условий произрастания растительности в районе исследования. Это, в первую очередь, объясняется изменениями в приземной температуре воздуха и режиме выпадения атмосферных осадков. За последние 80 лет произошло повышение температуры воздуха как зимнего, так и летнего периодов. Однако режим выпадения атмосферных осадков изменился в противоположную сторону — в предгорной части Алтая произошло значимое уменьшение осадков холодного периода, то есть климат стал более теплым и засушливым. Полученные данные о связи между появлением деревьев кедра и климатическими параметрами свидетельству-

ют, что на большей части высотных уровней существует значимая связь между появлением деревьев и повышением температуры, и снижением осадков холодного периода. Причем чем выше расположены площадки в экотоне верхней границы леса (и меньше сомкнутость древостоя), тем сильнее проявляется положительная корреляция с температурой воздуха и отрицательная — с осадками холодного периода. Данное обстоятельство может быть обусловлено тем, что общая аридизация климата, которая наблюдается в регионе, возможно, неблагоприятно сказывается на возобновлении древесной растительности в экотоне верхней границы леса. Причем, во всем мире сдвиги линии роста деревьев вверх чаще происходили в регионах, где зимой наблюдались изменения в снежном режиме (Harsch et al., 2009). Аналогичные связи были получены и для кустарниковой растительности в горах Урала (Grigoriev et al., 2021). Уменьшение осадков в холодный период особенно чувствительно для выживания подростка на вернем высотном уровне, где наблюдается минимальная мощность снежного покрова, защищающего от ветрового воздействия. Данные, полученные в долине ледника Актру (Cazolla et al., 2019) показали, что повышение температуры воздуха в течение последнего столетия может оказать двойное воздействие на горные леса: на участке исследования рост деревьев снизился в последние годы, а верхняя граница распространения деревьев поднялась на 150 м выше по склону и это произошло всего за 50 лет (после 1960-х годов), но с небольшим сдвигом вниз в течение последнего десятилетия (после 2000-х годов). Вероятно, если бы климат не становился более засушливым, то продвижение древостоев кедра происходило более быстрыми темпами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние столетия происходила интенсивная экспансия кедра сибирского в горные тундры и луга (в пределах изучаемой территории). В зависимости от экспозиции склона этот процесс происходил по-разному — значительное продвижение леса в горы отмечается на склонах восточной и северной экспозиций, наименьшее — на южных. Во второй половине XX в. древесная растительность наиболее интенсивно распространялась вверх по склону. Экспансии леса благоприятствовало общее изменение климатических условий в районе исследований. Настоящее исследование вносит вклад в формирование глобальной картины изменения древесной растительности и высотного положения верхней границы леса в горных регионах, а также может служить основой для создания моделей трансформаций природной

среды в горах Алтая при различных сценариях изменения климата в будущем.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет средств РНФ (проект № 21-14-00137).

FUNDING

The study was carried out with financial support from the Russian Science Foundation, project no. 21-14-00137.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазена В.С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск: Наука, 1996. 247 с.
- Горчаковский П.Л., Шиятов С.Г. Фитоиндикация условий среды и природных процессов в высокогорьях. М.: Наука, 1985. 208 с.
- Им С.Т., Харук В.И. Климатически индуцированные изменения в экотоне альпийской лесотундры плато Путорана // Исследование Земли из космоса. 2013. № 5. 32 с.
<https://doi.org/10.7868/S0205961413040052>
- Паромов В.В., Нарожный Ю.К., Шантыкова Л.Н. Оценка современной динамики и прогноз гляциологических характеристик ледника Малый Актру (Центральный Алтай) // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 2. С. 171–182.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-2-171-182>
- Третий оценочный докл. об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / отв. ред. В.М. Катцов. СПб.: Научные технологии, 2022. 676 с.
- Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазена В.С., Наурызбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии: учебно-методическое пособие. Ч. 1. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. Красноярск: КрасГУ, 2000. 81 с.
- Шиятов С.Г. Динамика древесной и кустарниковой растительности в горах Полярного Урала под влиянием современных изменений климата. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 216 с.
- Büntgen U., Hellmann L., Tegel W., Normand S., Myers-Smith I., Kirilyanov A.V., Nievergelt D., Schweingruber F.H. Temperature-induced recruitment pulses of Arctic dwarf shrub communities / J. of Ecol. 2015. Vol. 103. № 2. P. 489–501.
<https://doi.org/10.1111/1365-2745.12361>
- Cazzolla G.R., Callaghan T., Velichevskaya A., Dudko A., Fabbio L., Battipaglia G., Liang J. Accelerating upward treeline shift in the Altai Mountains under last century climate change // Scientific Reports. 2019. Vol. 9. Art. 7678.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-44188-19>
- Chapin F.S., Sturm M., Serreze M.C., McFadden J.P., Key J.R., Lloyd A.H., McGuire A.D., Rupp T.S., Lynch A.H., Schimel J.P., et al. Role of land-surface

- changes in arctic summer warming // *Science*. 2005. Vol. 310. № 5748. P. 657–660.
<https://doi.org/10.1126/science.1117368>
- Climate Change, 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Univ. Press, 2022. 3056 p.
- Danby R.K., Hik D.S. Variability, contingency and rapid change in recent Subarctic alpine tree line dynamics // *J. of Ecol.* 2007. Vol. 95. № 2. P. 352–363.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01200.x>
- Gaisin I.K., Moiseev P.A., Makhmutova I.I., Nizametdinov N.F., Moiseeva O.O. Expansion of tree vegetation in the forest–mountain steppe ecotone on the Southern Urals in relation to changes in climate and habitat moisture // *Russ. J. Ecol.* 2020. № 4. P. 251–264.
<https://doi.org/10.1134/S1067413620040074>
- Grigoriev A.A., Devi N.M., Kukarskikh V.V., Vyukhin S.O., Galimova A.A., Moiseev P.A., Fomin V.V. Structure and dynamics of tree stands at the upper timberline in the western part of the Putorana plateau // *Russ. J. Ecol.* 2019. № 4. P. 243–254.
<https://doi.org/10.1134/S1067413619040076>
- Grigoriev A.A., Shalaumova Y.V., Balakin D.S. Current Expansion of *Juniperus sibirica* Burghd. to the Mountain Tundras of the Northern Urals // *Russ. J. Ecol.* 2021. № 52. P. 376–382.
<https://doi.org/10.1134/S1067413621050076>
- Grigoriev A.A., Shalaumova Y.V., Vyukhin S.O., Balakin D.S., Kukarskikh V.V., Vyukhina A.A., Camarero J.J., Moiseev P.A. Upward Treeline Shifts in Two Regions of Subarctic Russia Are Governed by Summer Thermal and Winter Snow Conditions // *Forests*. 2022. Vol. 13. № 2. Art. 174.
<https://doi.org/10.3390/f13020174>
- Hansson A., Dargusch P., Shulmeister J. A review of modern treeline migration, the factors controlling it and the implications for carbon storage // *J. Mt. Sci.* 2021. № 18. P. 291–306.
<https://doi.org/10.1007/s11629-020-6221-1>
- Harsch M.A., Hulme P.E., McGlone M.S., Dunca R.P. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming // *Ecol. Lett.* 2009. № 12. P. 1040–1049.
<https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01355.x>
- Holtmeier F.-K. Mountain Timberlines: Ecology, Patchiness, and Dynamics. Advanced Global Change Resource. Berlin–Heidelberg: Springer, 2009. 438 p.
- Holtmeier F.K., Broll G. Wind as an Ecological Agent at Treelines in North America, the Alps, and the European Subarctic // *Phys. Geogr.* 2010. Vol. 31. № 3. P. 203–233.
<https://doi.org/10.2747/0272-3646.31.3.203>
- Jiao L., Chen K., Liu X., Qi C., Xue R. Comparison of the response stability of Siberian larch to climate change in the Altai and Tianshan // *Ecological Indicators*. 2021. Vol. 128. № 107823.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107823>
- Klinge M., et al. Climate effects on vegetation vitality at the treeline of boreal forests of Mongolia // *Biogeosciences*. 2018. Vol. 15. № 5. P. 1319–1333.
<https://doi.org/10.5194/bg-15-1319-2018>
- Körner C. Alpine treelines. Functional Ecology of the Global High Elevation Tree Limits. Berlin: Springer, 2012. 220 p.
- Kullman L., Öberg L. Post-little ice age treeline rise and climatic warming in the Swedish Scandes: A landscape ecological perspective // *J. of Ecol.* 2009. № 97. P. 415–429.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01488.x>
- Kuyek N.J., Thomas S.C. Trees are larger on south slopes in late-seral conifer stands in northwestern British Columbia // *Can. J. For. Res.* 2019. Vol. 49. № 11. P. 1349–1356.
<https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0089>
- MacQueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations // *Proc. 5th Berkeley Symp. on Math. Statistics and Probability* / L.M. Le Cam, J. Neyman (Ed.). 1967. P. 281–297.
- Mazepa V.S. Stand density in the last millennium at the upper tree-line ecotone in the Polar Urals Mountains // *Can. J. For. Res.* 2005. № 35. P. 2082–2091.
<https://doi.org/10.1139/x05-111>
- Moiseev P.A., Hagedorn F., Balakin D.S., Bubnov M.O., Devi N.M., Kukarskih V.V., Mazepa V.S., Vyukhin S.O., Vyukhina A.A., Grigoriev A.A. Stand biomass at treeline ecotone in Russian subarctic mountains is primarily related to species composition but its dynamics driven by improvement of climatic conditions // *Forests*. 2022. Vol. 13. № 2. Art. 254.
<https://doi.org/10.3390/f13020254>
- Narozhniy Y., Zemtsov V. Current State of the Altai Glaciers (Russia) and Trends Over the Period of Instrumental Observations 1952–2008 // *AMBIO*. 2011. № 40. P. 575–588.
<https://doi.org/10.1007/s13280-011-0166-0>
- Pauli H., Gottfried M., Dullinger S., et al. Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits // *Science*. 2012. Vol. 336. № 6079. P. 353–355.
<https://doi.org/10.1126/science.1219033>
- Rossi S., Deslauriers A., Anfodillo T., Carraro V. Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes // *Oecologia*. 2007. № 152. P. 1–12.
<https://doi.org/10.1007/s00442-006-0625-7>
- Shrestha K.B., Hofgaard A., Vandvik V. Recent treeline dynamics are similar between dry and mesic areas of Nepal, central Himalaya // *J. Plant Ecol.* 2015. Vol. 8. № 4. P. 347–358.
<https://doi.org/10.1093/jpe/rtu035>
- Sturm M., Schimel J., Michaelson G., Welker J.M., Oberbauer S.F., Liston G.E., Fahnestock J., Romanovsky V.E. Winter biological processes could help convert arctic tundra to shrubland // *BioScience*. 2005. Vol. 55. № 1. P. 17–26.
[https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2005\)055\[0017:WBPCHC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055[0017:WBPCHC]2.0.CO;2)

- Taynik A.V., Barinov V.V., Oidupaa O.Ch., Myglan V.S., Reinig F., Buntgen U. Growth coherency and climate sensitivity of *Larix sibirica* at the upper treeline in the Russian Altai Sayan Mountains // *Dendrochronologia*. 2016. Vol. 39. P. 10–16.
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.12.003>
- Timoshok E.E., Timoshok E.N., Nikolaeva S.A., Savchuk D.A., Filimonova E.O., Skorokhodov S.N., Bocharov A.Yu. Monitoring of high-altitude terrestrial ecosystems in the Altai Mountains // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2016. Vol. 48. № 012008.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/48/1/012008>
- Volkov I.V., Zemtsov V.A., Erofeev A.A., Babenko A.S., Volkova A.I., Callaghan T.V. The dynamic land-cover of the Altai Mountains: Perspectives based on past and current environmental and biodiversity changes // *Ambio*. 2021. № 50. P. 1991–2008.
<https://doi.org/10.1007/s13280-021-01605-y>
- Ziaco E., Biondi F., Rossi S., Deslauriers A. Climatic influences on wood anatomy and tree-ring Features of great basin conifers at a new mountain Observatory // *Appl. Plant Sci*. 2014. Vol. 2. № 10. Art. 1400054.
<https://doi.org/10.3732/apps.1400054>

Structure and Dynamics of *Pinus sibirica* Du Tour Forest Stands at the Upper Limit of Their Growth in the Western Part of the Katunsky Range (Altai) under Climate Change

A. A. Grigoriev^{a,*}, S. O. Vyukhin^a, Y. V. Shalaumova^a, D. S. Balakin^a, A. C. Timofeev^a,
 A. M. Gromov^a, D. Y. Golikov^b, N. V. Nizametdinov^a, and P. A. Moiseev^a

^a*Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia*

^b*Botanical Garden, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia*

*e-mail: grigoriev.a.a@ipae.uran.ru

The forest boundary is characterized by being highly sensitive to climate change. In this regard, monitoring the distribution of forested areas on the southern and northern boundaries of the forest in lowland conditions, as well as the upper and lower boundaries of the forest in mountainous regions, is one of the simplest and most effective methods for studying the response of vegetation to climate change. In the western part of the Katun Range (Central Altai), based on the use of classical dendrochronological methods, the age of 891 *Pinus sibirica* Du Tour trees growing at different altitudes above sea level was established. Comparison of the altitudinal position of the upper limit of tree vegetation according to topographic maps of 1956 and modern satellite images made it possible to establish the rate of change in forested areas depending on the presence or absence of edaphic restrictions for the successful regeneration of tree species. It is shown that, starting from the second half of the 20th century. There is an intensive expansion of *Pinus sibirica*, the most common tree species in the study area, into the belt of mountain meadows and tundras. The nature and rate of colonization by woody vegetation vary significantly depending on the exposure of the slope and its hypsometric characteristics. The closest connections were found between the appearance of cedar and climatic indicators of the cold period (temperature and precipitation), this is especially typical for slopes with northern and eastern exposures. It was shown that the expansion of the forest was favored by a general change in climatic conditions in the study area.

Keywords: upper treeline, age structure of forests, topographic maps, satellite images, mountains of Southern Siberia

REFERENCES

- Büntgen U., Hellmann L., Tegel W., Normand S., Myers-Smith I., Kirdyanov A.V., Nievergelt D., Schweingruber F.H. Temperature-induced recruitment pulses of Arctic dwarf shrub communities. *J. Ecol.*, 2015, vol. 103, no. 2, pp. 489–501.
<https://doi.org/10.1111/1365-2745.12361>
- Cazzolla G.R., Callaghan T., Velichevskaya A., Dudko A., Fabbio L., Battipaglia G., Liang J. Accelerating upward treeline shift in the Altai Mountains under last century climate change. *Sci. Rep.*, 2019, vol. 9, art. 7678.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-44188-1>
- Chapin F.S., Sturm M., Serreze M.C., McFadden J.P., Key J.R., Lloyd A.H., McGuire A.D., Rupp T.S., Lynch A.H., Schimel J.P., et al. Role of land-surface changes in arctic summer warming. *Science*, 2005, vol. 310, no. 5748, pp. 657–660.
<https://doi.org/10.1126/science.1117368>
- Danby R.K., Hik D.S. Variability, contingency and rapid change in recent Subarctic alpine tree line dynamics. *J. Ecol.*, 2007, vol. 95, no. 2, pp. 352–363.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01200.x>
- Gaisin I.K., Moiseev P.A., Makhmutova I.I., Nizametdinov N.F., Moiseeva O.O. Expansion of tree vegetation in the forest–mountain steppe ecotone on the

- Southern Urals in relation to changes in climate and habitat moisture. *Russ. J. Ecol.*, 2020, no. 4, pp. 251–264.
<https://doi.org/10.1134/S1067413620040074>
- Gorchakovskiy P.L., Shiyatov S.G. *Fitoindikatsiya uslovii sredi i prirodnkh protsessov v vysokogor'yakh* [Phytoindication of Environmental Conditions and Natural Processes in High Mountain Regions]. Moscow: Nauka Publ., 1985. 208 p.
- Grigoriev A.A., Devi N.M., Kukarskikh V.V., V'yukhin S.O., Galimova A.A., Moiseev P.A., Fomin V.V. Structure and dynamics of tree stands at the upper timberline in the western part of the Putorana plateau. *Russ. J. Ecol.*, 2019, no. 4, pp. 243–254.
<https://doi.org/10.1134/S1067413619040076>
- Grigoriev A.A., Shalaumova Y.V., Balakin D.S. Current Expansion of *Juniperus sibirica* Burgsd. to the Mountain Tundras of the Northern Urals. *Russ. J. Ecol.*, 2021, no. 52, pp. 376–382.
<https://doi.org/10.1134/S1067413621050076>
- Grigoriev A.A., Shalaumova Y.V., Vyukhin S.O., Balakin D.S., Kukarskikh V.V., Vyukhina A.A., Camarero J.J., Moiseev P.A. Upward treeline shifts in two regions of Subarctic Russia are governed by summer thermal and winter snow conditions. *Forests*, 2022, vol. 13, no. 2, art. 174.
<https://doi.org/10.3390/f13020174>
- Hansson A., Dargusch P., Shulmeister J. A review of modern treeline migration, the factors controlling it and the implications for carbon storage. *J. Mt. Sci.*, 2021, no. 18, pp. 291–306.
<https://doi.org/10.1007/s11629-020-6221-1>
- Harsch M.A., Hulme P.E., McGlone M.S., Dunca R.P. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. *Ecol. Lett.*, 2009, no. 12, pp. 1040–1049.
<https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01355.x>
- Holtmeier F.-K. *Mountain Timberlines: Ecology, Patchiness, and Dynamics. Advanced Global Change Resource*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.
- Holtmeier F.K., Broll G. Wind as an ecological agent at treelines in North America, the Alps, and the European subarctic. *Phys. Geogr.*, 2010, vol. 31, no. 3, pp. 203–233.
<https://doi.org/10.2747/0272-3646.31.3.203>
- Im S.T., Kharuk V.I. Climate induced changes in Alpine Forest: Tundra ecotone, Siberian arctic mountains. *Issled. Zemli Kosmosa*, 2013, no. 5, 32 p. (In Russ.).
<https://doi.org/10.7868/S0205961413040052>
- IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: CUP, 2022.
- Jiao L., Chen K., Liu X., Qi C., Xue R. Comparison of the response stability of Siberian larch to climate change in the Altai and Tianshan. *Ecol. Indic.*, 2021, vol. 128, art. 107823.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107823>
- Klinge M., et al. Climate effects on vegetation vitality at the treeline of boreal forests of Mongolia. *Biogeosci.*, 2018, vol. 15, no. 5, pp. 1319–1333.
<https://doi.org/10.5194/bg-15-1319-2018>
- Körner C. *Alpine treelines. Functional Ecology of the Global High Elevation Tree Limits*. Berlin: Springer, 2012.
- Kullman L., Öberg L. Post-little ice age treeline rise and climatic warming in the Swedish Scandes: A landscape ecological perspective. *J. Ecol.*, 2009, no. 97, pp. 415–429.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01488.x>
- Kuyek N.J., Thomas S.C. Trees are larger on south slopes in late-seral conifer stands in northwestern British Columbia. *Can. J. For. Res.*, 2019, vol. 49, no. 11, pp. 1349–1356.
<https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0089>
- MacQueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In *Proc. 5th Berkeley Symp. on Math. Statistics and Probability*. Le Cam L.M., Neyman J., Eds. 1967, pp. 281–297.
- Mazepa V.S. Stand density in the last millennium at the upper tree-line ecotone in the Polar Ural Mountains. *Can. J. For. Res.*, 2005, no. 35, pp. 2082–2091.
<https://doi.org/10.1139/x05-111>
- Moiseev P.A., Hagedorn F., Balakin D.S., Bubnov M.O., Devi N.M., Kukarskikh V.V., Mazepa V.S., Vyukhin S.O., Vyukhina A.A., Grigoriev A.A. Stand biomass at treeline ecotone in Russian subarctic mountains is primarily related to species composition but its dynamics driven by improvement of climatic conditions. *Forests*, 2022, vol. 13, no. 2, art. 254.
<https://doi.org/10.3390/f13020254>
- Narozhniy Y., Zemtsov V. Current state of the Altai glaciers (Russia) and trends over the period of instrumental observations 1952–2008. *Ambio*, 2011, no. 40, pp. 575–588.
<https://doi.org/10.1007/s13280-011-0166-0>
- Paromov V.V., Narozhnyi Y.K., and Shantyikova L.N. Estimation of current dynamics and forecast of glaciological characteristics of the Malyi Aktru glacier (Central Altai). *Led Sneg*, 2018, vol. 58, no. 2, pp. 171–182. (In Russ.).
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-2-171-182>
- Pauli H., Gottfried M., Dullinger S., et al. Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits. *Science*, 2012, vol. 336, no. 6079, pp. 353–355.
<https://doi.org/10.1126/science.1219033>
- Rossi S., Deslauriers A., Anfodillo T., Carraro V. Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes. *Oecologia*, 2007, no. 152, pp. 1–12.
<https://doi.org/10.1007/s00442-006-0625-7>
- Shiyatov S.G. *Dinamika drevesnoi i kustarnikovo rastitel'nosti v gorakh polyarnogo urala pod vliyaniem sovremennykh izmenenii klimata* [Dynamics of Woody and Shrubby Vegetation in the Mountains of the Polar Urals under the Influence of Modern Climate Changes]. Yekaterinburg: UrO RAN, 2009. 216 p.

- Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kirdyanov A.V., Kruglov V.B., Mazepa V.S., Naurzbaev M.M., Hantemirov R.M. *Metody dendrokronologii: uchebno-metodicheskoe posobie. Ch. 1. Osnovy dendrokronologii. Sbor i poluchenie drevesno-kol'tsevoi informatsii* [Methods of Dendrochronology: Educational and Methodological Manual. Part 1. Fundamentals of Dendrochronology. Collection and Receipt of Tree-ring Information]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk Gos. Univ., 2000.
- Shrestha K.B., Hofgaard A., Vandvik V. Recent treeline dynamics are similar between dry and mesic areas of Nepal, central Himalaya. *J. Plant Ecol.*, 2015, vol. 8, no. 4, pp. 347–358.
<https://doi.org/10.1093/jpe/rtu035>
- Sturm M., Schimel J., Michaelson G., Welker J.M., Oberbauer S.F., Liston G.E., Fahnestock J., Romanovsky V.E. Winter biological processes could help convert arctic tundra to shrubland. *BioScience*, 2005, vol. 55, no. 1, pp. 17–26.
[https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2005\)055\[0017:WBPCHC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055[0017:WBPCHC]2.0.CO;2)
- Taynik A.V., Barinov V.V., Oidupaa O.Ch., Myglan V.S., Reinig F., Buntgen U. Growth coherency and climate sensitivity of *Larix sibirica* at the upper treeline in the Russian Altai Sayan Mountains. *Dendrochronologia*, 2016, no. 39, pp. 10–16.
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.12.003>
- Timoshok E.E., Timoshok E.N., Nikolaeva S.A., Savchuk D.A., Filimonova E.O., Skorokhodov S.N., Bocharov A.Yu. Monitoring of high-altitude terrestrial ecosystems in the Altai Mountains. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2016, vol. 48, art. 012008.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/48/1/012008>
- Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [Third Assessment Report on Climate Change and its Consequences on the Territory of the Russian Federation]. Katsov V.M., Ed. St. Petersburg: Naukoemkie tehnologii Publ., 2022.
- Vaganov E.A., Shiyatov S.G., Mazepa V.S. *Dendroklimaticheskie issledovaniya v Uralo-Sibirskoi Subarktike* [Dendroclimatic Studies in the Ural-Siberian Subarctic]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1996.
- Volkov I.V., Zemtsov V.A., Erofeev A.A., Babenko A.S., Volkova A.I., Callaghan T.V. The dynamic land-cover of the Altai Mountains: Perspectives based on past and current environmental and biodiversity changes. *Ambio*, 2021, no. 50, pp. 1991–2008.
<https://doi.org/10.1007/s13280-021-01605-y>
- Ziaco E., Biondi F., Rossi S., Deslauriers A. Climatic influences on wood anatomy and tree-ring Features of great basin conifers at a new mountain Observatory. *Appl. Plant Sci.*, 2014, vol. 2, no. 10, art. 1400054.
<https://doi.org/10.3732/apps.1400054>

ОСОБЕННОСТИ ЭКСТРЕМАЛЬНО МАЛОВОДНЫХ ЛЕТ НА РЕКАХ РУССКОЙ РАВНИНЫ В ПЕРИОД СОВРЕМЕННОГО ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

© 2024 г. А. Г. Георгиади*

Институт географии РАН, Москва, Россия

**e-mail: georgiadi@igras.ru*

Поступила в редакцию 16.10.2023 г.

После доработки 18.01.2024 г.

Принята к публикации 16.05.2024 г.

Исследованы маловодья на реках (в годы, сток в которые был равным или меньшим 75 и 90–95% обеспеченности), наблюдавшиеся в бассейнах рек Русской равнины (Волги, Дона, Днепра, Западной Двины, Северной Двины и Урала) в XIX–XXI вв. На основе географо-статистического подхода проведен анализ экстремального маловодья для основных сезонов года (половодья, зимней и летне-осенней межени), а также года в целом. Использованы данные по 35 постам на крупных, средних и малых реках. Показано, что доля общего количества лет, в которые наблюдалось маловодье в одном или нескольких сезонах года или всего года в целом относительно всего периода наблюдений, изменялось на рассмотренных реках в диапазоне от 46 до 57%. Современное глобальное потепление приводит к существенному снижению доли маловодных лет в зимнюю и летне-осеннюю межень, а также в целом за год на всех рассмотренных реках. В то время как доля лет с низким стоком половодья на Дону, на Северной Двине и Западной Двине значительно увеличилась, на Волге и Днепре она изменилась малозаметно. В течение долговременных фаз повышенного/пониженного годового и сезонного стока на реках центральной части Русской равнины, последние из которых наблюдались в период современного глобального потепления, выявлены кардинальные различия в частоте маловодных лет. В годы, в которые происходили наиболее крупные экстремальные засухи на территории всех рассмотренных речных бассейнов, маловодье наблюдалось лишь в 1921 и 1972 гг.

Ключевые слова: маловодье на реках, период инструментальных наблюдений, глобальное потепление, долговременные фазы повышенного/пониженного стока, корреляция экстремальных засух и маловодья

DOI: 10.31857/S2587556624030062 EDN: SOINPG

ВВЕДЕНИЕ

Современное глобальное потепление, начавшееся с 1970–1980-х годов, сопровождалось повышенной температурой воздуха и, в меньшей степени, увеличенными атмосферными осадками по сравнению с предшествующим более холодным периодом, что вызвало долговременные изменения различных составляющих водного цикла, в том числе речного стока. На большинстве рек степной, лесостепной и южной и западной частей лесной зон Русской равнины в границах бассейнов Волги, Дона и Днепра в эту эпоху наблюдалась длительная фаза пониженного стока половодья и повышенного стока летне-осенней и зимней межени (Георгиади и др., 2014; Георгиевский и др.,

2014; Многолетние ..., 2021¹; Georgiadi et al., 2020; Milyukova et al., 2020). Для годового стока характер изменений был более сложен. Отметим, что на многих реках этого региона в середине 2000-х годов наметился переход к противоположной длительной фазе. В этот период в регионе также наблюдалась длительная фаза повышенных влагозапасов почв (Георгиади и др., 2021).

На фоне долговременных изменений годового и сезонного стока на реках Русской равнины формировались маловодья разной интенсивности. Они охватывали не только меженные сезоны года (летне-осенний и зимний), но также и пе-

¹ Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации: Научно-прикладной справочник / под ред. В.Ю. Георгиевского. СПб.: ООО "РИАЛ", 2021. 190 с.

риод половодья, а также и год в целом (Georgiadi et al., 2021). Интерес к проблеме маловодий на реках в последние годы существенно повысился (Многолетние ..., 2021²; Nasrul et al., 2019). Основное внимание уделяется исследованию различных аспектов маловодья именно меженных сезонов года (Владимиров, 1976; Семенов и др., 2015³; Филиппова, 1996; Beran and Rodier, 1985), поскольку они выступают в качестве важнейшего фактора, лимитирующего водопотребление (Алексеевский, Фролова, 2011). Маловодья зачастую охватывают значительные территории, особенно в годы с экстремальными засухами. Такие засухи, формируются на обширных территориях в основном в степной, лесостепной и южной части лесной зоны Русской равнины, в других регионах мира (Георгиади и др., 2021; Золотокрылин и др., 2014; Страшная и др., 2011; Georgiadi et al., 2021; Henny et al., 2016; Kireeva et al., 2016; и др.). Наиболее экстремальные [сильные и обширные засухи согласно (Страшная и др., 2011)] из них на территории Русской равнины наблюдались в 1972, 1975, 1981, 1995, 1998, 1999 и 2010 гг., а также в 1891, 1921, 1931, 1946 гг. (Georgiadi and Borodin, 2022; Georgiadi and Kashutina, 2021). В целом географическое положение ареалов распространения экстремальных засух на Русской равнине достаточно устойчиво и привязано к бассейнам Волги, Дона, Днепра и Урала.

Основное внимание в статье уделено анализу характеристик аномально низкого маловодья (с обеспеченностью стока большей или равной 75 и 95 (90)%) годового стока и стока половодья, зимней и летне-осенней межени на наиболее крупных реках Русской равнины (Волга, Дон, Днепр, Северная Двина и Западная Двина), а также на средних и небольших реках различных природных зон, наблюдавшихся в XIX–XXI вв. Рассмотрены маловодья, охватывающие весь регион или его основные части, год в целом и его основные гидрологические сезоны. Анализируется пространственно-временная корреляция маловодий с наиболее экстремальными засухами, а также частота маловодий в период современного глобального потепления и предшествующий ему период с относительно более холодными климатическими условиями. Исследуется также корреляция долговременных фаз повышенного/

пониженного годового и сезонного стока рек с частотой экстремально маловодных лет.

МЕТОДЫ И ДАННЫЕ

Характеристика речных бассейнов. В качестве объектов исследования выбраны речные бассейны, которые охватывают практически всю территорию Русской равнины (табл. 1). Основная часть годового стока на реках формируется в период весенне-летнего половодья (Кузин, Бабкин, 1979). Для рек характерен относительно низкий сток в зимнюю и летне-осеннюю межень. В лесной зоне, а также в лесостепной зоне, особенно на западе региона, наблюдаются летние и осенние паводки, а на юго-западе также и зимние паводки.

Методы и данные. В отличие от экстремальных засух, наблюдавшихся, как правило, в летние месяцы, аномально низкое маловодье в эти годы охватывало как различные гидрологические сезоны года, так и год в целом. В качестве критериев степени экстремальности маловодья служили размеры их ареалов, охват маловодьем различных сезонов года и всего года в целом, а также степень маловодности. К экстремально маловодным относились те годы, в которые средний сезонный (за летне-осеннюю и зимнюю межень и половодье) и средний годовой сток был равен или ниже стока, соответствующего 75% и 95 (90)% обеспеченности. Границы гидрологических сезонов, которые принимались постоянными для всего периода наблюдений, были определены на основе анализа многолетних данных о средних месячных расходах воды, а также о средних многолетних данных о замерзании рек и разрушении ледового покрова. Расчет обеспеченности стока рассмотренных рек (см. табл. 1) проводился по эмпирическим кривым обеспеченности, построенным на основе многолетних рядов средних сезонных (зимних, половодных, летне-осенних) и средних годовых расходов воды рек.

Эмпирические значения обеспеченности были рассчитаны по следующей формуле:

$$Q_i = (m_i / (n + 1)) \times 100\%,$$

где Q_i — средний расход воды за сезон/год i -го года, m_i — порядковый номер расхода воды i -го года в многолетнем ряду расходов воды, распределенных в порядке от максимального до минимального наблюдаемого расхода воды, n — общее число членов многолетнего ряда.

Анализ маловодья Волги у Волгограда, Дона у Раздорской и Днепра у Лоцманской Каменки основывался на многолетних рядах их восстановленного (с исключенными изменениями, вызванными антропогенным воздействием) се-

² Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации: Научно-прикладной справочник / под ред. В.Ю. Георгиевского. СПб.: ООО "РИАЛ", 2021. 190 с.

³ Семенов В.А., Гниломедов В.А., Салугашвили П.С., Голубев В.Н., Фролов Д.М. География распределения и генезис климатообусловленных изменений экстремальных расходов воды, опасных наводнений и маловодий на реках России // Тр. ВНИИГМИ-МЦД. 2015. № 179. <http://meteo.ru/publications> (дата обращения 07.01.2024).

Таблица 1. Характеристика исследуемых рек

№	Река – створ	Площадь бассейна, тыс. км ²	Расчетный период	Природная зона
Бассейн Северной Двины				
1	Северная Двина – Усть-Пинега	348	1881–2016	тайга
Бассейн Западной Двины				
2	Западная Двина – Витебск	27.3	1877–2009	СШЛ*
Бассейн Волги				
3	Волга – Волгоград	1360	1876–2014	тайга, СШЛ, лесостепь, степь
4	Унжа – Макарьев	18.5	1896–2016	тайга
5	Вятка – Киров	48.3	1878–2016	тайга
6	Волга – Старица	21.1	1891–2020	СШЛ
7	Москва – Можайск	1.41	1915–2019	СШЛ
8	Ока – Калуга	54.9	1882–2020	СШЛ
9	Белая – Бирск	121	1881–2016	СШЛ, лесостепь
10	Самара – Елшанка	22.8	1933–2015	степь
11	Дема – Бочкарева	12.5	1934–2015	лесостепь
12	Сок – Сургут	4.73	1934–2014	лесостепь
13	Большой Караман – Советское	3.47	1936–2015	степь
Бассейн Днепра				
14	Днепр – Лоцманская Каменка	459	1851–2009	СШЛ, лесостепь, степь
15	Днепр – Речица	58.2	1895–2015	СШЛ
16	Днепр – Орша	18	1882–2015	СШЛ
17	Припять – Мозырь	97.2	1882–2015	СШЛ
18	Сож – Гомель	38.9	1900–2015	СШЛ
19	Березина – Бобруйск	20.2	1881–2015	СШЛ
20	Сейм – Рыльск	18.1	1935–2015	лесостепь, СШЛ
21	Десна – Брянск	12.4	1895–2016	СШЛ
22	Десна – Чернигов	81.4	1895–2009	СШЛ
Бассейн Дона				
23	Дон – Раздорская	378	1876–2014	СШЛ, лесостепь, степь
24	Дон – Казанская	102	1882–2020	лесостепь, степь
25	Дон – Лиски	69.1	1881–2016	лесостепь
26	Сосна – Елец	16.3	1928–2016	лесостепь, СШЛ
27	Воронеж – Липецк	15.3	1932–2016	лесостепь
28	Ворона – Борисоглебск	13.2	1932–2016	лесостепь
29	Битюг – Бобров	7.65	1933–2016	лесостепь
30	Хопер – Бесплемяновский	44.9	1929–2016	лесостепь
31	Калитва – Погорелов	10.5	1933–2016	степь
32	Медведица – Арчединская	33.7	1927–2016	степь
33	Иловля – Александровка	6.52	1955–2016	степь
34	Чир – Обливская	8.54	1923–2017	степь
Бассейн Урала				
35	Урал – Кизильское	17.2	1936–2015	лесостепь

Примечание: *СШЛ – смешанные и широколиственные леса.

зонного и годового стока, для чего был использован метод рек-индикаторов климатических условий (притоков и верхних частей главных рек), характеризующихся относительно слабыми антропогенными нарушениями водного режима (Георгиади и др., 2014). Был использован также ряд восстановленного стока р. Москвы у Можайска, полученный на основе метода водного баланса.

В качестве границы начала глобального потепления был принят 1980 г., что можно в первом приближении рассматривать в качестве осредненной оценки этой границы для рек Русской равнины, если исходить из анализа наблюдающейся последовательности смены контрастных фаз годового и сезонного стока (Георгиади и др., 2014; Георгиевский и др., 2014). Хотя эти границы в различных регионах могут существенно отличаться (Георгиади и др., 2014; Фролова и др., 2022; Georgiadi et al., 2020). Если же исходить из анализа смены продолжительных фаз температуры воздуха, то указанная граница в основном наблюдается в конце 1980-х годов, а переход контрастных фаз атмосферных осадков наблюдается примерно в середине 1970-х годов (Георгиади и др., 2014).

Границы между длительными фазами пониженных и повышенных значений годового и сезонного стока воды были определены с использованием разностно-интегральных кривых (Андреянов, 1959; Georgiadi and Groisman, 2023) в сочетании с оценкой статистической однородности рядов по средним значениям длительных контрастных фаз на основе параметрических (критерий Стьюдента) и непараметрических (критерий Мана-Уитни-Пети) критериев однородности (Евстигнеев, Магрицкий, 2018; Georgiadi and Groisman, 2023; Pettitt, 1979).

Результаты выявления лет, в которые происходила смена контрастных фаз, определенных на основе указанного выше набора методов, как правило, совпадают (Georgiadi and Groisman, 2023 и др.). Они дают основание сделать два следующих вывода. Во-первых, использование набора таких или аналогичных методов позволяет достаточно надежно выявлять границы смены контрастных фаз и, во-вторых, границы контрастных длительных фаз повышенных/пониженных значений годового и сезонного стока можно также выявлять на основании разностно-интегральных кривых.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБОБЩЕНИЕ

Основные реки Русской равнины

Обобщенная характеристика маловодья на реках по гидрологическим сезонам года и года в целом. Доля общего количества лет, в которые наблюдалось маловодье хотя бы в одном из сезонов года или оно охватывало несколько сезонов года или год в целом, изменялось на рассмотренных реках

по отношению к продолжительности всего периода наблюдений в диапазоне от 46 до 57% (табл. 2). При этом, для каждой из рек характерны свои особенности распределения количества лет, в которые маловодье формируется в различные сезоны года. Общая черта для всех рек — наибольшее число маловодных лет приходится на зиму в те годы, когда зимний сезон является единственным в году маловодным сезоном. Аналогичная картина характерна для других рассматриваемых рек и для двух других сезонов, кроме Дона (см. табл. 2). И все же примерно половину (а на Дону — более 60%) из общего числа лет с маловодьем оно наблюдалось в течение двух или даже трех сезонов года и года в целом. На всех реках (кроме Западной Двины) в довольно большом числе лет маловодье формируется во все сезоны года и год в целом.

В значительном числе лет (более тридцати) маловодье формируется только в одном из бассейнов. Но в большем числе лет (более пятидесяти) оно происходит в нескольких (от двух до пяти) бассейнах одновременно. В конце XIX в., в 1920–1930-е годы, в 1970-е годы в течение семи лет в различные сезоны года и года в целом формировалось маловодье одновременно во всех рассмотренных реках, а в течение девяти лет — в четырех бассейнах. В значительно большем числе лет маловодье наблюдалось одновременно в трех или двух бассейнах.

Наиболее часто (в течение 17–19 лет) маловодье наблюдается одновременно в следующих парах речных бассейнов: Волга–Дон, Дон–Днепр, Волга–Днепр, Западная Двина–Северная Двина, Днепр–Северная Двина, Волга–Западная Двина.

Изменение количества и доли маловодных лет в период современного глобального потепления. Современное глобальное потепление, за начало которого принят 1981 г., на всех рассмотренных реках приводит к существенному снижению количества маловодных лет в зимнюю и летне-осеннюю межень (рис. 1). Наиболее заметно это происходит на Днепре, на Дону, а также на Волге в летне-осеннюю межень, когда маловодье не наблюдалось вовсе. На Западной Двине и Северной Двине доля маловодных лет в меженные сезоны, а на Волге в летне-осеннюю межень также сократилась очень заметно. В то время как доля лет с низким стоком половодья (равным или меньшим стока 75% обеспеченности) на Дону, на Северной Двине и Западной Двине значительно увеличилось. Тогда как на Волге и Днепре она изменилась малозаметно. А вот доля лет с годовым стоком равным или меньшим стоку 75% обеспеченности на всех реках, так же как и низкого стока меженных сезонов, существенно снизилась.

Годовой и сезонный сток в период аномально низкого маловодья в замыкающих створах крупных рек в годы экстремальных засух. Экстремальные

Таблица 2. Характеристика лет с сезонным и годовым стоком обеспеченностью $\geq 75\%$

Река	Волга— Волгоград	Дон— Раздорская	Днепр— Лоцманская Каменка	Северная Двина— Усть-Пинега	Западная Двина— Витебск
Период наблюдений, годы	1876–2014	1876–2014	1851–2009	1881–2016	1877–2009
Типы сочетаний маловодных сезонов года и года в целом	Количество маловодных лет				
З-П-ЛО-Г*	11	10	8	7	2
П-ЛО-Г	4	8	11	5	2
З-ЛО-Г	5	0	3	4	3
З-П-Г	5	0	7	6	7
ЛО-Г	5	0	3	5	9
П-Г	4	2	6	5	6
З-П	1	0	0	2	4
З Г	1	12	1	1	2
П-ЛО	0	10	0	0	1
З-ЛО	0	0	2	0	0
З	12	13	15	13	15
П	9	5	8	8	9
ЛО	11	5	13	12	15
Г	0	3	0	0	1
Суммарное количество лет с сезонным и годовым маловодьем	69	68	77	68	76
Суммарная доля лет с сезонным и годовым маловодьем относительно всего периода наблюдений	46.6**	48.9	48.4	50	57.1

Примечания: * З — зима, П — половодье, ЛО — летне-осенний период, Г — среднегодовой сток; ** доля лет с маловодными сезонами и годовым маловодьем (в %) от числа лет всего периода наблюдений.

засухи на территории Русской равнины, формировавшиеся в летние месяцы и охватывавшие огромные территории, наблюдались на протяжении XIX–XXI вв. регулярно, в том числе в период современного глобального потепления. В эти же годы формировалось маловодье на реках, которое также распространялось на большую территорию (Georgiadi et al., 2021). При этом на территорию всех рассмотренных речных бассейнов маловодье распространялось лишь в 1921 и 1972 гг. (табл. 3).

В 1921 г. оно охватывало практически все сезоны года и год в целом (кроме зимы на Дону и летне-осеннего сезона на Северной Двине). Оно было также наиболее интенсивным. Сезонный и годовое стоки были чрезвычайно низким (равным или меньшим стоку 90% обеспеченности). Лишь на Волге зимний, на Дону годовое и на Северной Двине летне-осенний и годовое стоки были ниже стока 75% и выше стока 90% обеспеченности.

В 1972 г. на всех реках годовое стоки были ниже стока 75% обеспеченности и выше стока 90% обеспеченности. Сезонное маловодье наблюдалось одновременно на трех реках. В период половодья на Дону, Днепре и Западной Двине, а в летне-осенний период на Волге, Дону и Северной Двине. Все сезоны года и год в целом оно охватывало лишь на Дону.

В 1891 г. маловодье охватывало бассейны Волги, Дона, Днепра и Западной Двины, а в 1975 г. бассейны Волги, Дона, Западной Двины и Северной Двины. При этом маловодье 1975 г. на Волге и Дону захватывало как все сезоны года, так и год в целом. На Северной Двине его не было только зимой, а на Западной Двине оно наблюдалось лишь в летне-осенний период. В 1891 г., как и в 1975 г., оно проявилось в наибольшей мере в бассейнах Волги и Дона в сезоны теплого периода года и год в целом и затронуло лишь зимний сезон на Днепре и Западной Двине.

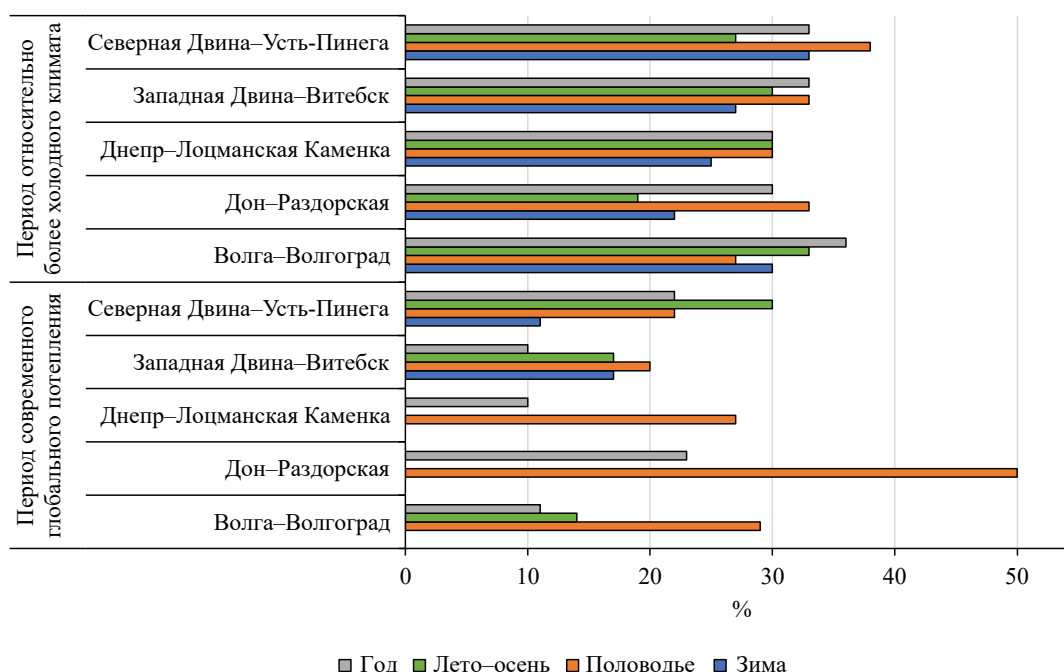


Рис. 1. Изменение доли (%) маловодных лет (со стоком обеспеченностью $\geq 75\%$) в период современного глобального потепления (с 1981 г. до окончания периода наблюдений на реках, приведенного в табл. 1) по сравнению с периодом относительно более холодного климата (1945–1980 гг.).

В другие рассмотренные годы с экстремальными засухами маловодье распространялось лишь на один речной бассейн, но на все сезоны и год в целом (1931 г., бассейн Волги) или на несколько бассейнов, но только на летне-осенний сезон (1946 г., бассейны Дона, Днепра и Северной Двины).

Реки бассейнов Волги, Дона, Днепра и Урала

Особенности маловодья на реках в бассейнах Волги, Дона, Днепра и Урала в годы с экстремальными засухами

Маловодья в периоды половодья, летне-осенней межени и года в целом. Маловодье 1975 г. в летне-осеннюю межень, в период половодья и года в целом было зафиксировано на всех изучаемых реках бассейна Волги (кроме половодья на Волге у Старицы), Дона и Днепра (кроме Бerezины). Средний сток этих периодов на реках в этих крупных бассейнов варьировал, как правило, от 80 до 99% обеспеченности. В 1972 г. на реках в бассейне Дона маловодье наблюдалось на всех реках во все указанные периоды года, а их средний сток в большинстве случаев был ниже стока 90% обеспеченности. В то время как на реках бассейна Волги маловодье наблюдалось в основном в летне-осенний период. Только на Волге у Старицы оно также было в период половодья и года в целом, а на Сургуте его не было вовсе. В бассейне Днепра в этот год реки были маловодными в основном в половодье и год в целом (обеспеченность стока этих периодов

преимущественно была ниже 85%). И лишь на Десне у Брянска маловодье наблюдалось также в летне-осеннюю межень, его средний сток соответствовал 75% обеспеченности. На Урале у Кизильской в 1972 и 1975 гг. маловодье охватывало все рассматриваемые сезоны, а обеспеченность их стока достигала 83–97%.

В 2010 г. маловодье распространялось на все рассмотренные периоды лишь на реках северо-востока и востока бассейна Волги (рр. Вятка и Белая). Обеспеченность их стока находилась в пределах 81–93%. В бассейне Дона оно формировалось на его притоках в его среднем течении (Воронеж, Ворона) в период половодья и года в целом, а на Хопре оно наблюдалось только в период половодья. При этом обеспеченность стока этих периодов составляла 76–85%.

В другие годы с экстремальными засухами маловодье охватывало существенно меньшие территории. Так, например, в бассейне Волги в период экстремальной засухи 1981 г. маловодье наблюдалось лишь в летне-осенний период на таежных (на Унже и Вятке) и степных (на Самаре и Большом Карамане) реках, а обеспеченность их среднего стока составляла 75–79%. В 1991 г. маловодье фиксировалось только на Унже (в летне-осеннюю межень), а в 1995 г. лишь на Волге у Старицы и также в летне-осеннюю межень. В 1999 г. оно наблюдалось на Волге у Старицы (в летне-осеннюю межень) и на Большом Карамане (в период половодья и года в целом). Обеспеченность стока в эти периоды составляла около 75% и лишь в 1999 г. на Большом Карамане она достигала 90%.

Таблица 3. Характеристика маловодных лет со стоком $\geq 75\%$ обеспеченности

Маловодные сезоны и год в целом	Река – створ				
	Волга—Волгоград	Дон—Раздорская	Днепр—Лоцманская Каменка	Западная Двина—Витебск	Северная Двина—Усть-Пинега
1891 г.					
Зима					
Половодье					
Лето—осень					
Год					
1921 г.					
Зима					
Половодье					
Лето—осень					
Год					
1931 г.					
Зима					
Половодье					
Лето—осень					
Год					
1946 г.					
Зима					
Половодье					
Лето—осень					
Год					
1972 г.					
Зима					
Половодье					
Лето—осень					
Год					
1975 г.					
Зима					
Половодье					
Лето—осень					
Год					

Примечание: оранжевые ячейки – речной сток меньше или равен стоку 75% обеспеченности, красные ячейки – речной сток меньше или равен стоку 90% обеспеченности.

На реках в бассейне Дона маловодья в годы с экстремальными засухами регулярно наблюдались (в 1991, 1995, 1998 и 1999 гг.) только на Дону у Лисок и лишь в период половодья. Обеспеченность стока низкого половодья в эти годы составляла около 75%. Маловодье формировалось также в период половодья, а также и года в целом на Сосне в 1991 и 1995 гг., на Медведице в 1995 г. и на Иловле в 1995 и 1998 гг. На Иловле обеспеченность стока этих периодов составляла около 90%, тогда как в остальных случаях она была около 75%. Маловодье в летне-осенний период наблюдалось лишь на двух реках. На Чире в 1995 г. (с обеспеченностью стока 75%) и на Иловле в 1998 г. (обеспеченность стока была более 98%). В бассейне Днепра в 1980–1990-е годы с экстремальными засухами маловодье наблюдалось лишь один раз (в 1991 г.) только на одной реке (Десна у Брянска) в период половодья.

Маловодье в период летней межени. Летом (период наибольшего распространения экстремальных засух) в 1975 г. маловодье наблюдалось в течение всех месяцев практически на всех рассмотренных реках в бассейне Волги, половине рек в бассейне Дона, на двух реках бассейна Днепра (Припять и Десна) и на Урале. Сток этих месяцев был чрезвычайно низким (его обеспеченность варьировала от 90 до 99%). На ряде рек в бассейне Дона маловодье формировалось в июне и июле (Битюг, Иловля) или только в июне (Воронеж), и оно также характеризовалось очень низким стоком с обеспеченностью более 90%. Похожая картина отмечается на ряде рек в бассейне Днепра. Маловодье здесь было сдвинуто во времени и происходило в июле–августе (Сож, Сейм) и в августе (Днепр у Речицы, Березина). При этом обеспеченность среднеме-

Таблица 4. Число случаев (в %) маловодных лет (обеспеченность которых равна или выше 75 и 95%) для основных гидрологических сезонов года и года в целом в долговременные контрастные фазы водности

Гидрологический сезон, год	Долговременные контрастные фазы водности	Число маловодных лет со стоком обеспеченностью	
		≥75%	≥95%
Летне–осенний	ФВС*	0–7	0–2
	ФНС**	35–42	6–8
Зимний	ФВС	0–7	0–7
	ФНС	33–49	6–14
Половодье	ФВС	5–8	0–8
	ФНС	36–66	1–14
Год	ФВС	8–19	0–4
	ФНС	29–43	5–11

Примечания: * – фаза повышенного стока; ** – фаза пониженного стока.

сячного стока на лесных реках была существенно ниже (около 75%), чем на лесостепных реках (Сейм), где она приближалась к 90%.

В 1972 г. маловодье в течение всех летних месяцев наблюдалось практически на всех реках бассейна Дона, а также на Самаре в бассейне Волги. Оно, как и маловодье 1975 г., охватывало в основном лесостепные и степные реки. На других реках этого бассейна маловодье формировалось преимущественно в течение двух месяцев (кроме Вятки, на которой был лишь один маловодный месяц, и р. Сок, на которой маловодья в этот год не фиксировались). Обеспеченность стока маловодных месяцев изменялась в широких пределах (75–90%). В бассейне Днепра маловодье наблюдалось в течение одного–двух летних месяцев (кроме Березины, на которой маловодья не было), обеспеченность стока которых варьировала от 75 (Сож – лесная зона) до 95% (Десна – лесостепь). На Урале маловодье наблюдалось в июле и августе, а обеспеченность стока составляла 78–90% соответственно.

Следующее по охвату территории маловодье в летние месяцы наблюдалось в 2010 г. Но в отличие от маловодий 1975 и 1972 гг. в течение всех трех месяцев оно было зафиксировано только на четырех лесостепных и степных реках, две из которых в бассейне Волги (Белая, Дема) и по одной в бассейнах Днепра (Сейм) и Дона (Медведица). В течение двух месяцев оно наблюдалось на Вятке (бассейн Волги), Хопре (бассейн Дона) и Десне (бассейн Днепра). А один маловодный месяц был зафиксирован на Дону у Лисок и Воронеже (бассейн Дона), р. Сок (бассейн Волги) и на Урале.

В другие годы с экстремальными засухами маловодье в летний период распространялось на существенно меньшие по размеру территории и охватывало отдельные части рассмотренных крупных речных бассейнов и наблюдалось чаще всего в течение одного летнего месяца (1981 г. – на

Унже, Вятке, Сосне, Воронеже, Иловле, 1991 г. – на Белой, 1995 г. – на Березине, 1999 г. – на Вятке) и редко двух (1981 г. – на Самаре, 1991 г. – на Калитве и Медведице, 1995 г. – на Чире) или трех месяцев (1991 г. – на Унже, 1995 и 1998 гг. – на Иловле). Сток таких маловодных месяцев менялся в широких пределах и соответствовал 75–99% обеспеченности. При этом маловодные летние месяцы наблюдались, в основном, на степных и лесостепных реках.

Изменение частоты маловодных лет во время долговременных фаз повышенного/пониженного стока

В многолетних изменениях рассмотренных рек Русской равнины (Волга – Старица, Москва – Можайск, Днепр – Орша, Ока – Калуга, Дон – Казанская, Сейм – Рыльск, табл. 4) за весь более чем вековой период наблюдений (на Сейме более чем 80-летний) выявлены две продолжительные контрастные фазы повышенного и пониженного стока гидрологических сезонов (Georgiadi and Groisman, 2023). При этом, для половодья сначала наблюдалась фаза повышенного стока, которая сменилась в 1960 г. на Днепре, в 1969 г. на Волге, в 1972 г. (на Сейме, Оке и Дону), в 1989 г. (на Москве у Можайска) на фазу пониженного стока. Для меженных периодов, напротив, сначала наблюдались фазы пониженного стока, а затем практически синхронно на всех рассмотренных реках (в 1978–1981 гг.) наступила фаза повышенного стока. При этом границы последних наблюдавшихся фаз, как правило, близки к границам периода современного глобального потепления. Характер же фаз годового стока существенно отличается между реками. Продолжительность долговременных фаз находится в пределах 28–99 лет. Разница в стоке контрастных фаз составляет (в процентах от стока в фазу его пониженных значений) от 18

до 144%. При этом наибольших значений разницы в стоке, как правило, достигает в меженные сезоны года, а наименьших для годового стока.

Были выявлены очень значительные различия в частоте маловодных лет (обеспеченность стока которых ≥ 75 и $\geq 95\%$) в фазы повышенного/пониженного стока всех рассмотренных рек как для годового стока, так и для стока основных гидрологических сезонов года (половодье, летне-осенний и зимний периоды). В табл. 4 указаны наибольшие и наименьшие доли маловодных лет (в процентах от продолжительности всего периода наблюдений) по данным для всех рассмотренных рек. Для летне-осеннего и зимнего сезонов на рр. Ока, Дон, Москва в фазы их повышенного стока вовсе не наблюдалось экстремальное маловодье. При этом в эти же сезоны в контрастные фазы наблюдались более значительные различия в частоте маловодных лет по сравнению с периодом половодья и годовым стоком. Для фаз повышенного стока диапазон изменений частоты маловодных лет (сток которых был ниже стока 75 и 95% обеспеченности) составлял для летне-осеннего стока соответственно 0–7 и 0–2, для зимы 0–7 и 0–7, для половодья 5–18 и 0–8, для годового стока 8–19 и 0–4). Для фазы пониженного стока картина разительно отличалась и выглядела следующим образом. Для летне-осеннего периода 35–42 и 6–8, зимнего периода 33–49 и 6–14, для половодья 36–66 и 1–14, для годового стока 29–43 и 5–11.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На фоне долговременных изменений стока, на реках Русской равнины формировались маловодья разной интенсивности, которые охватывали как год в целом, так и его основные сезоны. В период с конца XIX до начала XXI в. доля общего количества лет, в которые наблюдалось маловодье (когда сток был равен или ниже стока 75% обеспеченности) хотя бы в одном из сезонов года или в нескольких сезонах года, или год в целом, изменялось на рассмотренных реках Русской равнины (Волга, Дон, Днепр, Западная Двина и Северная Двина) по отношению к продолжительности всего периода наблюдений в диапазоне от 46 до 57%.

В большом числе лет (более тридцати) маловодье формируется только в одном из указанных выше бассейнов. Но в значительном числе лет (более 50) оно происходит в нескольких (от двух до пяти) бассейнах одновременно. В конце XIX в., в 1920–1930-е годы, в 1970-е годы в течение семи лет в различные сезоны года и года в целом маловодье формировалось одновременно на всех рассмотренных реках, а в девяти случаях в четырех бассейнах. В значительно большем числе лет маловодье формировалось одновременно в трех или двух бассейнах.

Современное глобальное потепление привело к существенному снижению доли маловодных лет в зимнюю и летне-осеннюю межень и года в целом на всех рассмотренных реках. В то время как доля лет с низким стоком половодья (равным или меньшим 75% обеспеченности) на Дону, на Северной Двине и Западной Двине напротив значительно увеличилось. Тогда как на Волге и Днепре она изменилось малозаметно.

В годы, в которые наблюдались наиболее крупные из экстремальных засух (1891, 1921, 1931, 1946, 1972 и 1975 гг.), территорию всех рассмотренных речных бассейнов маловодье охватывало лишь в 1921 и 1972 гг. В 1921 г. экстремальное маловодье наблюдалось практически во все сезоны года (кроме зимы на Дону и летне-осеннего сезона на Северной Двине). Оно было также наиболее интенсивным. Сезонный и годовой сток был чрезвычайно низким (равным или меньшим стоку 90% обеспеченности).

Маловодья на реках степной, лесостепной, южной и западной частей лесной зон тесно коррелированы с наиболее экстремальными засухами, наблюдавшимися на Русской равнине в период современного глобального потепления в 1970–2000-е годы.

Большую территорию экстремальное маловодье охватывало во время экстремальных засух 1975, 1972 и 2010 гг., наблюдавшихся в период глобального потепления. В 1975 г. ареал маловодья включал в себя бассейны крупнейших рек (Волги, Дона и Днепра, а также Урала), которое проявлялось даже в их замыкающих створах. В 1972 г. маловодье наблюдалось в замыкающем створе Дона, а также на Днепре и Урале, а в 2010 г. только в низовье Волги. При этом в 1975, 1972 и 2010 гг. в замыкающих створах этих рек оно наблюдалось не только в летне-осеннюю межень (период, когда встречаются экстремальные засухи), но также в период половодья и года в целом. Сток в эти периоды годового цикла был чрезвычайно низким и его обеспеченность варьировала, как правило, в диапазоне от 80 до 99%.

В другие годы с экстремальными засухами маловодье охватывало существенно меньшие территории, отдельные периоды года, а в летний период только его отдельные месяцы.

Для рек центральной части Русской равнины выявлено кардинальное изменение частоты маловодных лет в контрастные долговременные фазы речного стока, как в основные гидрологические сезоны года, так и за год в целом.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института географии РАН FMWS-2024-0007 (№ 1021051703468-8).

FUNDING

Study completed according to the state assignment for the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences FMWS-2024-0007 (no. 1021051703468-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И., Фролова Н.В.* Безопасность водопользования в условиях маловодий // Водное хозяйство России. 2011. № 6. С. 6–17.
- Андреянов В.Г.* Циклические колебания годового стока, их изменения по территории и учет при расчетах стока // Тр. III Всесоюз. гидрологического съезда. Ленинград: Гидрометеиздат, 1959. Т. II. С. 3–49.
- Владимиров А.М.* Сток рек в маловодный период года. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 295 с.
- Георгиади А.Г., Кашутина Е.А., Бородин О.О.* Динамика гидроклиматических характеристик в период экстремальных засух, наблюдавшихся на Русской равнине с 1970-х годов // Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство). Национальный докл. Т. 3. М.: МБА, 2021. С. 141–150.
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милукова И.П., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А.* Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 2. Бассейны рек Волги и Дона. М.: Издательство “Макс Пресс”, 2014. 214 с.
- Георгиевский В.Ю., Голованов О.Ф., Шалыгин А.Л.* Водные системы суши // Второй оценочный докл. Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. С. 350–361.
- Евстигнеев В.М., Магрицкий Д.В.* Речной сток и гидрологические расчеты. Курс лекций: учеб. пособие. М.: Триумф, 2018. 272 с.
- Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В., Мецкерская А.В., Страшная А.И., Черенкова Е.А.* Засухи и опустынивание // Второй оценочный докл. Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. С. 551–587.
- Кузин П.С., Бабкин В.И.* Географические закономерности гидрологического режима рек. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 200 с.
- Страшная А.И., Максименкова Т.А., Чуб О.В.* Агрометеорологические особенности засухи 2010 года в России по сравнению с засухами прошлых лет // Тр. Гидрометцентра. 2011. Вып. 345. С. 171–188.
- Филиппова И.А.* О вероятностных закономерностях колебаний минимального стока (на примере рек Центрально-Черноземной области) // Водные ресурсы. 1996. Т. 23. № 4. С. 389–395.
- Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьева В.Ю., Гельфан А.Н., Сазонова А.А., Шевченко А.И.* Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 3. С. 251–269.
<https://doi.org/10.31857/S032105962203004X>
- Beran M.A., Rodier J.A.* Hydrological aspects of drought. A contribution to the International Hydrological Programme. UNESCO-WMO. Vendôme. Presses Universitaires de France, 1985. 149 p.
- Georgiadi A.G., Borodin O.O.* Extreme Low Flows in Rivers of the East European Plain in the 19th–21st Centuries // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2022. Vol. 1023. P. 012011.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1023/1/012011>
- Georgiadi A.G., Groisman P.Y.* Extreme Low Flow during Long-Lasting Phases of River Runoff in the Central Part of the East European Plain // Water. 2023. № 15. P. 2146.
<https://doi.org/10.3390/w15122146>
- Georgiadi A.G., Kashutina E.A.* Hydroclimate Characteristics of Extreme Droughts Observed on the Russian Plain since the 1970s // Arid Ecosyst. 2021. № 11. P. 117–123.
<https://doi.org/10.1134/S2079096121020050>
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Borodin O.O.* Spatial and temporal correlation between severe droughts and extreme low flow on rivers in the Russian Plain // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. Vol. 817. P. 012034.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/817/1/012034>
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A.* Contemporary and Scenario Changes in River Runoff in the Don Basin // Water Res. 2020. Vol. 47. № 6. P. 651–662.
<https://doi.org/10.1134/S0097807820060068>
- Hasrul H.H., Siti F.M.R., Nur S.M., Asmadi A.* Research Trends of Hydrological Drought: A Systematic Review // Water. 2019. № 11. P. 2252.
<https://doi.org/10.3390/w11112252>
- Kireeva M.B., Frolova N.L., Winde F., Dzhamalov R.G., Rets E.P., Povalishnikova E.S., Pakhomova O.M.* Low flow on the rivers of the European part of Russia and its hazards // Geography, Environment, Sustainability. 2016. Vol. 9. № 4. P. 33–47.
https://doi.org/10.15356/2071-9388_04v09_2016_03
- Milyukova I., Georgiadi A., Borodin O.* Long-term changes in water flow of the Volga basin rivers // E3S Web Conf. 2020. Vol. 163. P. 05008.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016305008>
- Pettitt A.N.* A non-parametric approach to the change-point problem // J. of the Royal Statistical Society. Ser. C (Applied Statistics). 1979. Vol. 28. № 2. P. 126–135.

Features of Extremely Low Water Years on the Rivers of the Russian Plain during the Period of the Modern Global Warming

A. G. Georgiadi*

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**e-mail: georgiadi@igras.ru*

Extreme low water years on rivers (in years in which the runoff was equal to or less than 75 and 90–95% of the probability exceedance) observed in the river basins of the Russian Plain (Volga, Don, Dnieper, Western Dvina and Northern Dvina) in the 19th–21st centuries were studied. It is shown that the proportion of the total number of years in which low water was observed in one or several seasons of the year or the whole year varied on the rivers considered in relation to the duration of the entire observation period in the range from 46 to 57%. In the 1930s, low water years occurred in only one of the basins considered, and in the 1950s in several (from two to five) basins in the same year. At the end of the 19th century, in the 1920s and 1930s, and in the 1970s, there were seven years when low water occurred simultaneously in different seasons and in the whole year in all the rivers considered, and in nine cases in four basins. Modern global warming leads to a significant decrease in the number of low water years in the winter and summer-autumn low flow seasons and the year as a whole on all the rivers considered. While the number of years with low flood runoff on the Don, on the Northern and Western Dvina has increased significantly, and on the Volga and Dnieper it has changed little. During the long-term phases of increased/decreased annual and seasonal runoff on the rivers of the central part of the Russian Plain, cardinal differences in the frequency of low water years were revealed. In the years when the most extreme droughts were observed on the territory of all river basins considered, low water was observed only in 1921 and 1972.

Keywords: extreme low water on rivers, period of instrumental observations, global warming, long-term phases of increased/decreased runoff, correlation of extreme droughts and low water

REFERENCES

- Alekseevskii N.I., Frolova N.V. Water use safety in the conditions of water scarcity. *Vodn. Khoz. Ross.*, 2011, no. 6, pp. 6–17. (In Russ.).
- Andreyanov V.G. Cyclic fluctuations of annual runoff, their changes over the territory and accounting for runoff calculations. In *Trudy III Vsesoyuznogo gidrologicheskogo s'ezda. T. II* [Proceedings of the 3 All-Union Hydrological Congress. Vol. 2]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1959, pp. 3–49. (In Russ.).
- Beran M.A., Rodier J.A. *Hydrological aspects of drought. A contribution to the International Hydrological Programme. UNESCO-WMO*. Vendôme: Presses Universitaires de France, 1985. 149 p.
- Evstigneev V.M., Magritskii D.V. *Rechnoi stok i gidrologicheskie raschety. Kurs lektsii: uchebnoe posobie* [River Flow and Hydrological Calculations. Course of Lectures: Textbook]. Moscow: Triumf Publ., 2018. 272 p.
- Filippova I.A. On the probabilistic patterns of fluctuations in minimum flow (using the example of rivers in the Central Black Earth Region). *Vodn. Resur.*, 1996, vol. 23, no. 4, pp. 389–395. (In Russ.).
- Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., et al. Streamflow of Russian rivers under current and forecasted climate changes: A review of publications. 1. Assessment of changes in the water regime of Russian rivers by observation data. *Water Resour.*, 2022, vol. 49, pp. 333–350.
<https://doi.org/10.1134/S0097807822030046>
- Georgiadi A.G., Borodin O.O. Extreme low flows in rivers of the East European Plain in the 19th–21st Centuries. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2022, vol. 1023, art. 012011.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1023/1/012011>
- Georgiadi A.G., Groisman P.Y. Extreme low flow during long-lasting phases of river Runoff in the central part of the East European Plain. *Water*, 2023, no. 15, art. 2146.
<https://doi.org/10.3390/w15122146>
- Georgiadi A.G., Kashutina E.A. Hydroclimate characteristics of extreme droughts observed on the Russian Plain since the 1970s. *Arid Ecosyst.*, 2021, no. 11, pp. 117–123.
<https://doi.org/10.1134/S2079096121020050>
- Georgiadi A.G., Kashutina E.A., Borodin O.O. Dynamics of hydroclimatic characteristics during the period of extreme droughts observed on the Russian Plain since the 1970s. In *Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii: proyavleniya zasukhi, mery preduprezhdeniya, bor'by, likvidatsiya posledstviy i adaptatsionnye meropriyatiya (sel'skoe i lesnoe khozyaistvo). Natsional'nyi doklad. Tom 3* [Global Climate and Soil Cover in Russia: Manifestations of Drought, Prevention and Control Measures, Mitigation of Consequences and Adaptation Measures (Agriculture and Forestry). National report. Vol. 3]. Moscow: MBA, 2021, pp. 141–150. (In Russ.).
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P., Kashutina E.A., Barabanova E.A. *Sovremennye i stsennarnye izmeneniya rechnogo stoka v basseynakh krupneishikh rek Rossii. Chast' 2. Basseiny rek Volgi i Dona* [Modern and Scenario Changes in River Flow

- in the Basins of the Largest Rivers in Russia. Part 2. Basins of the Volga and Don Rivers]. Moscow: "Max Press" Publ., 2014. 214 p.
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Borodin O.O. Spatial and temporal correlation between severe droughts and extreme low flow on rivers in the Russian Plain. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2021, vol. 817, art. 012034. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/817/1/012034>
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. Contemporary and Scenario Changes in River Runoff in the Don Basin. *Water Resour.*, 2020, vol. 47, no. 6, pp. 651–662. <https://doi.org/10.1134/S0097807820060068>
- Georgievskii V.Yu., Golovanov O.F., Shalygin A.L. Land water systems. In *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [The Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Change and Its Consequences on the Territory of the Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet, 2014, pp. 350–361. (In Russ.).
- Hasrul H.H., Siti F.M.R., Nur S.M., Asmadi A. Research trends of hydrological drought: A systematic review. *Water*, 2019, no. 11, art. 2252. <https://doi.org/10.3390/w11112252>
- Kireeva M.B., Frolova N.L., Winde F., Dzhamalov R.G., Rets E.P., Povalishnikova E.S., Pakhomova O.M. Low flow on the rivers of the European part of Russia and its hazards. *Geogr., Environ., Sustain.*, 2016, vol. 9, no. 4, pp. 33–47. https://doi.org/10.15356/2071-9388_04v09_2016_03
- Kuzin P.S., Babkin V.I. *Geograficheskie zakonomernosti gidrologicheskogo rezhima rek* [Geographical Patterns of the Hydrological Regime of Rivers]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979. 200 p.
- Milyukova I., Georgiadi A., Borodin O. Long-term changes in water flow of the Volga basin rivers. *E3S Web Conf.*, 2020, vol. 163, art. 05008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016305008>
- Pettitt A.N. A non-parametric approach to the change-point problem. *J. R. Stat. Soc., C: Appl. Stat.*, 1979, vol. 28, no. 2, pp. 126–135.
- Strashnaya A.I., Maksimenkova T.A., Chub O.V. Agrometeorological features of the 2010 drought in Russia compared to droughts of previous years. *Tr. Gidromettsentra*, 2011, no. 345, pp. 171–188. (In Russ.).
- Vladimirov A.M. *Stok rek v malovodnyi period goda* [River Flow During Low-Water Periods of the Year]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976. 295 p.
- Zolotokrylin A.N., Vinogradova V.V., Meshcherskaya A.V., Strashnaya A.I., Cherenkova E.A. Droughts and desertification. In *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [The Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Change and Its Consequences on the Territory of the Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet, 2014, pp. 551–587. (In Russ.).

НАБЛЮДАЕМЫЕ И ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РЕЧНОЙ СТОК (НА ПРИМЕРЕ ДОНА)

© 2024 г. Е. А. Черенкова^{1, 2, *}, А. Г. Георгиади¹, А. Н. Золотокрылин¹,
Е. А. Кашутина¹

¹Институт географии РАН, Россия, Москва

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Россия, Москва

*e-mail: cherenkova@igras.ru

Поступила в редакцию 11.10.2023 г.

После доработки 27.12.2023 г.

Принята к публикации 16.05.2024 г.

Исследуются современные изменения климата на Восточно-Европейской равнине, а также реакция на них речного стока Дона. Значительное потепление в среднем на 1.8°C зимой на равнине в период 1991–2020 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. привело к увеличению числа дней с положительной температурой воздуха. Наблюдалось увеличение количества осенне-зимних атмосферных осадков, а также доли жидких осадков в зимний сезон с существенным их ростом на западе и в центре. В бассейне Дона в тот же период отмечалось наибольшее по сравнению с остальными сезонами потепление зимой на 1.6°C и слабо выраженное увеличение количества осадков во все сезоны, кроме лета. Заметное внутригодовое перераспределение стока Дона с 1990-х годов по сравнению с 1961–1990 гг. изменило соотношение меженного стока и стока половодья. Значимый рост стока отмечался во все месяцы года, кроме апреля и мая, в апреле он существенно снизился. Наибольшее увеличение стока на 55.7% наблюдалось в январе. Показано, что почти половина многолетней изменчивости стока Дона в январе происходила за счет оттепелей, а около 20% было обусловлено изменениями осадков в осенне-зимний период. Роль оттепелей в формировании зимнего стока, повторяемость которых увеличилась в 2.6 раза за последние тридцать лет возросла, а влияние суммарных осадков, наоборот, снизилось. Проекция климатических моделей в XXI в. предполагают постепенное расширение на северо-восток Восточно-Европейской равнины границ территории проявления зимних оттепелей, сопровождающихся интенсивным снеготаянием, увеличением речного стока зимой и снижением половодья. По сценариям умеренного и агрессивного антропогенного воздействия на климат в период 2061–2100 гг., границы могут сместиться не только в северо-западную часть бассейна Волги, но и в бассейны рек Европейского севера России.

Ключевые слова: глобальное потепление, температура воздуха, атмосферные осадки, речной сток, оттепели, климатические модели, Восточно-Европейская равнина

DOI: 10.31857/S2587556624030075 EDN: SOFGKD

ВВЕДЕНИЕ

Согласно оценкам Межправительственной группы по изменениям климата, глобальное потепление происходит тревожно быстрыми темпами, его последствия для многих экосистем оцениваются как беспрецедентные (IPCC, 2023). Так, глобальная приземная температура в первые два десятилетия XXI в. была на 0.99°C выше, а в 2011–2020 гг. уже на 1.1°C выше, чем в 1850–1900 гг. Потепление оказывает значительное влияние на изменения компонентов водного цикла (Barnett et al., 2005). Усиление водного

цикла из-за потепления климата и увеличения влагоемкости атмосферы приводит к повышению рисков наводнений в различных регионах мира (IPCC, 2023). Результаты климатического моделирования показали, что ожидаемое потепление будет определяющим фактором в интенсификации процессов гидрологического цикла (Christensen J. and Christensen O., 2007). Отмечается, что повторяемость наводнений в Европе возросла в последние десятилетия (Alfieri et al., 2015; Kundzewicz et al., 2013). При этом интенсивность наводнений превысила предыдущие зарегистрированные уровни: например, в слу-

чае экстремальных наводнений в Центральной Европе — летом и осенью (Barredo, 2007; Blöschl et al., 2013), а также зимой (Engel, 1997). Вместе с тем было высказано предположение о том, что теплые зимы и более раннее снеготаяние снизят пики весеннего снеготаяния в Европе, и особенно, на ее северо-востоке (Dankers and Feyen, 2008). Оно, в частности, подтверждается фактом снижения с 1970-х годов повторяемости пиков весеннего половодья на крупных европейских реках Даугава и Неман (Sarauskiene et al., 2015). На увеличение повторяемости наводнений и их интенсивности во многих регионах Европы в XXI в. вследствие роста экстремальных осадков указывают модельные проекции [например, (Alfieri et al., 2015; Dankers and Feyen, 2009; Lehner et al., 2006)].

Помимо антропогенного влияния, в формировании изменчивости климата в холодный период в регионах Европы на десятилетнем и межгодовом временном масштабе значительный вклад вносит естественная климатическая изменчивость, в том числе Североатлантическое колебание (Hurrell, 1995), Атлантическая мультideкадная осцилляция (Черенкова, Семенов, 2017; Knight et al., 2006; Sutton and Dong, 2012), а также стремительное сокращение ледового покрова в Арктике в последние десятилетия (Petoukhov and Semenov, 2010). Ранее при изучении влияния атмосферной циркуляции на изменения осадков нами было установлено, что 34.2% изменчивости ведущего режима осадков зимой в регионах Европы формируется за счет Северо-Атлантического колебания, а 7.4% объясняется долгопериодной изменчивостью температуры поверхности океана в Северной Атлантике (Черенкова, Семенов, 2017). О влиянии мультideкадной изменчивости климата в Северной Атлантике на изменения зимних осадков над Евразией свидетельствуют результаты численных экспериментов с глобальными климатическими моделями (Мохов и др., 2008). Согласно модельным оценкам, за счет аномальных потоков тепла из океана в атмосферу в Северной Атлантике и Арктике в результате перехода океана к современной теплой фазе в последние несколько десятилетий можно объяснить примерно половину потепления в Северном полушарии в этот период (Semenov et al., 2010).

Восточно-Европейская равнина (ВЕР) относится к территории максимального как наблюдаемого, так и прогнозируемого потепления (IPCC, 2023). Средняя скорость роста среднегодовой приземной температуры воздуха на Европейской территории России (ЕТР), занимающей большую часть ВЕР, составила $0.55^{\circ}\text{C}/10$ лет в период 1976–2020 гг. (Доклад ..., 2021), что превышает аналогичный показатель глобальной

температуры. При этом зимнее потепление на ЕТР со скоростью $0.72^{\circ}\text{C}/10$ лет признано наибольшим по сравнению с остальными сезонами.

Анализ климатических и гидрологических данных показал, что зимнее потепление и более раннее снеготаяние привело к сдвигу на более ранние сроки дат начала половодья рек ВЕР весной в период 1960–2010 гг. (Blöschl et al., 2017). При этом наибольшие скорости изменений наблюдались на западе равнины в бассейнах рек Даугава и Неман ($2\text{--}4$ дня/10 лет), а также на ее юге в бассейне р. Дон ($2\text{--}8$ дней/10 лет). Потепление привело к росту стока крупных рек ВЕР (рр. Печора, Мезень, Онега, Северная Двина, Волга) зимой в период 1975–2010 гг. по сравнению с 1946–1975 гг. от верхней части бассейна р. Северная Двина (на 50%) до низовьев рек Волги (на 120%) (Водные ..., 2008). Вместе с тем водность рек бассейна реки Дон в зимний период с 1975 по 2010 г. увеличилась от 20 до 100% и выше (Джамалов и др., 2015). Рост зимнего стока в период 1966–2012 гг. в бассейне р. Дон зафиксирован сетью гидропостов (Георгиади и др., 2014, 2020; Georgiadi et al., 2023). Следует отметить, что в бассейне Дона преобладало уменьшение повторяемости экстремальных суточных сумм осадков весной в период 1991–2014 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. (Zolotokrylin and Cherenkova, 2017). Меженный сток р. Дон, изменчивость которого отражает изменчивость естественных ресурсов подземных вод, статистически значительно увеличился (в 1.5–2 раза) в последние десятилетия по сравнению с периодом 1960–1970 гг. (Джамалов и др., 2013), а в период 1981–2011 гг. — на 40–60%, по данным (Георгиади и др., 2020; Frolova et al., 2011; Georgiadi et al., 2023). На зимний сток могут влиять факторы, напрямую не связанные с температурой, такие как, например, уровень грунтовых вод. Данные измерений уровня грунтовых вод в Федеральном заказнике “Каменная степь” (Воронежская область) свидетельствуют о повышении уровня с 7 до 4 м с середины прошлого века до 1990-х годов (Дмитриева, 2011а), хотя в последние годы происходило его существенное снижение.

Согласно опубликованным в (IPCC, 2023) выводам, прогнозируется продолжение зимнего потепления на территории России в XXI в., которое заметно превышает среднее глобальное потепление. Результаты анализа модельных проекций будущего климата показали, что рост температуры воздуха зимой на ВЕР в середине XXI в. может составить от 2.8°C на юге до 4.9°C на севере по сравнению с базовым периодом 1981–2000 гг. (Катцов, Говоркова, 2013). Длительное маловодье на Дону в последние десятилетия, которое негативно сказывается на хозяйственной деятельности, а также уязвимость региона к дефициту водных ресурсов обуславливает актуальность изучения

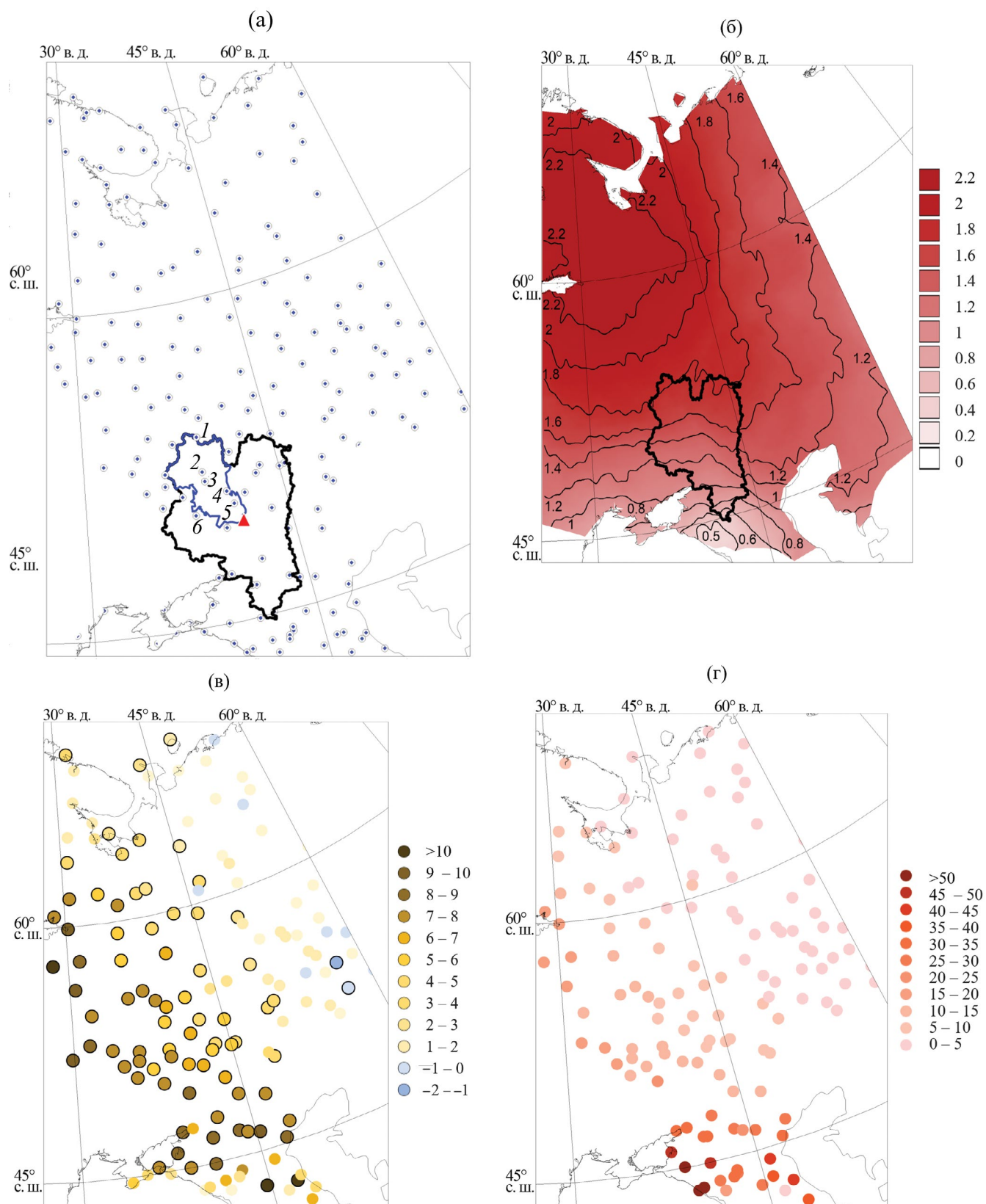


Рис. 1. Пространственное распределение метеостанций в бассейне Дона (1 – Павелец, 2 – Конь-Колодезь, 3 – Воронеж, 4 – Каменная Степь, 5 – Калач, 6 – Валуйки) (а), изменения температуры (°C) зимой (б) и числа дней с положительными температурами (дни) зимой (в) на ВЕР в период 1991–2020 гг. по сравнению с 1961–1990 гг., а также их среднемноголетние значения (дни) зимой в 1961–1990 гг. (г). Граница бассейна Дона на рис. 1а и 1б показана жирной линией черного цвета. Граница бассейна Дона до Казанской на рис. 1а обведена контуром синего цвета, станция Казанская отмечена треугольником красного цвета. Изменения температуры воздуха зимой статистически значимы на уровне 0.05 на всей ВЕР. Значимые изменения числа оттепелей на рис. 1в показаны кругами, обведенными черным цветом.

изменений гидрологического отклика в бассейне Дона в связи с наблюдаемыми изменениями климата. Помимо этого, не менее актуальными являются исследования будущих климатических изменений, оказывающих наибольшее влияние на формирование речного стока на ВЕР.

Цель статьи состоит в том, чтобы: 1) исследовать изменения климата на Восточно-Европейской равнине во второй половине XX – начале XXI в.; 2) на примере р. Дон выявить реакцию внутригодового распределения стока (в особенности, зимнего стока) на климатические изменения; 3) оценить вклад основных климатических факторов в его изменения, а также 4) проанализировать сценарные изменения наиболее значимых факторов, которые могут повлиять на возможные изменения зимнего стока Дона в середине и в конце текущего столетия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изменения среднемесячной приземной температуры воздуха и месячных сумм осадков зимой на территории ВЕР в период 1961–2020 гг. исследовались по данным глобального архива CRU TS4.6 Университета Восточной Англии (University of East Anglia Climatic Research Unit) с пространственным разрешением $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (Harris et al., 2020).

По данным наблюдений за среднесуточной температурой сети метеостанций Росгидромет из архива Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД)¹, были рассчитаны число дней со средней суточной температурой больше 0°C ($T > 0$), в данном исследовании использованное как характеристика зимних оттепелей, а также суммы температур в эти дни за каждый год в период 1961–2020 гг. Доля жидкой фракции осадков, важных для понимания гидрологических изменений, в общем их количестве в среднем за месяц анализировалась по данным наблюдений за суточными осадками из того же архива ВНИИГМИ-МЦД. При расчете сумм жидких осадков использовался критерий отношения осадков к жидкой их фракции при среднесуточной температуре воздуха $>1^\circ\text{C}$. При анализе суточных данных в расчет принимались временные ряды данных на метеостанциях, содержащие не более 10% пропущенных лет за изучаемый период.

К исследованию были также привлечены данные водного эквивалента снега (Snow Water Equivalent, SWE) с 1966 г. из архива наблюдений за характеристиками снега на метеорологических станциях сети Росгидромета². Согласно регламенту маршрутных снегоъемок, наблюдения за характеристиками снежного покрова, включающие измерение запаса воды в снеге (мм), осуществляются через каждые 10 дней в течение холодного периода (а также каждые 5 дней в промежутках между декадами в период интенсивного снеготаяния) отдельно для трех типов угодий (поле, лес и овраги). Были использованы данные SWE на станциях Калач, Павелец и Валуйки (рис. 1). Изменения рассмотренных климатических параметров в среднем за период 1991–2020 гг., а также SWE в 1966–2020 гг. оценивались по сравнению с климатической нормой в период 1961–1990 и 1966–1990 гг. соответственно. Статистическая значимость изменений определялась на уровне 0.05 (t -test Стьюдента).

В статье предпринята попытка выявить влияние наблюдаемых изменений климата на внутригодовое распределение стока р. Дон, с акцентом на оценку влияния климатических факторов на зимний сток. Бассейн Дона до станицы Казанская (координаты местоположения гидропоста – 47.54° с.ш., 40.65° в.д.) с площадью водосбора 102 тыс. км² (см. рис. 1а) был выбран в качестве объекта исследования. Этот бассейн характеризуется относительно небольшим антропогенным влиянием на формирование стока ввиду отсутствия крупных водохранилищ выше по течению. Многолетняя динамика средних расходов воды за половодье и зимнюю межень была исследована по данным наблюдений в упомянутом створе в период 1961–2014 гг. Средний годовой сток Дона в этом створе за весь период наблюдений (1881–2014 гг.) составил 10.2 км³/год. Минимум годового стока, равный 4.4 км³/год, зарегистрированный в 1972 г., во многом отразил последствия острого дефицита осадков из-за обширной сильной летне-осенней засухи на ВЕР, в центре которой оказался бассейн Дона (Черенкова, Кононова, 2012). Наибольший годовой сток по данным того же гидропоста (17.5 км³/год) наблюдался в 1942 г. Зимний сток в статье был рассмотрен более подробно ввиду того, что потепление на ВЕР зимой проходило более быстрыми темпами по сравнению с остальными сезонами (Доклад ..., 2021).

Для оценки вклада основных климатических факторов в многолетнюю изменчивость речного

¹ Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR), 2023б. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942. <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation> (дата обращения 25.08.2023).

² Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных “маршрутные снегомерные съемки”, 2023а. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2013620279. <http://meteo.ru/data/166-snow-surveys> (дата обращения 25.08.2023).

стока в зимний сезон и в его отдельные месяцы был применен метод пошаговой множественной регрессии. Температура почвы не анализировалась в данной работе, поскольку она тесно связана с температурой воздуха. По нашим расчетам по данным метеостанций в бассейне реки корреляция между рядами обеих температур в период 1984–2013 гг. составляла 0.7. В качестве независимых переменных статистической модели использованы: число дней с положительной температурой воздуха и количество жидких осадков в зимние месяцы (с декабря по февраль), осредненные по данным наблюдений на 5 метеостанциях в границах бассейна Дона до Казанской (см. рис. 1а), суммарное количество осенне-зимних осадков (сентябрь–февраль), осадков за осень и за зиму в границах бассейна, а также SWE подекадно в феврале и на первую декаду марта на метеостанциях Павелец и Калач.

Для оценки возможных будущих изменений климата на ВЕР использовались данные международного проекта по сравнению глобальных моделей климата CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project) (O’Neil et al., 2016). Для этого были привлечены проекции будущего климата ансамбля из 37 климатических моделей, которые включают суточные данные о температуре воздуха для периода инструментальных наблюдений и для условий сценарных экспериментов при умеренном (SSP245) и агрессивном (SSP585) антропогенном воздействии на климат. На ВЕР в различные периоды XXI в. были исследованы изменения границ территорий с климатическими условиями, которые потенциально могут привести к заметному перераспределению сезонного стока ввиду активного таяния снега зимой.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменения климата на ВЕР. Важное влияние на формирование стока рек в зимние месяцы на ВЕР, как и для многих равнинных рек умеренных широт Северного полушария, оказывают температуры зимой и осадки предзимнего и зимнего периода. Помимо этого, нельзя недооценивать важную роль изменений сумм отрицательных температур, а также соотношения жидких и твердых осадков. Анализ изменений температур зимой на ВЕР показал, что их статистически значимый рост в период 1991–2020 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. наблюдался на всей исследуемой территории. Как показано на рис. 1б, наиболее сильным зимнее потепление (до 2.2°C) было на северо-западе ВЕР. Несмотря на это, регионы с более теплыми зимами на юге и западе равнины, наиболее часто подверженные зимним оттепелям (см. рис. 1г), были сильнее затронуты изменениями их повторяемо-

сти в последние три десятилетия по сравнению с восточной частью территории (см. рис. 1в). Это объясняется тем, что наблюдаемое зимнее потепление в более холодных регионах ВЕР на севере и востоке не оказало ощутимого влияния на увеличение числа дней с положительными температурами зимой. Установлено, что количество дней с положительными температурами зимой увеличилось на 3–6 дней в центре и на 7–11 дней на юге и западе территории (см. рис. 1в).

Как видно на рис. 2а, на равнине преобладало увеличение суммарного количества осадков за осень и зиму. Наибольший статистически значимый рост осенне-зимних осадков в период 1991–2020 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. отмечен на ее западе (на 10%) и на юго-востоке (до 18%). Увеличение количества осенне-зимних осадков до 6% наблюдалось на Кольском п-ове, в бассейне Печоры и на северо-востоке бассейна Камы. Значимым было также увеличение зимних осадков на западе и в центре ВЕР, не превысившее 10%. Увеличение осенне-зимних осадков на ВЕР произошло в основном за счет ощутимого роста их количества зимой: до 20% на северо-западе и западе равнины и на 30% на ее юго-востоке (рисунок не приводится). Закономерным следствием потепления зимой в последние десятилетия на ЕТР (см. рис. 1б) явилось увеличение доли жидких осадков на большей части равнины. Наиболее значительно на 10–20% жидкие осадки увеличились на западе равнины (рис. 2б), на той территории наблюдения устойчивого снежного покрова, где стало больше оттепелей (см. рис. 1в).

Поскольку ландшафт играет важную роль в накоплении снега, оценки изменений SWE в среднем за период 1991–2020 гг. по сравнению с климатической нормой различаются в лесу и в поле. Так, согласно полученным в поле маршрутным данным, в целом незначительное увеличение запаса воды в снеге наблюдалось севернее 58° с.ш. на 4–20% и восточнее 45° в.д. на 15–30% (рис. 2в). На остальной территории залегания снега отмечалось как увеличение запаса воды в снеге, так и его уменьшение (см. рис. 2в). В то же время, по данным аналогичных измерений, в лесу преобладало увеличение запаса воды в снеге (рис. 2г). Наиболее ярко выраженный значимый рост SWE отмечался в центре (на 25%) и на западе (на 20–35%) (см. рис. 2г). Обнаруженные отличия изменений запаса воды в снеге в поле и в лесу согласуются с выявленными в (Третий ..., 2022) противоположными тенденциями максимальной за зимний период высоты снежного покрова в аналогичных ландшафтах.

Отклик сезонного стока Дона на климатические изменения. С точки зрения оценки изменений рассмотренных выше климатических характеристик на ВЕР, бассейн Дона осенью, зимой

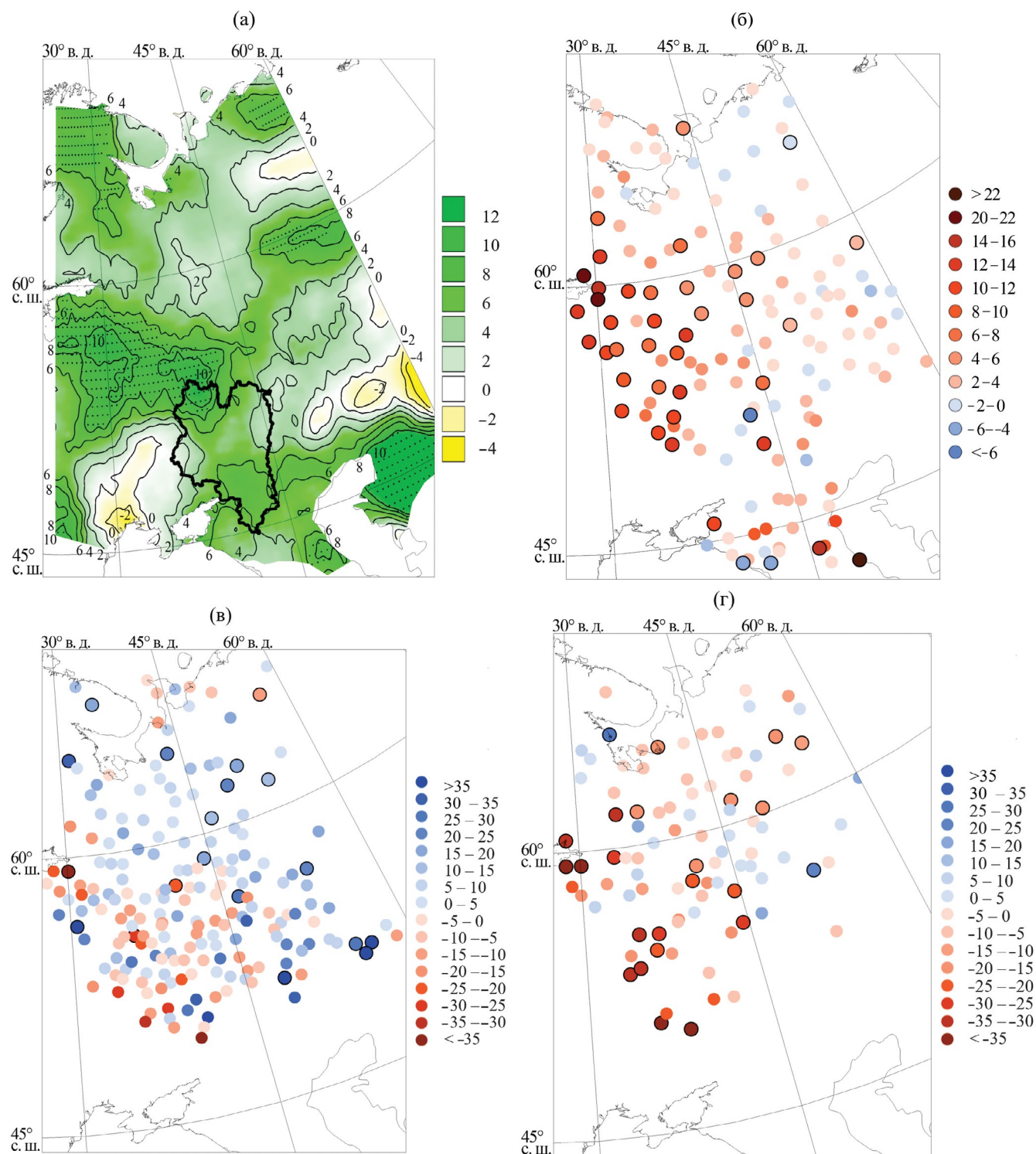


Рис. 2. Изменения суммарных осадков за осень и зиму (%) (а), доли жидких осадков в их общем количестве (%) в среднем за зимние месяцы в период 1991–2020 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. (б), наибольших значений SWE в поле (%) (в) и в лесу (%) (г) в период 1991–2020 гг. по сравнению с 1966–1990 гг. Граница бассейна Дона на рис. 2а показана жирной линией черного цвета. Узлы сетки со статистически значимыми изменениями осадков на уровне 0.05 отмечены точками. Значимые изменения доли жидких осадков и SWE показаны кругами, обведенными черным цветом.

и весной в 1979–2020 гг. находился вне центра наибольших скоростей их изменений на территории России (Доклад ..., 2021). Современное потепление проявилось в бассейне Дона во все сезоны года в 1991–2020 гг. по сравнению с предыдущим тридцатилетием (табл. 1). В то же вре-

мя незначимое увеличение количества осадков в среднем по бассейну Дона наблюдалось во все сезоны, кроме лета (см. табл. 1). Наиболее сильный рост количества осенне-зимних осадков на 10% отмечен на севере бассейна (см. рис. 2а). Необходимо отметить, что наблюдаемое зимнее

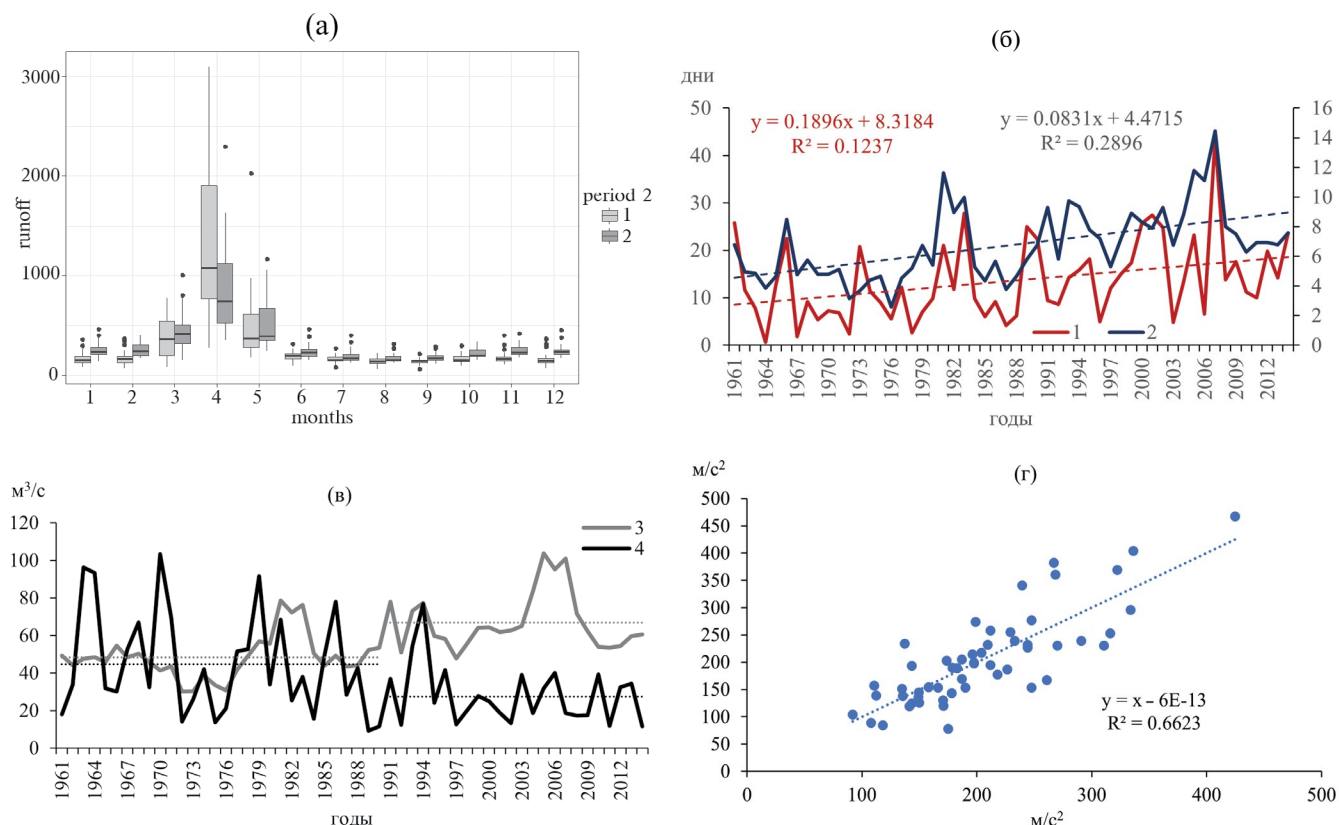


Рис. 3. Диаграмма размаха (а) расходов воды в створе Казанская (км³/год) по месяцам в период 1961–1990 гг. (1) и 1991–2014 гг. (2); многолетняя изменчивость числа дней со среднесуточной температурой >0°C (1) в среднем для метеостанций бассейна Дон до Казанской и стока (2) зимой (б); суммарный сток за осень, зиму и лето (3) и сток в апреле (4) (в); а также связь наблюдаемого и рассчитанного на основе метода пошаговой регрессии среднего расхода воды в январе в период 1961–2014 гг. (г). Линейные тренды на рис. 3б показаны пунктирными линиями, средние значения стока за период 1961–1990 гг. и 1991–2014 гг. на рис. 3в показаны точечными линиями.

потепление в бассейне Дона было более существенным по сравнению с незначительным повышением количества осадков осенью и зимой. Исходя из этого, можно предположить, что температурный фактор сыграл наиболее важную роль в изменении гидрологического режима реки. Для подтверждения (или опровержения) этого предположения попытаемся выявить наиболее важные климатические факторы, влияющие на зимний сток реки, и проанализируем их изменения.

Установлено, что наибольшие снегозапасы в бассейне Дона (рассчитанные по данным маршрутных снегосъемок, проведенных в феврале) снижались на 5–20% в лесу в среднем за 1991–2020 гг. по сравнению с предыдущим двадцатипятилетием (см. рис. 2г). Изменения наибольших снегозапасов в поле на территории бассейна Дона были разнонаправленными. В северной части бассейна на станции Павелец отмечено их слабое уменьшение. На юге бассейна на станции Калач, напротив, наблюдался значительный рост наибольших снегозапасов на 30% (см. рис. 2в). В работе (Титкова, 2019) отмечается, что, согласно данным дистанционного зондирования, на той же территории в пери-

од 1982–2016 гг. наблюдались однонаправленные тенденции снижения снегозапасов с декабря по март с увеличивающейся скоростью от 3 мм/10 лет в декабре до 14 мм/10 лет в марте.

Что же происходило с водным режимом Дона в 1961–2014 гг., его годовым и меженным стоком, стоком весеннего половодья? На фоне увеличения годового стока на 4.8% в период 1991–2014 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. произошло его внутригодовое перераспределение. Увеличение стока наблюдалось во все месяцы года (от наименьшего увеличения на 4.7% в мае до наибольшего роста на 55.7% в январе) кроме апреля, когда сток понизился на 37% (рис. 3а, табл. 1). Средний расход воды зимой в створе Казанская в период 1991–2014 гг. по сравнению с предыдущим тридцатилетием XX в. значительно вырос в 1.5 раза, а весной, напротив, отмечалось его уменьшение в 1.2 раза. Сокращение среднего за половодье (март–май) расхода воды произошло за счет существенного снижения среднего расхода воды в апреле. Доля зимнего стока в период 1991–2014 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. увеличилась с 14 до 20%, а доля стока половодья сократилась с 60 до 47%. Таким образом, можно говорить об увеличении зимнего стока в 1991–

Таблица 1. Изменения среднемесячных расходов воды ($\text{м}^3/\text{с}$) в створе Казанская, а также изменения климата в бассейне Дона в 1991–2014 гг. по сравнению с 1961–1990 гг.

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Среднемесячные расходы воды в 1961–1990 гг.	164.7	174.4	366.3	1341.8	481.7	191.2	157.8	142.3	142.0	161.8	176.9	172.5
Изменения среднемесячных расходов воды (%) в 1991–2014 гг. по сравнению с 1961–1990 гг.	55.7*	45.8*	22.1*	–37.0*	4.7	25.9*	22.7*	22.0*	26.4*	38.1*	39.6*	41.5*
Сезон	зима			весна			лето			осень		
Изменения температур ($^{\circ}\text{C}$) в 1991–2014 гг. по сравнению с 1961–1990 гг.	1.6*			0.9*			1.0*			0.7*		
Изменения количества осадков (%) в 1991–2014 гг. по сравнению с 1961–1990 гг.	6.1			7.6			–6.6			2.9		

Примечание. Статистически значимые изменения на уровне 0.05 отмечены *.

2014 гг. При этом, как уже было сказано выше, сток уменьшился в апреле и увеличился во все остальные месяцы (рис. 3в).

Как показано на рис. 3а, речной сток Дона в апреле в период 1991–2014 гг. по сравнению с базовым периодом 1961–1990 гг. сократился на 37%, а суммарный сток в остальные месяцы года (без весенних месяцев), напротив, вырос на 35%. При этом изменения стока в марте и в мае были незначительными (см. рис. 3а). Полученные результаты согласуются с выводами о внутригодовом перераспределении стока Дона в 1991–2009 гг. по сравнению с 1961–1990 гг., сделанными в работе (Дмитриева, 2011б). Графики межгодовой изменчивости стока Дона в апреле и суммарного стока за осень, зиму и лето, представленные на рис. 3г, показывают слабое отличие их средних величин в период 1961–1990 гг. и статистически значимые различия средних за период 1991–2014 гг. Каковы же могут быть причины различий сезонных изменений гидрологического водного режима реки в последние десятилетия?

Вопросы влияния осенних условий увлажнения, суммы положительных/отрицательных температур зимой и зимних осадков на сток Дона рассматривались в (Кучмент, 1980; Руководство ..., 1989; и др.). Осеннее увлажнение водосбора характеризуется влагозапасами в почве и запасами грунтовых вод зоны активного водообмена. Эти данные, как правило, ограничены, поэтому в качестве основного косвенного показателя предзимнего увлажнения принимают во внимание осенние осадки (в сентябре–ноябре) и температуру воздуха как показатель испарения в эти периоды. Оценка корреляционной связи зимнего стока в бассейне Дона до Казанской с осадками показала, что он наиболее тесно связан с осенним и зимним увлажнением. По нашим расчетам наибольшая доля (30.7%) объясненной дисперсии стока Дона зимой в период 1961–2014 гг. наблюдалась за счет вариаций

суммарных осадков за осень и зиму. Их вклад уменьшился с 34.7% в 1961–1990 гг. до 19.3% в 1991–2014 гг., что указывает на увеличение роли температурного фактора.

Анализ результатов расчетов свидетельствует о том, что основное влияние на формирование речного стока зимой в период 1991–2014 гг. оказывали оттепели, с которыми ассоциируются положительные температуры зимой. Согласованность их изменений подтверждается высокими коэффициентами корреляции между временными рядами стока и числа дней с положительными температурами в среднем за зимние месяцы (табл. 2). В декабре в период 1961–2014 гг. положительные температуры воздуха не оказывали заметного влияния на декабрьский сток. Наиболее тесная связь между обоими рассмотренными характеристиками наблюдалась в январе (см. табл. 2). 23% изменчивости стока Дона в январе в 1961–1990 гг. формировалось под влиянием январских оттепелей, а их вклад в колебания стока в 1991–2014 гг. увеличился вдвое и составлял уже 47%. Оттепели в январе в 1991–2014 гг. оказывали наибольшее значимое влияние на сток в феврале, а также на сток в среднем за зиму (см. табл. 2, рис. 3в). Их роль в формировании зимнего стока в 1991–2014 гг. возросла по данным всех рассмотренных метеостанций (см. табл. 2). При этом на сток в феврале более ошутимое влияние оказывали январские, а не февральские оттепели. Это может быть связано с тем, что в феврале растаявшая в период оттепелей вода не сразу попадает в сток из-за более активного, чем в январе просачивания влаги в почву. Отметим, что высказанное предположение требует дополнительного анализа.

Результаты проведенного анализа свидетельствуют о том, что увеличение среднего числа дней с положительными температурами от трех дней в период 1961–1990 гг. до пяти дней в 1991–2014 гг., выявленное на метеостанциях бассейна

Таблица 2. Коэффициенты корреляции стока на станции Казанская и числа дней со среднесуточной температурой воздуха $>0^{\circ}\text{C}$ ($T > 0$) на метеостанциях бассейна Дона в зимние месяцы в периоды 1961–2014, 1961–1990 и 1991–2014 гг. Результаты для декабря не приведены ввиду их статистической незначимости

Индекс	27823	34123	34139	34026	34247
Название	Павелец	Воронеж	Каменная Степь	Конь-Колодезь	Калач
Широта	53.47	51.42	51.03	52.15	50.42
Долгота	39.15	39.13	40.42	39.15	41.05
Между стоком января и числом дней с $T > 0$ в январе					
1961–2014 гг.	0.6*	0.64*	0.66*	0.64*	0.64*
1961–1990 гг.	0.28	0.45	0.61*	0.41*	0.51*
1991–2014 гг.	0.7*	0.68*	0.63*	0.71*	0.64*
Между стоком в феврале и числом дней с $T > 0$ в январе					
1961–2014 гг.	0.56*	0.64*	0.62*	0.63*	0.65*
1961–1990 гг.	0.36	0.54*	0.6*	0.49*	0.59*
1991–2014 гг.	0.64*	0.65*	0.58*	0.67*	0.62*
Между стоком в феврале и числом дней с $T > 0$ в феврале					
1961–2014 гг.	0.32	0.37	0.41	0.34	0.43
1961–1990 гг.	0.21	0.31	0.40	0.28	0.29
1991–2014 гг.	0.28	0.24	0.28	0.23	0.43
Между стоком в среднем за зиму и числом дней с $T > 0$ в январе					
1961–2014 гг.	0.56*	0.65*	0.65*	0.64*	0.65*
1961–1990 гг.	0.24	0.49	0.59*	0.45	0.53*
1991–2014 гг.	0.71*	0.71*	0.65*	0.73*	0.67*
Между стоком в среднем за зиму и числом дней с $T > 0$ в феврале					
1961–2014 гг.	0.59*	0.59*	0.69*	0.56*	0.64*
1961–1990 гг.	0.42	0.53*	0.69*	0.42	0.59*
1991–2014 гг.	0.67*	0.56*	0.56*	0.57*	0.57*

Примечание. Статистически значимые на уровне 0.05 коэффициенты корреляции отмечены *.

Дона в январе, было достаточным для интенсивного таяния снега и формирования талого стока.

Поскольку в январе отмечались наиболее заметные изменения стока, то далее мы сфокусировались на анализе влияния климатических факторов на сток в этом месяце. Количественные оценки влияния изменений климата на сток Дона в январе, полученные с помощью пошаговой множественной регрессии, показали, что 66.2% его изменчивости в период 1961–2014 гг. объясняется изменениями температуры воздуха и атмосферных осадков (см. рис. 3г). Как следует из табл. 3, почти половина вариаций стока в январе, в период 1961–2014 гг. происходила за счет оттепелей. В то же время вклад суммарных осенне-зимних осадков в изменчивость стока составил чуть более 12%, а жидких осадков – менее 8%.

Описанные выше результаты согласуются с выводами других исследователей о повышении роли оттепелей в формировании зимнего и ве-

сенного стока рек ЕТР в 1970–2000 гг. (Калужный, Лавров, 2012; Лавров, Калужный, 2012).

Отметим, что последнее десятилетие XX в. ассоциируется с быстрым зимним потеплением на ВЕР и увеличением не только общего числа дней с оттепелями, но и числа перерывов в залегании снежного покрова, наибольшего на юге ЕТР (до 20–25 дней по сравнению с предыдущим тридцатилетием) (Кренке и др., 2012). В (Дмитриева и др., 2022) делается важный вывод о том, что в современном климате возрастающая доля жидких осадков в зимний период на Дону приводит к увеличению их стокообразующей способности наряду с тем, что зимний сток стал формироваться в большей степени за счет зимних паводков во время оттепелей. В работе (Киреева, Фролова, 2013) было показано, что увеличение числа оттепелей приводит к невыраженности начала половодья, формируемого в результате таяния снежного покрова. В той же работе подчеркивается, что максимальное сокращение стока половодья наблюдается в верховьях Дона.

Таблица 3. Параметры пошаговой множественной регрессии стока в январе в период 1961–2014 гг.

Предиктор регрессионной модели	Коэффициент регрессии	Стандартная ошибка	Число степеней свободы <i>t</i> (49)	Уровень значимости (<i>p</i> -value)	Коэффициент детерминации (<i>R</i> ²), %
Константа	–29.44	40.6	–0.7	0.47	
Число дней <i>T</i> > 0 в январе	12.9	1.8	7.0	0.00000001	43.1
Суммарные осадки за осень и зиму	0.6	0.2	3.5	0.001	12.2
Количество жидких осадков в декабре	2.6	0.8	3.2	0.003	7.8
Число дней <i>T</i> > 0 в декабре	3.5	1.6	2.1	0.04	3.2

Авторы (Джамалов и др., 2012) обратили внимание на то, что гидрограф рек бассейна Дона во время половодья в начале текущего столетия по сравнению с первой половиной XX в. изменился и стал характеризоваться пологой и распластанной волной с 3–4 максимумами с меньшими на порядок значениями.

Результаты анализа изменчивости разности суммы осадков за декабрь–январь и запасов воды в снеге по данным маршрутных снего计ок на первую пентаду февраля, а также на первую декаду февраля на метеостанциях бассейна Дона показали, что в период начиная с 1990-х годов происходил заметный рост объема воды (рис. 4а, б), который приводил к увеличению расходов воды в течение декабря–января. Как видно на рис. 4а, 4б, этот объем воды уменьшался в последние два десятилетия: с конца 2000-х годов на метеостанциях Калач и Валуйки по данным снегозапасов на первую пентаду и первую декаду февраля соответственно, а также с конца 2010-х годов на метеостанции Павелец по данным снегозапасов на первую декаду февраля. Полученные результаты, которые следует

считать предварительными и требующими последующего уточнения, косвенно указывают на то, что увеличение таяния снега в бассейне Дона с 1990-х до середины 2000-х годов сыграло важную роль в возрастании его зимнего стока, показанного на рис. 3б.

Сценарные изменения характеристик оттепелей, влияющих на зимний сток рек. В предположении продолжения современного потепления на ВЕР, анализ прогнозируемого смещения границ территории интенсивного таяния снега и ощутимого пополнения талых вод в бассейнах крупных рек на ВЕР с использованием результатов климатического моделирования бесспорно представляет научный интерес. Мы исходили из выявленной наибольшей тесноты связи стока с числом дней с положительной температурой воздуха в зимние месяцы, а также из того, что температура воздуха воспроизводится климатическими моделями наиболее надежно. Согласно ансамблевым оценкам моделей климата к середине XXI в. в бассейне Дона возможно продолжение роста повторяемости дней с оттепелями (рис. 5), а следовательно, и увеличения за счет этого зимнего стока, обу-

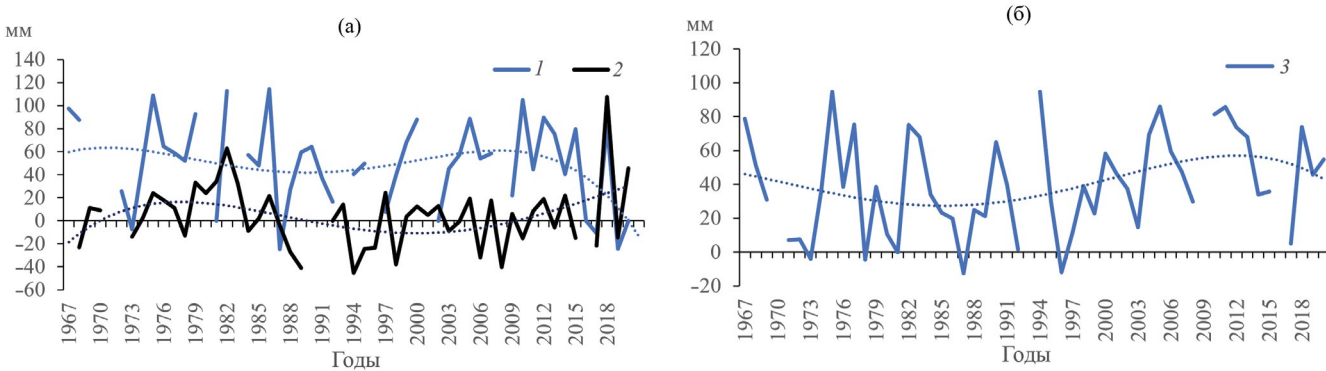


Рис. 4. Многолетняя изменчивость разности суммарных осадков за декабрь–январь и запасов воды в снеге в период 1967–2020 гг., измеренных в поле в окрестностях метеостанций Калач (1) на первую пентаду февраля и Павелец (2) на первую декаду февраля (а), а также в лесу в окрестностях метеостанции Валуйки (3) на первую декаду февраля (б). На рис. 4а и б одиннадцатилетние скользящие средние показаны полужирными линиями, полиномиальные тренды 4-й степени – пунктирными линиями.

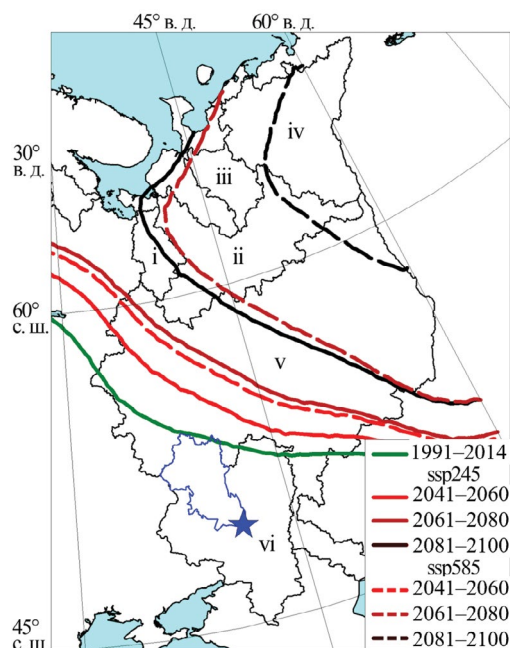


Рис. 5. Пространственное распределение изолинии числа дней с положительной температурой воздуха в январе со значением, равным пяти дням, в среднем за периоды 1991–2014, 2041–2060, 2061–2080 и 2081–2100 гг. в бассейнах рр. Онега (i), Северная Двина (ii), Мезень (iii), Печора (iv), Волга (v), Дон (vi) согласно данным ансамбля климатических моделей проекта CMIP6. Бассейн Дона обведен линией синего цвета, гидрологический пост Казанская отмечен звездочкой.

словленного снеготаянием, но при достаточных для этого запасах воды в снежном покрове. Как показано на рис. 5, модельные прогнозы на XXI в. предполагают продолжение перераспределения сезонного стока в бассейне Дона, а стало быть, дальнейшее распластывание гидрографа весеннего стока за счет таяния снега зимой. При этом наиболее сильные изменения ожидаются во второй половине текущего столетия (см. рис. 5).

Предположительно, область интенсивного снеготаяния в середине зимы, ощутимо пополняющего талые воды, может продвинуться на территорию бассейна Волги и в период 2041–2060 гг. охватить юго-запад бассейна согласно сценарию SSP245, а также почти всю его юго-западную половину в тот же период по сценарию SSP585 и в 2061–2080 гг. по SSP245. Ожидается, что интенсивное снеготаяние будет наблюдаться на юго-востоке бассейна Северной Двины, почти на всей территории бассейна Онеги и большей части территории бассейна Волги в 2081–2100 гг. по сценарию SSP245 и в 2061–2080 гг. по сценарию SSP585. Сценарий SSP585 предполагает, что в 2081–2100 гг. практически во всем бассейне Волги, а также Северной Двины будет происходить интенсивное снеготаяние в январе. Вместе с тем, анало-

гичные изменения ожидаются в бассейне Мезени и на северо-востоке бассейна Печоры только в 2081–2100 гг. по сценарию SSP585. Отметим, что оценки будущих изменений речного стока зимой нуждаются в дополнительном исследовании, поскольку они получены без учета важных для снеготаяния характеристик речных бассейнов, прежде всего, типов ландшафтов, а также без оценки воспроизведения параметров снежного покрова климатическими моделями в середине-конце XXI в.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлено значимое потепление зимой на Восточно-Европейской равнине в среднем на 1.8°C в период 1991–2020 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. Несмотря на увеличение скорости потепления с юго-востока на северо-запад равнины, наиболее сильному росту повторяемости числа дней с положительной температурой воздуха (до 11 дней) подверглись регионы с более теплыми зимами на юге и западе равнины с наиболее частым наблюдением зимних оттепелей по сравнению с восточной частью территории. В то же время на ВЕР преобладало увеличение количества суммарных осадков за осень и зиму с их наибольшим ростом до 6% на Кольском п-ове, в бассейне Печоры и на северо-востоке бассейна Камы, и до 10% на западе и в центре ВЕР. Доля жидких осадков возросла в их общем количестве за зиму, наибольший рост на западе территории исследования не превысил 20%. Обнаружено, что в лесу в целом преобладало уменьшение запаса воды в снеге (до 20–35% в центре и на юго-западе). На территории залегания снега в поле отмечалось его увеличение в северо-восточной части равнины до 20–30%, а его уменьшение в юго-западной части в среднем не превысило 10% и было незначимым.

Потепление в бассейне Дона в среднем за последние 30 лет по сравнению с нормой было значимым во все сезоны, наиболее сильное потепление на 1.6°C отмечено зимой. Слабо выраженное увеличение количества осадков в среднем по бассейну, не превышающее 8%, обнаружено во все сезоны кроме лета. Изменения наибольших снегозапасов в бассейне были разнонаправленными на севере и на юге.

Показано, что внутригодовое распределение стока Дона претерпело заметные изменения в 1991–2014 гг. по сравнению с базовым периодом (1961–1990 гг.), изменилось также соотношение меженного стока и стока половодья. В то время как средний годовой сток реки увеличился всего на 4.8%, его зимний сток увеличился наиболее значительно (особенно в январе на 55.7%), а сток половодья напротив уменьшился (в апреле на 37%). Увеличение стока наблюдалось во все

месяцы года, кроме апреля. Существенное снижение стока в апреле обусловило сокращение стока за половодье.

Многолетняя изменчивость зимнего стока Дона во многом определялась изменениями количества оттепелей, а также осенним и зимним увлажнением. Показано, что наиболее тесная корреляционная связь наблюдалась между речным стоком и числом дней со среднесуточной температурой воздуха $>0^{\circ}\text{C}$ в январе в период 1991–2014 гг. При этом вклад увеличившегося числа дней с оттепелями за зимний период в 1991–2014 гг. по сравнению с базовым периодом в изменчивость зимнего стока вырос в два раза. Напротив, вклад атмосферных осадков за осенне-зимний период, который составлял в 1961–1990 гг. 35%, в 1991–2014 гг. уменьшился почти в два раза. Оценка влияния исследуемых климатических факторов на сток Дона в январе на основе метода пошаговой регрессии показала, что 66% его многолетней изменчивости за 1961–2014 гг. объясняется изменениями температур в зимние месяцы и осадков в осенне-зимний период. Из них практически половина вариаций стока в январе в весь исследуемый период происходила за счет оттепелей, а почти 20% его изменчивости было обусловлено изменениями осадков.

Значительный рост в 1.5–2 раза числа дней с положительными температурами воздуха на метеостанциях бассейна Дона за последние тридцать лет по сравнению с базовым тридцатилетием привел к интенсивному таянию снега и пополнению стока Дона за счет талой воды. Результаты анализа изменений разности суммарных осадков за декабрь–январь и запасов воды в снеге на первую пентаду февраля в бассейне Дона также могут свидетельствовать об увеличении снеготаяния зимой и росте зимнего стока, начиная с 1990-х годов. Анализ полученных результатов показал, что сток в апреле в период 1991–2014 гг. уменьшился за счет изъятия из него доли талой воды, сформированной во время более частых и более интенсивных зимних оттепелей. Это обусловлено существенным ростом числа дней с положительными температурами воздуха и, в меньшей степени, ростом жидких осадков.

Сохранение темпов современного потепления на ВЕР может привести в XXI в. к дальнейшему усилению роли оттепелей в увеличении речного стока зимой и дальнейшему снижению стока половодья, как в бассейне Дона, так и в бассейнах других рек на ВЕР. Согласно проекциям климатических моделей проекта CMIP6, область интенсивного снеготаяния будет вероятно распространяться на юго-запад бассейна Волги в период 2041–2060 гг. согласно сценарию SSP245 (сценарий умеренного воз-

действия на климат), а также в центральную часть этого бассейна: в 2061–2080 гг. по сценарию SSP245 и в 2041–2060 гг. по сценарию SSP585 (сценарий агрессивного антропогенного воздействия на климат). Предполагается, что наиболее сильные изменения повторяемости зимних оттепелей, приводящих к активному снеготаянию, произойдут во второй половине XXI в. В период 2061–2080 гг. по сценарию SSP585 и в 2081–2100 гг. по сценарию SSP245 они могут затронуть не только северо-западную часть бассейна Волги, но и бассейны рек в центральной части Европейского севера России. В период 2081–2100 гг. ожидается практически полный охват ВЕР оттепелями зимой, количество которых ассоциируется с интенсивным снеготаянием.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование изменений климата на Восточно-Европейской равнине, а также в бассейне Дона проведено в рамках темы государственного задания Института географии РАН AAA-A19-1021051403088-5 (FMWS-2024-0001). Реакция стока Дона на климатические изменения изучалась в рамках темы государственного задания Института географии РАН FMWS-2024-0007 (1021051703468-8). Прогностические модельные оценки изменений температурных характеристик зимой, в том числе, на Европейском севере России, осуществлялись при поддержке Российского научного фонда (проект 23-47-00104).

FUNDING

The study of climate change on the East European Plain, as well as in the Don basin, was carried out within the framework of the state assignment for the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences AAAA-A19-1021051403088-5 (FMWS-2024-0001). The response of the Don runoff to climate change was studied within the framework of the state assignment for the Institute of Geography RAS of the Russian Academy of Sciences FMWS-2024-0007 (1021051703468-8). Predictive model assessments of changes in temperature characteristics in winter, including in the European North of Russia, were carried out with the support of the Russian Science Foundation (project no. 23-47-00104).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 598 с.
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Ка-
шутина Е.А., Барабанова Е.А. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России: Ч. 2. Бассейны рек Волги и Дона. М.: МАКС Пресс, 2014. 216 с.

- Георгиади А.Г., Милюкова И.П., Какутина Е.А. Современные и сценарные прогнозы изменения речного стока в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 913–923.
- Джамалов Р.Г., Телегина Е.А., Фролова Н.Л. Изменение зимнего стока рек Европейской части России // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 6. 581 с.
- Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б. Современные изменения водного режима рек в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 6. С. 573–584.
- Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Кричевец Г.Н., Сафронова Т.И., Киреева М.Б., Игонина М.И. Формирование современных ресурсов поверхностных и подземных вод Европейской части России // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 6. С. 623–639.
- Дмитриева В.А. Внутригодовая и многолетняя динамика сезонного речного стока бассейна Верхнего Дона // Аридные экосистемы. 2011а. Т. 17. № 2 (47). С. 23–32.
- Дмитриева В.А. Водные ресурсы в бассейне Верхнего и Среднего Дона в современный период // Изв. РАН. Сер. геогр. 2011б. № 5. С. 74–84.
- Дмитриева В.А., Сушков А.И., Закусилов В.П. Климатическая обусловленность современных гидроэкологических процессов в речных потоках бассейна Верхнего Дона // Вестн. ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2022. № 2. С. 118–127.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М.: Росгидромет, 2021. 104 с.
- Калужный И.Л., Лавров С.А. Основные физические процессы и закономерности формирования зимнего и весеннего стока рек в условиях потепления климата // Метеорология и гидрология. 2012. № 1. С. 68–81.
- Катцов В.М., Говоркова В.А. Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха, осадков и среднегодового стока на территории России: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5) // Тр. ГГО. 2013. № 569. С. 75–97.
- Киреева М.Б., Фролова Н.Л. Современные особенности весеннего половодья рек бассейна Дона // Водное хозяйство России. 2013. № 1. С. 60–76.
- Кренке А.Н., Черенкова Е.А., Чернавская М.М. Устойчивость залегания снежного покрова на территории России в связи с изменением климата // Лёд и снег. 2012. № 1 (117). С. 29–37.
- Кучмент Л.С. Модели процесса формирования речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 143 с.
- Лавров С.А., Калужный И.Л. Физические процессы и закономерности формирования зимнего и весеннего стока рек в условиях изменения климата / Тр. Всероссийской научной конференции “Современные проблемы стохастической гидрологии и регулирования стока”. Москва, 10–12 апреля 2012 г. С. 432–441.
- Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч., Латиф М., Рекнер Э. Связь аномалий климата Евразии и Северной Атлантики с естественными вариациями Атлантической термохалинной циркуляции по долгопериодным модельным расчетам // ДАН. 2008. Т. 419. № 5. С. 687–690.
- Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек, озер и водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 358 с.
- Титкова Т.Б. Изменение климатических условий формирования зимнего стока в бассейне верхнего Дона по спутниковым и наземным данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 147–157.
- Третий оценочный докл. об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. СПб.: Научное издание, 2022. 676 с.
- Черенкова Е.А., Кононова Н.К. Анализ опасных атмосферных засух 1972 и 2010 гг. и макроциркуляционных условий их формирования на территории Европейской части России // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2012. № 565. С. 165–187.
- Черенкова Е.А., Семенов В.А. Связь зимних осадков на территории Европы с изменениями ледовитости Арктического бассейна, температуры океана и атмосферной циркуляции // Метеорология и гидрология. 2017. № 4. С. 38–52.
- Alfieri L., Burek P., Feyen L., Forzieri G. Global warming increases the frequency of river floods in Europe // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2015. Vol. 19. P. 2247–2260.
- Barnett T.P., Adam J.C., Lettenmaier D.P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions // Nature. 2005. Vol. 438. P. 303–309.
- Barredo J.I. Major flood disasters in Europe: 1950–2005 // Nat Hazards. 2007. Vol. 42. P. 125–148.
- Blöschl G., et al. Changing climate shifts timing of European floods // Science. 2017. Vol. 357. P. 588–590.
- Christensen J.H., Christensen O.B. A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century // Clim. Change. 2007. Vol. 81. P. 7–30.
- Dankers R., Feyen L. Climate change impact on flood hazard in Europe: An assessment based on high resolution climate simulations // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. Art. D19105.
- Dankers R., Feyen L. Flood hazard in Europe in an ensemble of regional climate scenarios // J. of Geophys. Res. 2009. Vol. 114. P. 1–16.
- Engel H. The flood events of 1993/1994 and 1995 in the Rhine River basin. Proceedings of the Conference held at Anaheim, California, June 1996. IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports, 1997. № 239. P. 21–32.
- Frolova N., Agafonova S., Nesterenko D. Water and ice regimes of the rivers of European Russia under climate change. Hydro-climatology: Variability and Change. Proceedings of symposium J-H02 held during IUGG2011 in Melbourne, Australia, July 2011. IAHS Publ. 2011. № 344. P. 63–68.

- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Borodin O.O., Gusarov A.V. Water flow changes in the Don river (European Russia) during 1891–2019 // *Geography, Environment, Sustainability*. 2023. Vol. 2. № 16. P. 6–17.
- Harris I., Osborn T.J., Jones P., et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset // *Sci Data*. 2020. Vol. 7. Art. 109.
- Hurrell J.W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperature and precipitation // *Science*. 1995. Vol. 269. P. 676–679.
- IPCC, 2023. Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, H. Lee, J. Romero (Eds.)*. Geneva, Switzerland, 2023. P. 35–115. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6–9789291691647>
- Knight J.R., Folland C.K., Scaife A.A. Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation // *Geophysical Res. Lett.* 2006. Vol. 33. Art. L17706.
- Kundzewicz Z., Piskwar I., Brakenridge R. Large floods in Europe, 1985–2009 // *Hydrological Sciences J.* 2013. Vol. 58. P. 1–7.
- Lehner B., Döll P., Alcamo J., Henrichs T., Kaspar F. Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis // *Climatic Change*. 2006. Vol. 75. P. 273–299.
- O’Neil B.C., et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6 // *Geosci. Model Dev.* 2016. Vol. 9. № 9. P. 3461–3482.
- Petoukhov V., Semenov V.A. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. Art. D21111.
- Sarauskiene D., Kriauciuniene J., Reihan A., Klavins M. Flood pattern changes in the rivers of the Baltic countries // *J. Environ. Eng. Landsc.* 2015. Vol. 23. P. 28–38.
- Semenov V.A., Latif M., Dommenges D., Keenlyside N.S., Strehz A., Martin T., Park W. The Impact of North Atlantic-Arctic Multidecadal Variability on Northern Hemisphere Surface Air Temperature // *J. Climate*. 2010. Vol. 23. P. 5668–5677.
- Sutton R.T., Dong B. Atlantic Ocean influence on a shift in European climate in the 1990s // *Nat. Geoscience*. 2012. Vol. 5. P. 788–792.
- Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A. Seasonal changes in precipitation extremes in Russia for the last several decades and their impact on vital activities of the human population // *Geography, Environment, Sustainability*. 2017. Vol. 10. № 4. P. 69–82.

Observed and Expected Climate Changes on the East European Plain and Their Influence on River Flow (Case Study of the Don River)

E. A. Cherenkova^{a, b, *}, A. G. Georgiadi^a, A. N. Zolotokrylin^a, and E. A. Kashutina^a

^a*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: cherenkova@igras.ru

The paper examines modern climate change over the East European Plain, and the response of river runoff to them in the Don basin. A significant warming of 1.8°C on average in winter at the level during the 1991–2020 period compared to 1961–1990 led to an increase in the number of days with positive air temperatures. There was an increase in the amount of total precipitation in autumn and winter, as well as the share of liquid precipitation in the winter season, with the greatest increase in the west and center of the study area. In the Don basin during the same period, the greatest warming in winter by 1.6°C was observed compared to other seasons and a slight increase in precipitation in all seasons except summer. There has been a noticeable intra-annual redistribution of the Don runoff since the 1990s compared to 1961–1990, which has changed the ratio of low-water vs high-water runoff. A significant increase in runoff was observed in all months of the year except April and May; in April it decreased significantly. The largest increase in runoff by 55.7% was observed in January. It was showed that almost half of the variations in Don runoff in January were due to thaws, and about 20% of its variability was due to changes in precipitation in autumn and winter, including liquid precipitation in December. The contribution of thaws in the formation of winter runoff, the frequency of which has increased 2.6 times over the past thirty years compared to the previous period, has doubled, and the influence of total precipitation, on the contrary, has decreased. Projections of climate models in the 21st century suggest a gradual advance of the border of the observation area of winter thaws to the northeast of the plain, leading to active snowmelt, an increase in river flow in winter and a decrease in floods. According to scenarios of moderate and aggressive anthropogenic impact on climate in the period 2061–2100, the designated boundaries may shift not only to the northwestern part of the Volga basin, but to the river basins of the European north of Russia as well.

Keywords: global warming, air temperature, precipitation, river runoff, thaws, climate models, East European Plain

REFERENCES

- Alfieri L., Burek P., Feyen L., Forzieri G. Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2015, vol. 19, pp. 2247–2260.
- Barredo J.I. Major flood disasters in Europe: 1950–2005. *Nat. Hazards*, 2007, vol. 42, pp. 125–148.
- Barnett T.P., Adam J.C., Lettenmaier D.P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 2005, vol. 438, pp. 303–309.
- Blöschl G., et al. Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, 2017, vol. 357, pp. 588–590.
- Cherenkova E.A., Kononova N.K. Analysis of dangerous atmospheric droughts of 1972 and 2010 and macrocirculation conditions of their formation on the territory of the European part of Russia. *Tr. Glavn. Geofiz. Observ. Voeikova*, 2012, no. 565, pp. 165–187. (In Russ.).
- Cherenkova E.A., Semenov V.A. A link between winter precipitation in Europe and the Arctic Sea ice, sea surface temperature, and atmospheric circulation. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, pp. 238–247. <https://doi.org/10.3103/S1068373917040045>
- Christensen J.H., Christensen O.B. A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Clim. Change*, 2007, vol. 81, pp. 7–30.
- Dankers R., Feyen L. Climate change impact on flood hazard in Europe: An assessment based on high resolution climate simulations. *J. Geophys. Res.*, 2008, vol. 113, art. D19105.
- Dankers R., Feyen L. Flood hazard in Europe in an ensemble of regional climate scenarios. *J. Geoph. Res.*, 2009, vol. 114, pp. 1–16.
- Dmitrieva V.A. Intraannual and multiyear dynamics of seasonal river runoff. *Arid Ekosys.*, 2011a, vol. 17, no. 2, pp. 87–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S2079096111020028>
- Dmitrieva V.A. Water resources in the basin of Upper and Middle Don in the modern climate. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2011b, no. 5, pp. 74–84. (In Russ.).
- Dmitrieva V.A., Sushkov A.I., Zakusilov V.P. Climatic conditionality of modern hydroecological processes in river flows of the Upper Don basin. *Vestn. VSU, Ser.: Geogr., Geoekol.*, 2022, no. 2, pp. 118–127. (In Russ.).
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2020 god* [Report on Climate Features in the Russian Federation for 2020]. Moscow: Rosgidromet, 2021. 104 p.
- Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B. Current changes in river water regime in the Don River Basin. *Water Resour.*, 2013, vol. 40, pp. 573–584. <https://doi.org/10.1134/S0097807813060043>
- Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Krichevets G.N., et al. The formation of present-day resources of surface and subsurface waters in European Russia. *Water Resour.*, 2012, vol. 39, pp. 623–639. <https://doi.org/10.1134/S0097807812060036>
- Dzhamalov R.G., Telegina E.A., Frolova N.L. Winter runoff variations in European Russia. *Water Resour.*, 2015, vol. 42, no. 6, pp. 758–765. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0097807815060032>
- Engel H. The flood events of 1993/1994 and 1995 in the Rhine River basin. In *Proc. of the conf. held at Anaheim, California, June 1996*. IAHS Publ., 1997, pp. 21–32.
- Frolova N., Agafonova S., Nesterenko D. Water and ice regimes of the rivers of European Russia under climate change. Hydro-climatology: Variability and Change. In *Proc. of symposium J-H02 held during IUGG2011 in Melbourne, Australia, July 2011*. IAHS Publ., 2011, pp. 63–68.
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P., Kashutina E.A., Barabanova E.A. *Sovremennye i stsennarnye izmeneniya rechnogo stoka v basseinakh krupneishikh rek Rossii: Chast' 2. Basseiny rek Volgi i Dona* [Modern and Scenario Changes in River Flow in the Basins of the Largest Rivers in Russia. Part 2. Basins of the Volga and Don Rivers]. Moscow: “Max Press” Publ., 2014. 216 p.
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Borodin O.O., Gusarov A.V. Water flow changes in the Don River (European Russia) during 1891–2019. *Geogr., Environ., Sustain.*, 2023, vol. 2, no. 16, pp. 6–17.
- Geordiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. Contemporary and scenario changes in river runoff in the Don basin. *Water Resour.*, 2020, vol. 47, pp. 913–923. <https://doi.org/10.1134/S0097807820060068>
- Harris I., Osborn T.J., Jones P., et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci. Data*, 2020, vol. 7, art. 109.
- Hurrell J.W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperature and precipitation. *Science*, 1995, vol. 269, pp. 676–679.
- IPCC. *Sections. In Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Lee H., Romero J., Eds. Geneva: IPCC, 2023, pp. 35–115. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Kalyuzhnyi I.L., Lavrov S.A. Basic physical processes and regularities of winter and spring river runoff formation under climate warming conditions. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2012, vol. 37, pp. 47–56. <https://doi.org/10.3103/S1068373912010074>
- Kattsov V.M., Govorkova V.A. Expected changes in surface air temperature, precipitation and average annual runoff on the territory of Russia: results of calculations using the ensemble of global climate models (CMIP5). *Tr. GGO*, 2013, no. 569, pp. 75–97. (In Russ.).
- Kireeva M.B., Frolova N.L. Modern features of the spring flood of rivers in the Don basin. *Vodn. Khoz. Ross.*, 2013, no. 1, pp. 60–76. (In Russ.).
- Knight J.R., Folland C.K., Scaife A.A. Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Geoph. Res. Lett.*, 2006, vol. 33, art. L17706.

- Krenke A.N., Cherenkova E.A., Chernavskaya M.M. Stability of snow cover in Russia in connection with climate change. *Led Sneg*, 2012, no. 1, pp. 29–37. (In Russ.).
- Kuchment L.S. *Modeli protsessy formirovaniya rechnogo stoka* [Models of the River Flow Formation Process]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980. 143 p.
- Kundzewicz Z., Piskwar I., Brakenridge R. Large floods in Europe, 1985–2009. *Hydrolog. Sci. J.*, 2013, vol. 58, pp. 1–7.
- Lavrov S.A., Kalyuzhny I.L. Physical processes and patterns of formation of winter and spring river runoff under climate change conditions. In *Tr. Vseross. Nauch. Konf. "Sovremennyye problemy stokhasticheskoi gidrologii i regulirovaniya stoka"*, Moskva, 10–12 aprelya 2012 g. [Proc. of the All-Russian Sci. Conf. "Modern Problems of Stochastic Hydrology and Flow Regulation", Moscow, April 10–12]. Moscow, 2012, pp. 432–441. (In Russ.).
- Lehner B., Döll P., Alcamo J., Henrichs T., Kaspar F. Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis. *Clim. Change*, 2006, vol. 75, pp. 273–299.
- Mokhov I.I., Semenov V.A., Khon V.C., et al. Connection between Eurasian and North Atlantic climate anomalies and natural variations in the Atlantic thermohaline circulation based on long-term model calculations. *Dokl. Earth Sci.*, 2008, vol. 419, pp. 502–505. <https://doi.org/10.1134/S1028334X08030331>
- O'Neil B.C., et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, 2016, vol. 9, no. 9, pp. 3461–3482.
- Petoukhov V., Semenov V.A. A link between reduced Barents-Kara Sea ice and cold winter extremes over northern continents. *J. Geophys. Res.*, 2010, vol. 115, art. D21111.
- Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 1. Dolgosrochnye prognozy elementov vodnogo rezhima rek, ozer i vodokhranilishch* [Guide to Hydrological Forecasts. Vol. 1. Long-Term Forecasts of Elements of the Water Regime of Rivers, Lakes and Reservoirs]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. 358 p.
- Sarauskiene D., Kriauciuniene J., Reihan A., Klavins M. Flood pattern changes in the rivers of the Baltic countries. *J. Environ. Eng. Landsc.*, 2015, vol. 23, pp. 28–38.
- Semenov V.A., Latif M., Dommenges D., Keenlyside N.S., Strehz A., Martin T., Park W. The Impact of North Atlantic-Arctic Multidecadal Variability on Northern Hemisphere Surface Air Temperature. *J. Climate*, 2010, vol. 23, pp. 5668–5677.
- Sutton R.T., Dong B. Atlantic Ocean influence on a shift in European climate in the 1990s. *Nat. Geosci.*, 2012, vol. 5, pp. 788–792.
- Titkova T.B. Change in climatic conditions of winter runoff formation in the Upper Don basin revealed by satellite and ground data. *Sovrem. Probl. Distant. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2019, vol. 16, no. 1, pp. 147–157. (In Russ.).
- Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [Third Assessment Report on Climate Change and its Consequences on the Territory of the Russian Federation]. Kattsov V.M., Ed. St. Petersburg: Naukoemkie Tekhnologii, 2022. 676 p.
- Vodnye resursy Rossii i ikh ispol'zovanie* [Water Resources of Russia and Their Use]. Shiklomanov I.A., Ed. St. Petersburg: GGI, 2008. 598 p.
- Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A. Seasonal changes in precipitation extremes in Russia for the last several decades and their impact on vital activities of the human population. *Geogr., Environ., Sustain.*, 2017, vol. 10, no. 4, pp. 69–82.

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

УДК 551.582

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ КЛИМАТИЧЕСКИХ РИСКОВ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ И ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2024 г. В. В. Дроздов^{1, *}, В. А. Лобанов¹, А. А. Окуличева¹

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: vladidrozhdov@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.01.2024 г.

После доработки 15.03.2024 г.

Принята к публикации 16.05.2024 г.

Выполнен анализ многолетних данных сезонных, месячных и средних за год значений температур воздуха, атмосферных осадков и скоростей ветра. Показано, что за последние 20–30 лет наблюдается сезонная внутригодовая перестройка температурных условий: зимы становятся более мягкими, а лето — менее жарким. Результаты кластерного анализа гидрометеорологических данных позволили установить, что в отношении значений температуры воздуха в среднем за зиму наиболее выраженные их особенности характерны для самых западных поселений Ленинградской области, например, г. Кингисеппа. Это может быть связано с их большей близостью к открытой акватории Финского залива, оказывающей тепляющее влияние. Наиболее холодными являются восточные районы Ленинградской области, удаленные от значительных водных акваторий, которые и формируют второй по значимости кластер: в него вошли территории городов Тихвин, Лодейное Поле и район с. Винницы. Наиболее ветренными районами, где наиболее часто наблюдаются скорости ветра более 20 м/с, представляющие значительную опасность для функционирования различных техногенных объектов, включая линии электропередач, порты и водный транспорт, являются прибрежные территории Финского залива, включая, прежде всего, города Выборг, Санкт-Петербург, Кингисепп. Сильные ветра разрушительно воздействуют также на лесные экосистемы, приводят к ветровалам, особенно в хвойных лесах на песчаных почвах, в том числе в Курортном районе Санкт-Петербурга вдоль северного побережья Невской губы. Увеличение интенсивности и частоты атмосферных осадков приводит к росту объемов сточных вод, что может угрожать системам водоотведения Санкт-Петербурга и поселений Ленинградской области. Обоснована необходимость анализа текущих возможностей городских очистных сооружений и увеличения их производительности. Нормированы значения гидрометеорологических характеристик, описывающих опасные для жизнедеятельности населения Санкт-Петербурга и Ленинградской области природные процессы. Обоснованы методические подходы для комплексной оценки риска при изменениях климата, которые в дальнейшем могут быть использованы при подготовке паспортов климатической безопасности Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Ключевые слова: городской климат, опасные гидрометеорологические явления, климатическая безопасность, кластерный анализ, методология оценки риска, Северо-Западная Россия

DOI: 10.31857/S2587556624030084 EDN: SOEXQA

ВВЕДЕНИЕ

По данным Всемирной метеорологической организации, период с 2015 по 2020 г. может считаться самым теплым шестилетием, а период с 2011 по 2020 г. — самым теплым десятилетием за всю историю инструментальных регулярных наблюдений. Данные гидрометеорологических наблюдений в пределах территории Европейской России свидетельствуют, что, начиная с 1980-х, годов возникла общая тенденция к потеплению климата со

своими региональными особенностями (Анисимов и др., 2020; Лобанов, Шадурский, 2013; Павловский, Менжулин, 2013; Тишков и др., 2018). Увеличились повторяемость опасных гидрометеорологических явлений, прежде всего штормовых ветров (более 20 м/с), экстремальных атмосферных осадков, наводнений на реках и в прибрежной морской зоне, приводящих к значительному социально-экономическому ущербу (Дроздов, 2009; Дроздов и др., 2023; Павловский, 2013; Павловский, Менжулин, 2013). Кроме того, в послед-

ние годы волны тепла в летний период стали причиной неблагоприятных последствий для здоровья населения, особенно в крупных городах (Акимов, Соколов, 2016; Ревич, 2019, 2023; Третий ..., 2022).

В рамках реализации Национального плана мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 г., утвержденного распоряжением Правительства Российской Федерации от 25 декабря 2019 г. № 3183-р, на территории России сформирована система адаптации к изменениям климата, включающая национальный, отраслевые и региональные планы адаптации, а также некоторые методические основы разработки адаптационных мероприятий. В процессе оценки климатических рисков применительно к различным отраслям экономики и регионам (субъектам РФ) выявляются опасные климатические факторы, подверженность и уязвимость к ним природных и техногенных систем.

11 марта 2023 г. Распоряжением Правительства Российской Федерации № 559-р утвержден Национальный план мероприятий второго этапа адаптации к изменениям климата на период до 2025 г. Данный план предусматривает 17 мероприятий, направленных на научно-методическое, правовое, организационное и информационное обеспечение необходимых адаптационных мер. Предполагается разработка национальных стандартов в сфере адаптации к изменениям климата; создание системы менеджмента в области климатических рисков на уровне организаций; оценка возможного ущерба от воздействия климатических факторов; разработка и реализация программ высшего образования, программ профессиональной переподготовки и повышения квалификации в области климатических рисков и адаптации к изменению климата; разработка наукоемких технологических решений и другие мероприятия¹.

При этом разработанные ранее планы адаптации будут совершенствоваться для практической реализации, в том числе на основе результатов оценки риска. Климатический риск может рассматриваться как комплексная характеристика вероятности возникновения опасных для функционирования природных и техногенных систем значений гидрометеорологических характеристик с оценкой возникающего при этом ущерба.

Целью работы является оценка изменчивости некоторых гидрометеорологических характеристик, представляющих опасность для функционирования природно-техногенных систем Санкт-Петербурга и административных районов Ленинградской области, а также разработка научно-методических основ для оценки климатических рисков.

ОСОБЕННОСТИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ И НА ТЕРРИТОРИИ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

В соответствии с содержанием СП 131.13330.2020 “Строительная климатология СНиП 23-01-99” климат Санкт-Петербурга соответствует условиям “относительно умеренного” климатического подрайона ПБ. Согласно классификации климатов известного климатолога В.П. Кёппена (1846–1940), разработанной в конце XIX в., Санкт-Петербург расположен в зоне влажного континентального климата с теплым летом с равномерным увлажнением. Основные его характеристики: умеренно холодный климат, без сухого сезона, с устойчивым снежным покровом в зимний период; имеются условия для произрастания лиственных лесов. Однако в последней четверти XX в. и в первой четверти XXI в. стали наблюдаться выраженные климатические изменения. Актуализированные климатические нормы, рассчитанные за период с 1991 по 2020 г. в соответствии с приказом Росгидромета № 64 от 18.02.2022, для Санкт-Петербурга имеют следующие современные значения: средняя годовая температура приземного воздуха 6.3°C; средняя температура наиболее жаркого месяца (июля) 19.1°C; средняя температура наиболее холодного месяца (февраля) –4.8°C; абсолютный максимум 37.1°C; абсолютный минимум –35.9°C; количество дней с осадками не менее 10 мм – 15; уровень моря осредненный по четырем постам (Кронштадт, Лисий Нос, Ломоносов, Невская Устьевая) – 10.9 см в Балтийской системе высот (БСВ), скорость роста уровня моря – около 4 мм/год. По сравнению с периодом 1960–1990 гг. в период с 1991 по 2020 г. среднее годовое количество атмосферных осадков возросло с 550 мм до 657 мм, при этом в отдельные годы наблюдались более высокие значения. Так, в 2003 г. был зафиксирован абсолютный максимум за весь имеющийся ряд наблюдений – 912 мм в год. Высокие значения регистрировались также в 2009–2010 гг. – 803 и 812 мм, в 2012 г. – 863 мм, в 2016–2017 гг. – 866 и 821 мм в год соответственно. Наблюдается увеличение количества дней с сильными осадками (более 15 мм/сут). Климат Санкт-Петербурга становится более влажным.

В зимний период изменение климата в Санкт-Петербурге приводит к более частому переходу температуры через 0°C, при котором происходит более частое таяние снега и как следствие – увеличение интенсивности образования гололеда. Увеличилась повторяемость морских нагонных наводнений. Смещается максимум их повторяемости с осени на зиму. (Малинин, Гурьянов, 2015). Увеличение повторяемости

¹ <http://www.meteo.nw.ru/articles> (дата обращения 22.09.2023).

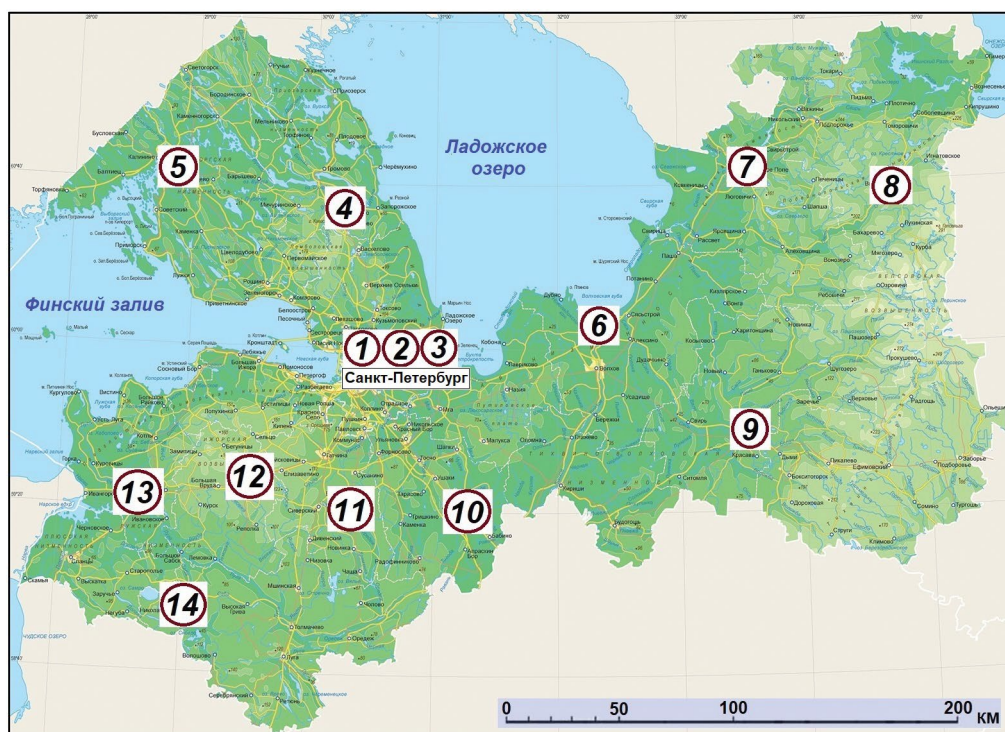


Рис. 1. Схема расположения станций многолетних наблюдений за температурой воздуха, атмосферными осадками и скоростями ветра.

1 – г. Санкт-Петербург; 2 – пос. Воейково; 3 – г. Шлиссельбург; 4 – пос. Сосново; 5 – г. Выборг; 6 – г. Новая Ладога; 7 – г. Лодейное Поле; 8 – с. Винницы; 9 – г. Тихвин; 10 – г. Любань; 11 – дер. Белогорка; 12 – г. Волосово; 13 – г. Тихвин; 14 – дер. Николаевское.

и продолжительности нагонных наводнений негативно сказывается на состоянии приморской зоны города и на реализации стратегических целей по развитию Санкт-Петербурга как морской столицы России, повышению его роли как крупного транспортно-логистического центра. В целом, если наблюдаемые тенденции сохранятся, то к середине XXI в. климатические условия Санкт-Петербурга могут соответствовать уже “морскому” типу климата.

Увеличение частоты и интенсивности выпадения атмосферных осадков приводит к росту объемов образующихся вод ливневой канализации, что может угрожать системам водоотведения и качеству питьевого водоснабжения в Санкт-Петербурге и районных центрах Ленинградской области.

В настоящее время, по данным ФГБУ “Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды”, на территории Санкт-Петербурга наблюдаются 18 метеорологических и 5 гидрологических и морских опасных природных явлений. Для проведения исследования изменений климата на территории Ленинградской области в Российском государственном гидрометеорологическом университете (РГГМУ) сформированы региональные базы данных многолетних рядов наблюдений по максимальным в году расходам воды на реках, по

максимальным суточным осадкам и по среднемесячным значениям температур воздуха апреля со статистической обработкой (Свидетельства о государственной регистрации № 2022622775 и № 2022622969, РГГМУ, 2022 г.), на основе данных^{2,3}. Многолетние данные по температуре воздуха в Санкт-Петербурге получены из открытых источников⁴.

Выполнен анализ данных многолетних наблюдений за температурой воздуха, атмосферными осадками и скоростями ветра с построением и оценкой трендов на 14 станциях наблюдений, расположение которых представлено на рис. 1.

На рис. 2–5 представлена многолетняя изменчивость в Санкт-Петербурге и Ленинградской области важнейших гидрометеорологических характеристик, которые могут выступать в качестве источников риска, а именно: температура воздуха в среднем за зиму, за лето, за январь и июль; средние за год максимальные месячные значения скорости ветра; величины максимальных атмосферных осадков за 1 сутки в месяц, в среднем за год.

На рис. 2 представлена изменчивость температур воздуха в Санкт-Петербурге. Визуально заметен противофазный характер изменчиво-

² <http://www.giss.nasa.gov> (дата обращения 02.03.2024).

³ <http://www.meteo.nw.ru/articles> (дата обращения 22.09.2023).

⁴ <http://www.giss.nasa.gov> (дата обращения 02.03.2024).

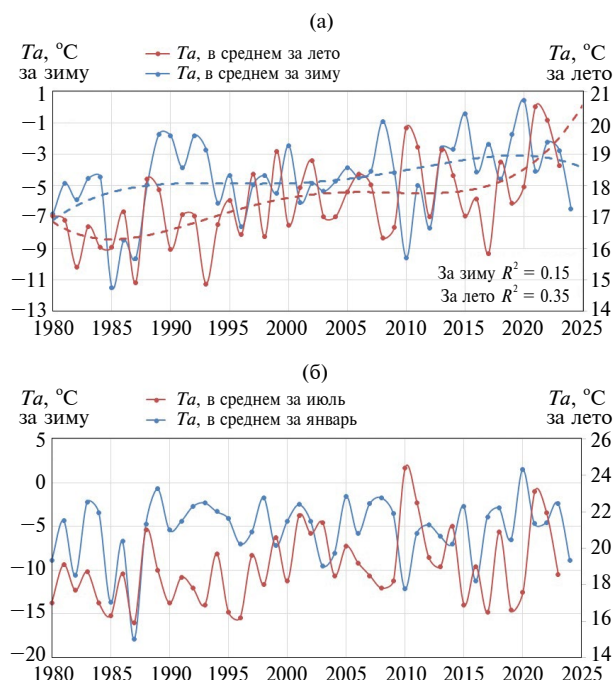


Рис. 2. Многолетняя изменчивость температур воздуха в Санкт-Петербурге: (а) изменения температуры воздуха в среднем за лето и зиму; (б) изменения температуры воздуха в среднем за январь и июль. Пунктирными линиями на рис. 2а показаны полиномиальные тренды по пятилетиям. T_a — температура воздуха, °С.

сти в отношении средней за зиму и за лето температуры воздуха, а также в среднем за январь и июль, что особенно стало проявляться в начале XXI в. Для оценки и визуализации наблюдаемых изменений выполнено построение полиномиальных трендов по 5-летиям. Линейный, логарифмический и экспоненциальный тренды хорошо подходят для описания тенденций роста и падения. Полиномиальные же тренды применяются для описания значений временных рядов, попеременно возрастающих и убывающих, что типично для динамики гидрометеорологических характеристик Санкт-Петербурга и большинства районов Ленинградской области, так как единой общей устойчивой тенденции, как правило, не обнаруживается. Полиномиальный тренд способен показать более детально специфику межгодовой и многолетней изменчивости.

При оценке значимости нелинейного тренда рассчитывается корреляционное отношение r , а затем осуществляется проверка нулевой гипотезы как коэффициента корреляции. По величине коэффициента корреляции и корреляционного отношения легко определить коэффициент детерминации (R^2), показывающий вклад тренда в описание дисперсии функции отклика. На всех рис. 2а, 3, 4а, в, где построены полиномиальные тренды, указаны и значения соответствующих коэффициентов детерминации (R^2). По коэффициенту детерминации можно оценить значи-

мость тренда. При уровне значимости $\alpha = 0.05$, $R^2_{\text{крит.}} = 4 / (n + 2)$, где n — продолжительность используемого ряда наблюдений. Если полученное значение коэффициента детерминации превосходит критическое, тренд может быть признан значимым (Малинин, 2020). При длине используемых рядов в 40–43 года, критическое значение составляет около 0.1. Например, R^2 для изменений температуры воздуха в среднем за лето в Санкт-Петербурге с 1980 по 2023 г., обозначенный на рис. 2а, равен 0.35, тренд может быть признан значимым. Расчеты и построение полиномиальных трендов производились в программе Excel.

Как видно из рис. 3, в городах Выборге (север Ленинградской области), Тихвине (восток области), в Кингисепе (запад области), а также в районе дер. Николаевское (юго-запад области) наблюдается рост температуры в среднем за зиму и за январь, начиная с 2010 г. Наиболее выраженный значимый положительный полиномиальный тренд характерен для Выборга и Тихвина. Одновременно с этим стало наблюдаться снижение температур в среднем за лето и июль. Аналогичные тенденции характерны для изменчивости температуры воздуха и на всех других анализируемых станциях.

Таким образом, на фоне общего потепления применительно к средним годовым значениям температуры воздуха в Ленинградской области и в Санкт-Петербурге за последние 20–30 лет наблюдается сезонная внутригодовая перестройка температурных условий, сопровождающаяся тем, что зимы становятся более мягкими, а лето — менее жарким, что является типичным для морского климата умеренных широт.

Представленные на рис. 4 данные об изменчивости средних за год максимальных за каждый месяц скоростей ветра свидетельствуют, что в Ленинградской области имеются значительные территориальные различия по этой характеристике. Как видно из рис. 4а, на севере области в районе г. Выборга скорости ветра оказываются существенно выше в среднем (около 18.5 м/с), чем на востоке в районе г. Тихвина (около 15 м/с) за анализируемый период. Кроме того, заметна достаточно выраженная тенденция, подтверждаемая значимым полиномиальным трендом, к снижению скоростей ветра в г. Тихвин Ленинградской области. В соответствии с этим возможно ожидать в северных районах Ленинградской области больший ущерб для жилищно-коммунального хозяйства. На западе Ленинградской области (Кингисепп), а также в Санкт-Петербурге и на южном побережье Ладожского озера (Новая Ладога) формируются в целом общие тенденции, выражающиеся в уменьшении средних за год максимальных за каждый месяц скоростей ветра, начиная с 1980-х годов — от довольно высоких значений 18–21 до 15–16 м/с в настоящее время.

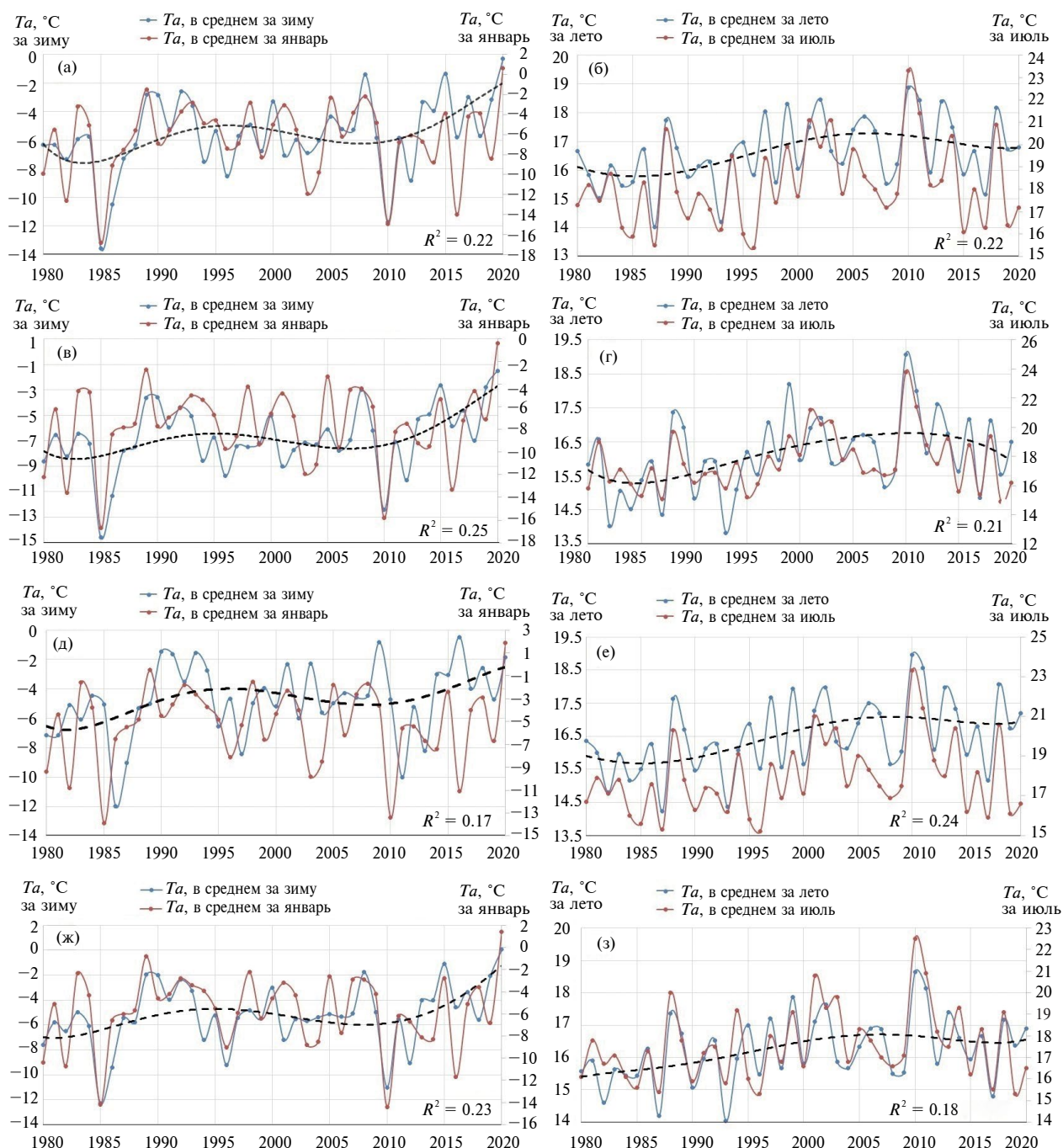


Рис. 3. Многолетняя изменчивость температур воздуха на севере (г. Выборг), востоке (г. Тихвин), западе (г. Кингисепп) и юге (дер. Николаевское Лужского района) Ленинградской области: температура воздуха в среднем за зиму, за январь в Выборге (а), Тихвине (в), Кингисеппе (д) и Николаевском (ж) и в среднем за лето, за июль в Выборге (б), Тихвине (г), Кингисеппе (е) и Николаевском (з). Пунктирной линией показан полиномиальный тренд по пятилетиям. T_a – температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$.

На рис. 5 представлена многолетняя изменчивость величин максимальных атмосферных осадков за 1 сутки в месяц в среднем за год. Значения атмосферных осадков демонстрируют значительную межгодовую изменчивость на всех анализируемых станциях. Весьма значительные (более 50 мм) величины атмосферных осадков, выпадающие за 1 сутки, способные привести к неблагоприятным последствиям,

причем внезапным, были зарегистрированы в Выборге (54 мм, август 1981 г.), Кингисеппе (55 мм, июль 2011 г.; 57 мм, август 2016 г.), Санкт-Петербурге (53 мм, август 1991 г.; 57 мм, июль 1993 г.; 59 мм, июль 2000 г.), Тихвине (54 мм, июль 2000 г.; 67 мм, июль 1967 г.); Новой Ладого (56 мм, август 1983 г.; 53 мм, август 1984 г.; 63 мм, август 2016 г.), дер. Николаевское (58 мм, июль 1999 г.; 63 мм, июль 2001 г.).

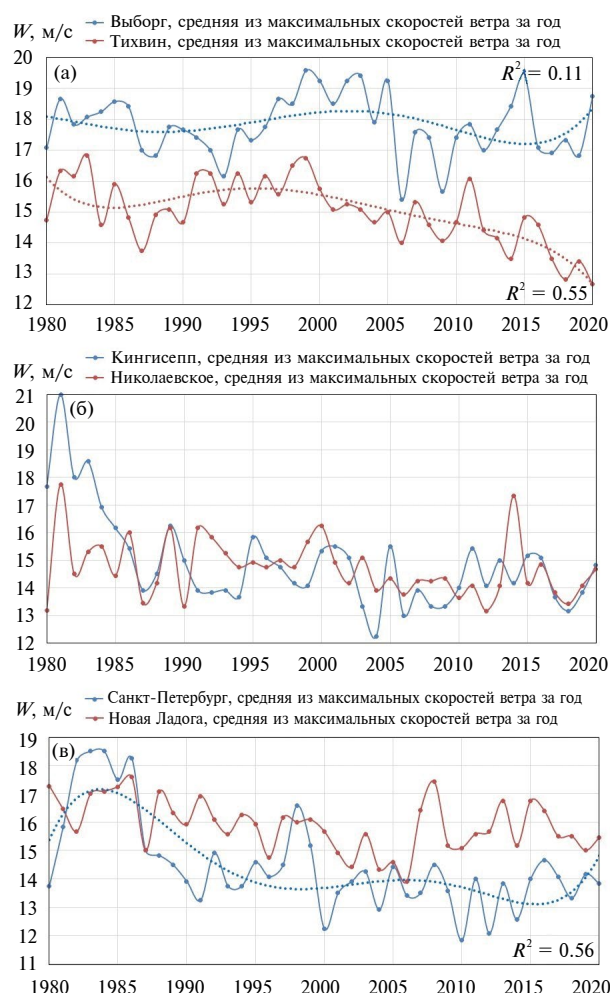


Рис. 4. Многолетняя изменчивость средних за год максимальных месячных значений скоростей ветра (W , м/с): (а) Выборг и Тихвин; (б) Кингисепп и дер. Николаевское; (в) Санкт-Петербург и Новая Ладога. Пунктирными линиями показаны полиномиальные тренды по пятилетиям.

Выявленные при анализе многолетних данных пространственные различия в значениях гидрометеорологических характеристик обусловили необходимость для их уточнения выполнить кластерный анализ. Этот метод используется при региональном анализе данных, в том числе для поддержки принятия управленческих решений (Миркин, 2011). Целью кластерного анализа набора многолетних данных по различным пунктам наблюдений является разбиение множества объектов на классы, обладающие общим набором признаков. Для каждого кластера вычисляются статистические и структурные характеристики. Структурные характеристики (параметры) дают возможность количественного сравнения различных кластеров друг с другом. Результат применения кластерного анализа — набор пространственных областей (кластеров), обладающих похожим поведением изучаемого параметра или целого набора параметров. В частности, иерархи-

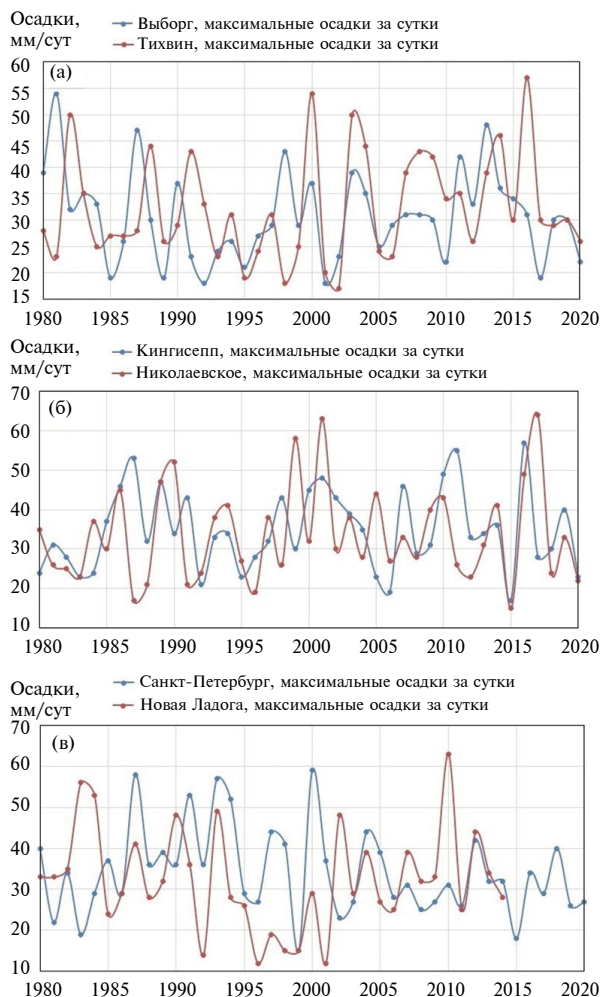


Рис. 5. Многолетняя изменчивость величин максимальных атмосферных осадков за 1 сутки в месяц, за год: (а) Выборг и Тихвин; (б) Кингисепп и дер. Николаевское; (в) Санкт-Петербург и Новая Ладога.

ческий кластерный анализ используется для систематизации средних значений полей гидротермического коэффициента Селянинова (Поляков, Кужевская, 2012). Иерархическая кластеризация применяется при решении задачи прогноза облачности (Ветрова и др., 2013), при климатическом районировании в Московской области (Овечкин, Майнашева, 2010), при климатическом районировании в США (Fovell, 1993), в экспериментах с климатическими моделями (Эзау, 1995) и др. Математический аппарат данного метода описан в ряде известных пособий соответствующей тематики (Гмурман, 1977; Жамбю, 1988).

На рис. 6–7 приведены результаты кластерного анализа многолетних данных средних годовых температур воздуха за лето и зиму, а также средних за год максимальных месячных значений скоростей ветра за период 1980–2020 гг. в Ленинградской области. Кластерный анализ данных выполнен с использованием программы Statistica 10.0.

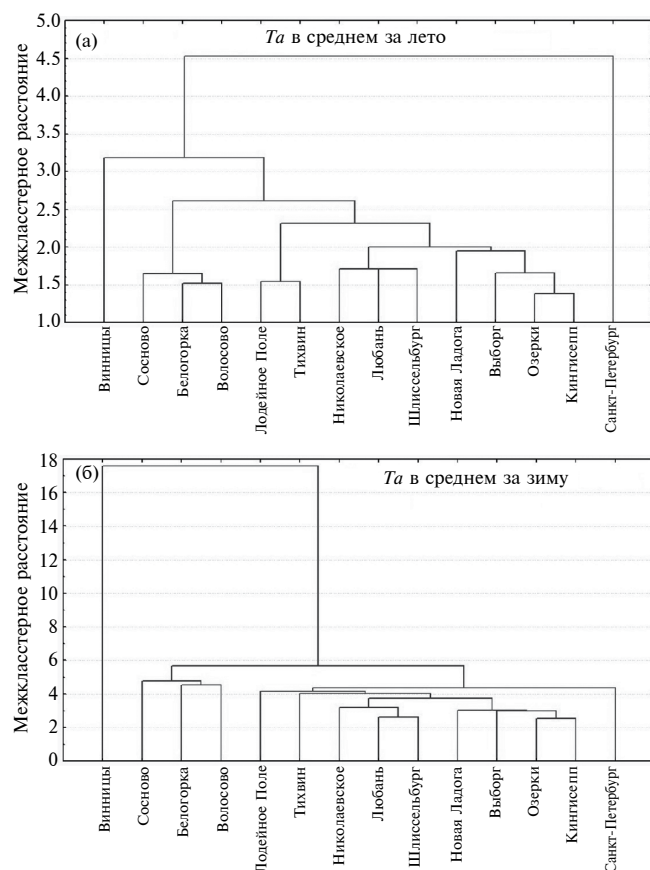


Рис. 6. Результаты кластерного анализа многолетних данных (1980–2020 гг.) средних годовых значений температур воздуха за лето (а) и зиму (б) в Ленинградской области и в Санкт-Петербурге.

Применительно к температуре воздуха в среднем за лето, отдельным, наиболее выраженным среди всех других пунктов наблюдений, кластером, со своей выраженной спецификой, является Санкт-Петербург. Это может указывать на формирование уникального городского климата, что в летнее время может выражаться в более высоких температурах воздуха, особенно в центральных районах города с плотной жилой застройкой и минимумом озеленения. Зимой в Санкт-Петербурге также выявляется своя специфика в виде отдельного кластера, применительно к температуре воздуха (“оазис тепла”), но гораздо менее выраженного, чем в летний период. Эффекты возможного влияния города-мегаполиса на климат в виде гипотез или количественных оценок обсуждаются различными авторами (Климат ..., 1982; Романова и др., 2000; Павловский, 2020) и, по-видимому, могут иметь достаточное основание.

Кроме того, отдельные достаточно выраженные кластеры по данной характеристике за летний период свойственны для районов — с. Винницы, пос. Сосново, дер. Белогорка, города Лодейное Поле и Тихвин. В отношении значений температуры воздуха в среднем за зиму наиболее выражен-

ный кластер свойственен западной части Ленинградской области (Кингисепп). По-видимому, здесь формируются свои выраженные особенности, связанные с большей близостью к открытым районам акватории Финского залива и к Балтике в целом, за счет чего погодно-климатические условия становятся более мягкими. Существенно более холодными являются восточные районы Ленинградской области, удаленные от значительных водных акваторий, которые и формируют второй по значимости кластер — территории вблизи городов Тихвин, Лодейное Поле и с. Винницы. Наиболее ветренными районами, где наиболее часто наблюдаются скорости ветра более 20 м/с, представляющие значительную опасность для городской среды, являются прибрежные районы Финского залива. Свои выраженные особенности в данном отношении, как видно из рис. 7, имеют, прежде всего, территории в окрестностях гг. Выборг, Санкт-Петербург и Кингисепп. Таким образом, установлены важные временные и пространственные особенности распределения важнейших гидрометеорологических характеристик, повышенные значения которых могут представлять серьезную опасность для функционирования, как зеленых насаждений, так и различных объектов городского хозяйства, промышленных предприятий, водного и наземного транспорта.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ РИСКИ И МЕТОДОЛОГИЯ ИХ ОЦЕНКИ

Согласно Методическим рекомендациям и показателям по вопросам адаптации к изменениям климата Минэкономразвития России 2021 г.⁵ климатические риски для территорий целесообразно оценивать по ряду источников риска: очень сильный ветер, засуха, заморозки, аномальная жара или холод, крупный град, экстремальные атмосферные осадки, ливни, грозы, чрезвычайно высокая пожарная опасность, наводнения на реках и в прибрежной зоне, деформации береговой линии русел рек и прибрежной морской зоны и др. Каждый источник риска рекомендуется характеризовать показателями интенсивности, распространенности и продолжительности воздействия, что позволяет идентифицировать уровень его опасности по следующим категориям: чрезвычайно-опасный, весьма опасный, опасный и умеренно опасный. При оценке климатических рисков территорий рекомендуется оценивать возможный экономический, экологический и социальный ущерб (Единая ..., 2004; Ивановский, 2021; Яшалова, 2020).

Выполнено нормирование значений некоторых характеристик (табл. 1) гидрометеорологи-

⁵ https://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/prikaz_minekonomrazvitiya_rossii_ot_13_maya_2021_g_267.html?ysclid=ln6k8raza7129200165 (дата обращения 10.09.2023).

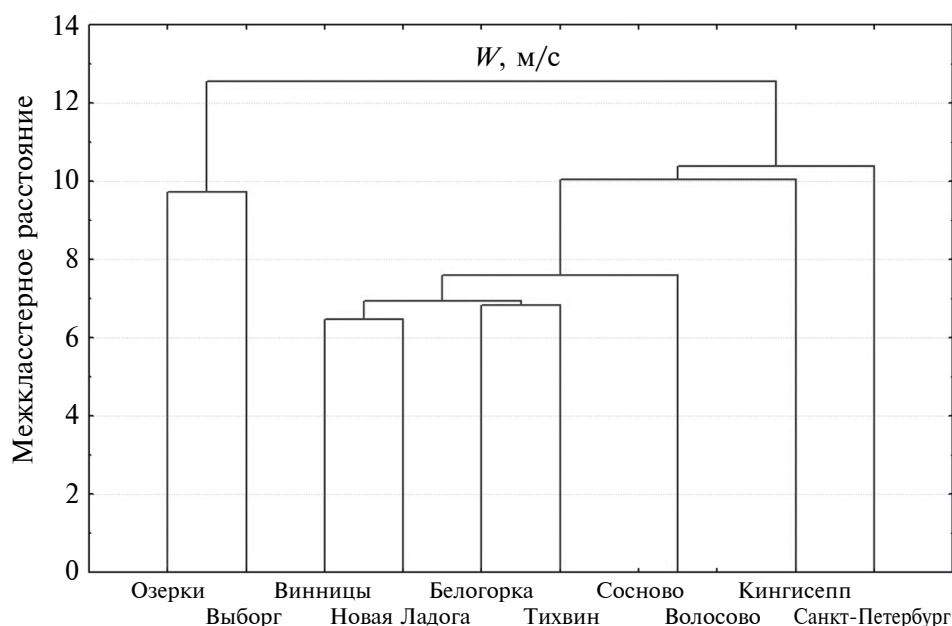


Рис. 7. Результаты кластерного анализа многолетних данных (1980–2020 гг.) средних за год максимальных месячных значений скорости ветра в Ленинградской области и в Санкт-Петербурге.

ческих процессов, представляющих опасность для жизнедеятельности населения Санкт-Петербурга и поселений Ленинградской области. В табл. 2 показаны результаты определения классов опасности применительно к различным частям Ленинградской области.

В табл. 2 представлены результаты, полученные за период с 1980 по 2020 г. Распределение по классам опасности значений анализируемых характеристик выполнено за все 12 месяцев с 1980 по 2020 г. Для характеристик TaW , TaS использовались средние значения температур воздуха за 3 зимних и 3 летних месяца. Например, для Санкт-Петербурга за данный период значения максимальной за месяц скорости ветра (WVM), соответствующие классу V (чрезвычайно-опасный, более 25 м/с), наблюдались 5 раз — в сентябре 1983 г. (26 м/с), в январе 1984 г. (30 м/с), в апреле 1985 г. (28 м/с), в сентябре 1985 г. (26 м/с), в декабре 1995 г. (26 м/с).

В Выборге скорости ветра (WVM), соответствующие классу V, наблюдались 6 раз, так же как и в пос. Воейково на восточной границе с Санкт-Петербургом. В Лужском и Гатчинском районах применительно к данному периоду наблюдений и указанным станциям наблюдений значения максимальной скорости ветра, соответствующие классу V, не наблюдались, в связи с чем можно прийти к выводу, что здесь в целом от ветрового воздействия можно ожидать менее разрушительных последствий, чем в районах, непосредственно граничащих с восточной частью Финского залива. В отношении воздействия атмосферных осадков высокой интенсивности, как следует из табл. 2, значения, соответству-

ющие высоким классам опасности (IV, V), возможно ожидать в г. Санкт-Петербурге, г. Тихвине (где регулярно наблюдаются наводнения на реках), в районе с. Винницы и на западе Ленинградской области (в районе г. Кингисепп).

Применительно к температуре воздуха в среднем за зиму за период с 1980 по 2020 г. не было зарегистрировано значений, относящихся к высоким классам опасности (IV, V). Однако значения, соответствующие уровню опасности III, были отмечены в восточных, удаленных от побережья восточной части Финского залива территориях Ленинградской области — в городах Тихвине, Лодейном Поле и пос. Винницы. Таким образом, восточные районы Ленинградской области оказываются в целом более холодными, чем западные и южные, по-видимому, по причине несколько большей степени континентальности климата, что следует учитывать при оценке рисков. В среднем же за летний период на всех анализируемых пунктах наблюдений значения температуры воздуха не превышали уровень опасности II («умеренный»). Однако при этом для Санкт-Петербурга характерно наибольшее количество значений средней за лето температуры воздуха, соответствующих уровню опасности II. Данная особенность мегаполиса подтверждается и результатами кластерного анализа (см. рис. 6а).

В Санкт-Петербурге, по-видимому, по причине формирования особого городского климата, имеется предрасположенность к возникновению соответствующих рисков, связанных с негативным влиянием повышенной температуры воздуха на здоровье населения в лет-

Таблица 1. Нормирование значений гидрометеорологических характеристик для установления класса опасности воздействия на объекты жилищно-коммунального хозяйства, промышленности и транспортной инфраструктуры

Максимальные за месяц скорости ветра, м/с (код WVM) <i>Оценка класса опасности</i>				
10–13 I – низкий	14–17 II – умеренный	18–21 III – значительный	22–25 IV – весьма опасный	Более 25 V – чрезвычайно-опасный
Максимальные атмосферные осадки за 1 сутки, мм/сут (код PTM) <i>Оценка класса опасности</i>				
10–20 I – низкий	21–30 II – умеренный	31–40 III – значительный	41–50 IV – весьма опасный	Более 50 V – чрезвычайно-опасный
Средняя температура воздуха за зиму, °C (код TaW) <i>Оценка класса опасности</i>				
+1 – –5 I – низкий	–6 – –10 II – умеренный	–11 – –15 III – значительный	–16 – –20 IV – весьма опасный	Более –20 V – чрезвычайно-опасный
Средняя температура воздуха за лето, °C (код TaS) <i>Оценка класса опасности</i>				
15–18 I – низкий	19–22 II – умеренный	23–26 III – значительный	27–30 IV – весьма опасный	Более 30 V – чрезвычайно-опасный

Таблица 2. Результаты определения классов опасности гидрометеорологических характеристик в различных населенных пунктах области

Пункт наблюдений	Гидрометеорологические характеристики																			
	WVM					PTM					TaW					TaS				
	Классы опасности																			
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
Санкт-Петербург	192	220	52	12	5	395	57	23	4	5	31	9	1	0	0	35	6	0	0	0
Тихвин	133	265	81	7	4	395	67	13	11	2	12	26	3	0	0	40	1	0	0	0
Новая Ладога	79	270	111	17	3	325	45	15	5	3	14	24	3	0	0	40	1	0	0	0
Кингисепп	171	225	75	18	3	389	68	17	9	3	30	10	1	0	0	39	2	0	0	0
Выборг	41	185	204	55	6	396	64	19	5	1	18	21	2	0	0	40	1	0	0	0
Волосово	97	216	121	31	5	Нет информации					14	25	2	0	0	41	0	0	0	0
Сосново	137	260	70	7	1	Нет информации					13	26	2	0	0	41	0	0	0	0
Винницы	81	286	109	16	0	389	41	16	10	1	9	28	3	1	0	41	0	0	0	0
Любань	Нет информации					398	32	14	3	1	21	18	2	0	0	40	1	0	0	0
Николаевское (Лужский район)	140	239	67	5	1	382	52	14	7	5	24	15	2	0	0	40	1	0	0	0
Шлиссельбург	Нет информации					402	45	12	4	1	23	16	2	0	0	41	0	0	0	0
Белогорка (Гатчинский район)	112	256	103	8	1	394	49	25	5	4	16	23	2	0	0	41	0	0	0	0
пос. Воейково (Всеволожский район)	52	169	156	49	6	Нет информации					26	14	1	0	0	40	1	0	0	0
Лодейное Поле	Нет информации					378	67	18	6	0	11	26	4	0	0	40	1	0	0	0

ний период. Более детальную информацию для уточнения степени риска могут дать данные по максимальным температурам за каждый летний месяц. Например, в июле и в первой половине августа 2021 г. температура воздуха в Санкт-Петербурге достигала днем 32°C.

Установленные значения классов опасности применительно к избранным пунктам наблюдений, расположенным в различных районах Ленинградской области и Санкт-Петербурге, позволят в дальнейшем оценить климатообусловленные риски. Эти результаты могут быть получены на основе статистического расчета вероятности возникновения неблагоприятных событий III, IV, V классов опасности с учетом возможной тяжести последствий — экологиче-

ского, социального и экономического ущербов (Единая ..., 2004; Ивановский, 2021). При этом для каждого анализируемого объекта (населенного пункта) необходимо учитывать не только гидрометеорологические характеристики для расчета риска также требуется определить степень устойчивости местных геосистем, в том числе водных (Дроздов, 2021), иметь информацию о плотности населения, наличии опасных производств и других особенностях территории. Весьма важной является информация о количестве и способах возможных путей эвакуации населения в случае возникновения климатообусловленной чрезвычайной ситуации. Некоторые подходы к оценке климатических рисков представлены в табл. 3.

Таблица 3. Методология исследований с целью оценки климатообусловленного риска для безопасности жизнедеятельности

№ этапа	Название и целевое назначение этапа исследований для оценки риска	Применяемые методы и методики
1	Оценка спектра угроз. Определение основных гидрометеорологических процессов и их характеристик, представляющих наибольшую опасность для природных и природно-антропогенных экосистем, включая малонарушенные наземные и водные экосистемы, сельские и городские поселения, промышленные объекты, объекты электро- и тепло-генерации, транспортные коммуникации в данном регионе	Историко-эволюционный, сравнительно-сопоставительный, комплексный, системный методы
2	Оценка возможных причинно-следственных связей между процессами, прогнозирование климата. Определение и физическое обоснование связей между климатическими, гидрологическими, ландшафтными и экологическими процессами применительно к спектру возможных угроз для безопасности жизнедеятельности	Историко-эволюционный, системный, корреляционный методы (Дроздов и др., 2023; Eyring et al., 2016; Hamed et al., 2022)
3	Пространственный, спектральный и вероятностный (частотный) анализ многолетних данных. Оценка наличия и значимости устойчивых долговременных изменений в значениях гидрометеорологических характеристик — тренда. Кластерный анализ данных по отдельным районам в пределах исследуемого региона (области). Нормирование значений по классам опасности. Анализ частоты (вероятности) возникновения конкретных значений применительно к классам опасности “низкий”, “умеренный”, “значительный”, “опасный” и “чрезвычайно-опасный”	Корреляционный, кластерный, спектральный регрессионный методы анализа многолетних данных
4	Расчет экологического, социального и экономического ущерба при проявлении выявленных потенциально опасных климатических и связанных с ними гидрологических и синоптических процессов в значениях характеристик, соответствующих классам опасности “значительный”, “опасный” и “чрезвычайно-опасный”	Рамочная методика оценки социально-экономического ущерба от чрезвычайных ситуаций (Единая ..., 2004) Моделирование процессов влияния социально-экономических последствий ЧС (Единая ..., 2004). Методика прогнозирования экономических последствий чрезвычайных ситуаций в отраслях и сферах экономики (Ивановский, 2021) Модель “Динамический интегрированный климат — экономика” (Dynamic Integrated Climate—Economy, DICE) (Ивановский, 2021) Модель “Региональный интегрированный климат — экономика” (Regional Integrated Climate—Economy, RICE) (Ивановский, 2021)
5	Оценка степени устойчивости экосистем под влиянием внешних природных изменений	Метод оценки устойчивости экосистем к климатическим изменениям (Дроздов, 2021) и др.
6	Оценка климатообусловленного риска	Комплексные, статистико-вероятностные (Лобанов, Шадурский, 2013)
7	Разработка и совершенствование адаптационных мероприятий для снижения уровня климатического риска	Организационно-управленческие (Яшалова и др., 2020), инженерно-технологические методы

Комплексная оценка климатических рисков, выполненная на основе результатов анализа региональных гидрометеорологических условий и их временной динамики, а также соответствующих экологических, экономических и социальных последствий может стать важной частью паспорта климатической безопасности территории субъекта Российской Федерации. Типовая форма паспорта климатической безопасности, утвержденная распоряжением Минприроды России от 19.05.2021 № 16-р., п. 3, предполагает определение потенциальных рисков для секторов экономики и социальной сферы, связанных с воздействием опасных природных явлений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ многолетних гидрометеорологических данных по Санкт-Петербургу и населенным пунктам Ленинградской области позволяет сформулировать следующие выводы.

1. За последние 20–30 лет наблюдается сезонная внутригодовая перестройка температурных условий: зимы становятся более мягкими, а лето — менее жарким, что является типичным для морского климата умеренных широт. Кластерный анализ данных показал, что в отношении температуры воздуха в среднем за лето наиболее выраженным кластером, среди всех других пунктов наблюдений, является Санкт-Петербург, что в летнее время выражается в более высоких значениях температуры воздуха. Данная особенность может представлять опасность для части населения с сердечно-сосудистыми и бронхолегочными заболеваниями, что следует учитывать при реализации региональной программы Санкт-Петербурга «Борьба с сердечно-сосудистыми заболеваниями» на 2019–2024 гг., утвержденной постановлением Правительства Санкт-Петербурга от 28.06.2019 г. № 20-рп.

2. В отношении значений температуры воздуха в среднем за зиму наиболее выраженный кластер свойственен западной части Ленинградской области (Кингисепп). Это может быть связано с большей территориальной близостью данного района к акватории Финского залива и Балтике в целом. Здесь формируются наиболее мягкие по температурным значениям погодно-климатические условия. Наиболее холодными являются восточные районы Ленинградской области, удаленные от значительных водных акваторий, формирующие второй по значимости кластер, в который вошли территории вблизи городов Тихвин, Лодейное Поле и с. Винницы. Наиболее ветренными районами, где наиболее часто фиксируется скорость ветра более 20 м/с, представляющая значительную опасность для функционирования различных техногенных объектов,

включая линии электропередач, порты и водный транспорт, являются районы вблизи побережий Финского залива, включая, прежде всего, города Выборг, Санкт-Петербург, Кингисепп. Сильные ветра разрушительно воздействуют также на лесные экосистемы, приводя к ветровалам, особенно в хвойных лесах на песчаных почвах.

3. Увеличение интенсивности и частоты выпадения осадков приводит к росту объемов сточных вод, что может угрожать системам водоотведения и влиять на качество питьевого водоснабжения в Санкт-Петербурге и населенных пунктах Ленинградской области. Требуется анализ текущего состояния и производительности очистных сооружений и разработка программ по их модернизации.

4. Наибольшая подверженность наводнениям при весеннем половодье и осенних дождевых паводках свойственна городским и сельским поселениям Ленинградской области, расположенным на низменностях в среднем и нижнем течении рек, которые не зарегулированы озерами и водохранилищами. Эта опасность типична для Тихвина с населением более 50 тыс. человек, который располагается на обоих берегах р. Тихвинка (восток Ленинградской области). В городе находится объект культурного наследия народов России федерального значения — Тихвинский Успенский монастырь, основанный в 1560 г., который регулярно оказывается в зоне значительного весеннего подъема воды вместе с близлежащими городскими территориями. В зоне повышенного риска, связанного с влиянием весенних подъемов уровня воды, располагаются также некоторые населенные пункты в бассейне р. Луга в южной части Ленинградской области, включая г. Лугу. Наименьшие негативные последствия для городских и сельских поселений, которые могут быть вызваны половодьем и/или паводками, следует ожидать в северных районах Ленинградской области — Выборгском и Приозерском на Карельском перешейке, для водных систем которых свойственна наибольшая озерность. Кроме того, районные центры и многие сельские поселения в этой части Ленинградской области располагаются на возвышенностях. Высота над ур. м. центральной части Выборга с населением около 80 тыс. человек соответствует 20–30 м (самая высокая точка городского рельефа — 51 м в Скандинавском микрорайоне). Центр г. Приозерск с населением около 20 тыс. человек расположен на высоте около 19 м над ур. м., а р. Вуокса, на берегах которой находится город в ее устьевой части, зарегулирована естественными озерами и плотинами 4 гидроэлектростанций.

5. Произведено нормирование значений рассмотренных гидрометеорологических параметров, характеризующих природные процессы, представляющие опасность для безопасности

жизнедеятельности в Санкт-Петербурге и населенных пунктах Ленинградской области. Обоснованы подходы к комплексной оценке риска при изменениях климата, которые в дальнейшем могут быть использованы при подготовке паспортов климатической безопасности рассмотренных субъектов Российской Федерации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в научной Лаборатории “Экология и климат” РГГМУ при поддержке проекта Государственного задания РГГМУ 2024 года № FSZU-2023-0002, шифр “Климат-2”.

FUNDING

The study was carried out in the scientific Laboratory “Ecology and Climate” of the Russian State Hydrometeorological University with the support of the State Assignment Project of the Russian State Hydrometeorological University for 2024 No. FSZU-2023-0002, code “Climate-2.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акимов В.А., Соколов Ю.И. Глобальные и национальные приоритеты снижения риска бедствий и катастроф / МЧС России. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2016. 396 с.
- Анисимов А.О., Жильцова Е.Л., Шаповалова К.О., Ершова А.А. Анализ индикаторов изменений климата. Ч. 2. Северо-западный регион России // Метеорология и гидрология. 2020. № 1. С. 21–34.
- Ветрова Е.И., Скриптунова Е.Н., Шакина Н.П. Прогноз низкой облачности на аэродромах европейской территории бывшего СССР // Метеорология и гидрология. 2013. № 1. С. 12–31.
- Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 1977. 479 с.
- Дроздов В.В. К вопросу о природе Петербургских наводнений // Ученые записки РГГМУ. Гидрология. 2009. № 24. С. 24–45.
- Дроздов В.В. Оценка устойчивости экосистем Балтийского и Белого морей для обеспечения экологической безопасности освоения ресурсов шельфа с учетом гидрометеорологических условий // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25 (1). С. 21–27.
<https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-1-21-27>
- Дроздов В.В., Лобанов А.В., Окуличева А.А., Буренкова А.А. Экстремальные гидрометеорологические процессы и их влияние на экосистемы и промышленную инфраструктуру Ленинградской области // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27. № 2. С. 53–59.
<https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-2-53-59>
- Жамбю М. Иерархический кластерный анализ и сопоставления. М.: Финансы и статистика, 1988. 344 с.
- Единая межведомственная методика оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера, а также классификации и учета чрезвычайных ситуаций. М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2004.
- Ивановский Б.Г. Экономическая оценка ущерба от природных бедствий и изменения климата // Экономические и социальные проблемы России. 2021. № 1. С. 125–144.
<https://doi.org/10.31249/espr/2021.01.07>
- Климат Ленинграда. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 252 с.
- Лобанов В.А., Шадурский А.Е. Выделение зон климатического риска на территории России при современном изменении климата. Монография. СПб.: РГГМУ, 2013. 123 с.
- Малинин В.Н., Гурьянов Д.А. Межгодовая изменчивость климатических сезонов в Санкт-Петербурге // Изв. РГО. 2015. Т. 147. Вып. 5. С. 17–27.
- Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации: учеб. В 2-х томах: Т. 2. Анализ временных рядов и случайных полей. Изд. 2, испр. и доп. СПб.: РГГМУ, 2020. 196 с.
- Миркин Б.Г. Методы кластер-анализа для поддержки принятия решений. М.: НИУ “ВШЭ”, 2011. 88 с.
- Овечкин С.В., Майнашева Г.М. Опыт использования кластерного анализа при климатическом районировании Московской области // Вестн. МГПУ. Серия “Естественные науки”. 2010. № 2 (6). С. 65–74.
- Павловский А.А., Менжулин Г.В. Современные изменения климатических норм и обеспечение устойчивого развития Санкт-Петербурга как крупнейшего мегаполиса Северной Европы // Вестн. СПбГУ. Сер. 7. 2013. Вып. 2. С. 71–78.
- Павловский А.А. О ливневых затоплениях некоторых территорий Санкт-Петербурга при современных изменениях климата // Общество. Среда. Развитие. 2013. № 2. С. 251–256.
- Павловский А.А. О разработке и реализации первоочередных мер по адаптации Санкт-Петербурга к климатическим изменениям // Гидрометеорология и экология. Ученые записки РГГМУ. 2020. № 58. С. 111–126.
<https://doi.org/10.33933/2074-2762-2020-58-111-126>
- Поляков Д.В., Кузевская И.В. Применение кластерного анализа для оценки температурно-влажностных условий в период активной вегетации на территории юга Западной Сибири и его связь с гидротермическим коэффициентом Т.Г. Селянинова // Вестн. Томск. гос. ун-та. 2012. № 360. С. 188–192.
- Ревич Б.А., Шапошников Д.А., Анисимов О.А., Белолуцкая М.А. Влияние температурных волн на здоровье населения в городах Северо-Западного региона России // Проблемы прогнозирования. 2019. № 3. С. 127–134.
- Ревич Б.А. Меняющийся климат и здоровье населения: проблемы адаптации: науч. докл. / под ред. Б.Н. Порфирьева. М.: Динамик Принт, 2023. 168 с.
<https://doi.org/10.47711/srl-2023>

- Романова Е.Н., Гобарова Е.О., Жильцова Е.Л. Методы использования систематизированной климатической и микроклиматической информации при развитии и совершенствовании градостроительных концепций. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 159 с.
- Тишков А.А., Золотокрылин А.Н., Семенов В.А., Кухта А.Е. Климатологические исследования в Институте географии РАН: к 100-летию Института // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. № 2. С. 8–30.
<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2018-2-8-30>
- Третий оценочный докл. об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научное издание, 2022. 124 с.
- Эзау И.Н. Кластерный анализ данных наблюдений и результатов численных экспериментов с моделью ОЦА // Метеорология и гидрология. 1995. № 12. С. 40–53.
- Яшалова Н.Н., Яковлева Е.Н., Васильцов В.С., Молчанова Т.К., Рубан Д.А. Методология и инструментарий управления инновациями в целях минимизации климатических рисков. Науч. изд. (рецензированное). Ростов-на-Дону: ДГТУПринт, 2020. 144 с.
- Eyring V., Bony S., Meehl G.A., Senior C.A., Stevens B., Stouffer R.J., Taylor K.E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // Geoscientific Model Development. 2016. Vol. 9. P. 1937–1958.
<https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Fovell R., Fovell M.-Y. Climate Zones of the Conterminous United States Defined Using Cluster Analysis // American Meteorol. Society. 1993. № 6. P. 2103–2135.
- Hamed M.M., Nashwan M.S., Shahid S. Inter-comparison of Historical Simulation and Future Projection of Rainfall and Temperature by CMIP5 and CMIP6 GCMs Over Egypt // Int. J. of Climatology. 2022. Vol. 42. P. 4316–4332.
<https://doi.org/10.1002/joc.7468>

Climate Change and Methodology for Assessing Climate Risks in St. Petersburg and Leningrad Oblast

V. V. Drozdov^{a, *}, V. A. Lobanov^a, and A. A. Okulicheva^a

^aRussian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

*e-mail: vladidrozdov@yandex.ru

An analysis of long-term data on seasonal, monthly and annual mean air temperatures, precipitation and wind speeds was carried out. It was shown that during the last 20–30 years there has been a seasonal intra-annual restructuring of temperature conditions: winters are becoming milder and summers less hot. The results of the cluster analysis of hydrometeorological data showed that the most pronounced features of the average winter air temperature are characteristic of the westernmost settlements of Leningrad oblast, such as the city of Kingisepp. This may be due to their greater proximity to the open waters of the Gulf of Finland, which have a warming effect. The coldest areas are the eastern regions of Leningrad oblast, far from significant water bodies, which form the second most important cluster, including the territories of the cities of Tikhvin, Lodeynoye Pole and the area of the village of Vinnitsa. The most windy areas, where wind speeds of more than 20 m/s are most frequently observed, posing a significant threat to the operation of various man-made objects, including power lines, ports and water transport, are the coastal areas of the Gulf of Finland, including, first and foremost, the cities of Vyborg, St. Petersburg, and Kingisepp. Strong winds also have a destructive effect on forest ecosystems, causing windfalls, especially in coniferous forests on sandy soils, including in the Kurortny district of St. Petersburg along the northern coast of the Neva Bay. An increase in the intensity and frequency of atmospheric precipitation will lead to an increase in the volume of wastewater, which may threaten the drainage systems of St. Petersburg and settlements in Leningrad oblast. The need to analyse the current capacities of the municipal sewage treatment plants and to increase their productivity is justified. The values of hydro-meteorological parameters describing natural processes threatening the life of the population of St. Petersburg and Leningrad oblast have been normalised. Methodological approaches for a comprehensive risk assessment of climate change are substantiated, which can be used later for the preparation of climate safety passports for St. Petersburg and Leningrad oblast.

Keywords: urban climate, hazardous hydrometeorological phenomena, climate safety, cluster analysis, risk assessment methodology, Northwestern Russia

REFERENCES

- Akimov V.A., Sokolov Yu.I. *Global'nye i natsional'nye priority snizheniya riska bedstviy i katastrof* [Global and National Priorities for Disaster Risk Reduction]. Moscow: FUBU VNII GO ChS (FTs), 2016. 396 p.
- Anisimov O.A., Zhil'tsova E.L., Shapovalova K.O., Ershova A.A. Analysis of climate change indicators. Part 2. Northwestern Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, pp. 13–21.
<https://doi.org/10.3103/S1068373920010021>
- Drozдов V. Integrated estimation of the sustainability of Baltic and White Seas ecosystems for ensuring environmental safety of shelf resource development. *Ekol. Promyshch. Ross.*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 21–27. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-1-21-27>
- Drozдов V., Lobanov V., Okulicheva A., Burenkova A. Extreme hydrometeorological processes and their impact on ecosystems and industrial infrastructure of the Leningrad region. *Ekol. Promyshch. Ross.*, 2023, vol. 27, no. 2, pp. 53–59. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-2-53-59>
- Drozдов V.V. On the nature of St. Petersburg floods. *Uchen. Zapis. RGGMU*, 2009, no. 11, pp. 24–45. (In Russ.).
- Edinaya mezhdovedstvennaya metodika otsenki ushcherba ot chrezvychainykh situatsii tekhnogennogo, prirodnogo i terroristicheskogo kharaktera, a takzhe klassifikatsii i ucheta chrezvychainykh situatsii [Unified Interdepartmental Methodology for Assessing Damage from Man-Made, Natural and Terrorist Emergencies, as well as Classification and Accounting of Emergency Situations]. Moscow: FGU VNII GO ChS (FTs), 2004.
- Eyring V., Bony S., Meehl G.A., Senior C.A., Stevens B., Stouffer R.J., Taylor K.E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.*, 2016, vol. 9, pp. 1937–1958.
<https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Ezau I.N. Cluster analysis of observational data and results of numerical experiments with the OCA model. *Meteorol. Gidrol.*, 1995, no. 12, pp. 40–53. (In Russ.).
- Fovell R., Fovell M.-Y. Climate zones of the conterminous United States defined using cluster analysis. *J. Clim.*, 1993, vol. 6, no. 11, pp. 2103–2135.
[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<2103:CZOTCU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<2103:CZOTCU>2.0.CO;2)
- Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika* [Probability Theory and Mathematical Statistics]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1977. 479 p.
- Hamed M.M., Nashwan M.S., Shahid S. Inter-comparison of Historical Simulation and Future Projection of Rainfall and Temperature by CMIP5 and CMIP6 GCMs Over Egypt. *Int. J. Clim.*, 2022, vol. 42, pp. 4316–4332.
<https://doi.org/10.1002/joc.7468>
- Ivanovskii B.G. Economic assessment of natural disasters and climate change damage. *Ekon. Soc. Probl. Ross.*, 2021, no. 1, pp. 125–144. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31249/espr/2021.01.07>
- Klimat Leningrada* [The Climate of Leningrad]. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1982. 252 p.
- Lobanov V.A., Shadurskii A.E. *Vydelenie zon klimaticheskogo riska na territorii Rossii pri sovremennom izmenenii klimata* [Allocation of a Climate Risk Zone in Russia under Modern Climate Change]. St. Petersburg: RGGMU, 2013. 123 p.
- Malinin V.N. *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoi informatsii: uchebnyk. V 2 tomakh: Tom 2. Analiz vremennykh ryadov i sluchainykh polei* [Statistical Methods of Analysis of Hydrometeorological Information: Textbook. In 2 Volumes: Vol. 2. Analysis of Time Series and Random Fields]. St. Petersburg: RGGMU, 2020. 196 p.
- Malinin V.N., Guryanov D.A. The interannual variability of climatic seasons in St. Petersburg. *Izv. RGO*, 2015, vol. 147, no. 5, pp. 17–27. (In Russ.).
- Mirkin B.G. *Metody klaster-analiza dlya podderzhki prinyatiya reshenii* [Cluster Analysis Methods for Decision Support]. Moscow: NIU VShE, 2011. 88 p.
- Ovechkin S.V., Mainasheva G.M. On the use of cluster analysis for climatic region mapping of Moscow Region. *Vestn. MGPU. Ser.: Estestv. Nauki*, 2010, no. 2, pp. 65–74. (In Russ.).
- Pavlovskii A.A. On stormwater flooding of some territories of St. Petersburg under modern climate changes. *Obshchest., Sreda, Razvit.*, 2013, no. 2, pp. 251–256. (In Russ.).
- Pavlovskii A.A. On development and implementation of priority measures for adaptation of St. Petersburg to climate changes. *Gidrometeor. Ekol.*, 2020, no. 58, pp. 111–126. (In Russ.).
<https://doi.org/10.33933/2074-2762-2020-58-111-126>
- Pavlovskii A.A., Menzhulin G.V. Modern changes in climatic norms and ensuring sustainable development of St. Petersburg as the largest metropolis in Northern Europe. *Vestn. S.-Petersb. Gos. Univ. Ser. 7*, 2013, no. 2, pp. 71–78. (In Russ.).
- Polyakov D.V., Kuzhevskaya I.V. Application of cluster analysis to assess temperature and humidity conditions during active vegetation in the south of Western Siberia and its relationship with the hydrothermal coefficient of T.G. Selyaninov. *Vestn. Tomsk. Gos. Univ.*, 2012, no. 360, pp. 188–192. (In Russ.).
- Revich B.A. *Menyayushchiysya klimat i zdorov'e naseleniya: problemy adaptatsii: nauchnyi doklad* [Changing Climate and Public Health: Problems of Adaptation: Scientific Report]. Porfiriev B.N., Ed. Moscow: Dynamik Print Publ., 2023. 168 p.
<https://doi.org/10.47711/srl-2023>
- Revich B.A., Shaposhnikov D.A., Anisimov O.A., Belolutskaya M.A. Impact of temperature waves on the health of residents in cities of the Northwestern Region of Russia. *Probl. Prognozir.*, 2019, no. 3, pp. 127–134. (In Russ.).

- Romanova E.N., Gobarova E.O., Zhiltsova E.L. *Metody ispol'zovaniya sistematizirovannoi klimaticheskoi i mikroklimaticheskoi informatsii pri razvitii i sovershenstvovanii gradostroitel'nykh kontseptsii* [Methods of Using Systematized Climatic and Microclimatic Information in the Development and Improvement of Urban Planning Concepts]. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 2000. 159 p.
- Tishkov A.A., Zolotokrylin A.N., Semenov V.A., Kukhta A.E. Climate studies in the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences: To the 100th anniversary of the institute. *Fund. Priklad. Klimatol.*, 2018, no. 2, pp. 8–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2018-2-8-30>
- Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii. Obshchee rezюме* [The Third Assessment Report on Climate Change and Its Consequences on the Territory of the Russian Federation. General Summary]. St. Petersburg: Naukoemk. Tekhbol. Publ., 2022. 124 p.
- Vetrova E.I., Skriptunova E.N., Shakina N.P. Low clouds and their forecast at the airports of the European part of the former USSR. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, pp. 6–19. <https://doi.org/10.3103/S1068373913010020>
- Yashalova N.N., Yakovleva E.N., Vasiltsov V.S., Molchanova T.K., Ruban D.A. *Metodologiya i instrumentarii upravleniya innovatsiyami v tselyakh minimizatsii klimaticheskikh riskov. Nauchnoe izdanie (retsenzirovannoe)* [Methodology and Tools for Innovation Management in Order to Minimize Climate Risks. Scientific Publication (Reviewed)]. Rostov-on-Don: DGTUPrint Publ., 2020. 144 p.
- Zhambyu M. *Ierarkhicheskii klasternyi analiz i sootvetstviya* [Hierarchical Cluster Analysis and Matching]. Moscow: Finansy i statistika Publ., 1988. 344 p.

СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

УДК 502.171

КЛИМАТИЧЕСКИЙ ФАКТОР В СОВРЕМЕННОМ ЦИКЛЕ РАЗВИТИЯ СОЦИОПРИРОДНЫХ СИСТЕМ (НА ПРИМЕРЕ БАССЕЙНА ОЗЕРА ИМАНДРА)

© 2024 г. **А. В. Евсеев**¹, **Т. М. Красовская**¹, *

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: krasovsktex@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.06.2023 г.

После доработки 29.01.2024 г.

Принята к публикации 16.05.2024 г.

На территории бассейна оз. Имандра в течение многих десятилетий сформировалась социоприродная система панархического характера. В эту систему входят следующие блоки: природный, социальный, хозяйственный. Их развитие в разные промежутки времени могут быть разнонаправленными, одновременными и разномасштабными. Современная структура природопользования территории определяет синергизм потоков вещества и энергии, продуцируемых блоками, который отражает панархический характер системы. На основе системного анализа статистических, аналитических данных и материалах ландшафтно-экологических исследований авторов проводится анализ современных циклов развития блоков социоприродной системы территории для определения механизмов достижения ее обновления, соответствующего устойчивому развитию, что и явилось целью исследования. В XXI в. ярко проявляются различные темпы преобразования блоков системы, находящихся на разных стадиях циклов ее развития. Климатический вектор, определяющий цикл развития природного блока, активно проявляется с последней трети XX в. и стимулирует обновление системы. Современная стадия динамики социального блока охарактеризована как цикл накопления изменений, а хозяйственного – как цикл реструктуризации. Развитие социоприродной системы территории сопровождается возникновением определенных порогов, когда происходит смена его векторов. Отмечены признаки преодоления порога разрушающих природный блок нарушений за счет уменьшения антропогенной нагрузки и интенсификации биогеохимического круговорота вследствие потепления климата. Гармонизация циклов развития является сложной управленческой задачей, решение которой требует анализа конкретных характеристик блоков системы, существующих препятствий их развития, приемлемых состояний их реструктуризации и преследуемых целей обновления. Циклы развития социоприродной системы редко совпадают, однако возможно их сближение для сбалансированного развития. Предложены механизмы ускорения цикла реструктуризации блока “население” в целях его обновления.

Ключевые слова: панархическая система, цикл развития, климатический вектор, адаптация, управление, бассейн оз. Имандра

DOI: 10.31857/S2587556624030098 **EDN:** SODLAO

ВВЕДЕНИЕ

Стратегия устойчивого развития Арктической зоны Российской Федерации, принятая в 2020 г. (О стратегии ..., 2021), предусматривает хозяйственное освоение региона в соответствии с принципами устойчивого развития, а также рекомендациями Арктического Совета¹. Эти базовые документы положены в основу целевых про-

грамм разных уровней субъектов Российской Федерации, включенных в ее Арктическую зону. Подобные программы разработаны и в Мурманской области, и в ее муниципальных районах. Запланированные социально-экономические преобразования в рамках упомянутых программ затрагивают сложные территориальные социоприродные системы природопользования.

Территория исследования является частью крупного импактного района центральной части Кольского полуострова, формирование которого началось в 30-х годах XX в. (Экологический ..., 1999; Экологический ..., 2017). На этой террито-

¹ Арктический совет (Arctic Council) – международная организация, призванная содействовать сотрудничеству в области охраны окружающей среды и устойчивого развития приполярных районов.

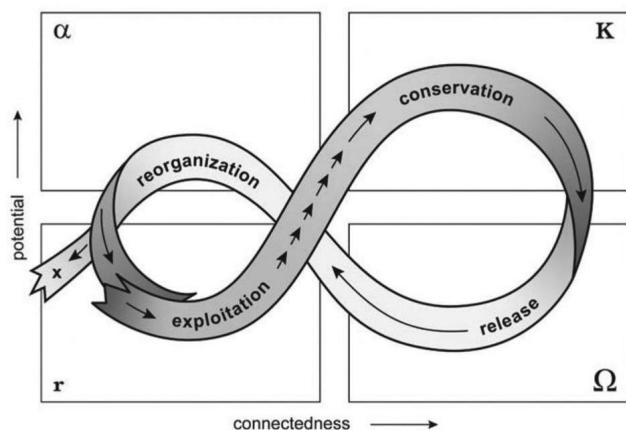


Рис. 1. Циклы развития панархической системы (Gunderson and Holling, 2002).

рии в течение многих десятилетий сформировалась социоприродная система, образовавшаяся в результате взаимодействия вещественно-энергетических потоков природного и антропогенного происхождения. Векторы развития входящих в нее блоков — природного, социального, хозяйственного в определенные временные промежутки характеризовали панархический характер системы (Gunderson and Holling, 2002). Панархические системы проходят через цикл роста/эксплуатации, накопления, обновления на основе накопленного нового и реструктуризации (рис. 1) (Gunderson and Holling, 2002).

Выявление этих циклов необходимо для сбалансированного развития всей социо-природной системы без привычного на практике акцентирования внимания только на важнейших из них для достижения региональных целей (Farley and Voinov, 2016). Например, при игнорировании существующего цикла развития социоприродной системы мероприятия для обеспечения только экономического роста, либо только экологической стабилизации, скорее всего, приведут к разрушению всей системы, вместо ожидаемого устойчивого развития за счет замедления роста экономики вследствие игнорирования экологических рисков (порогов в развитии всей системы) с последующей нехваткой средств на экологические мероприятия. Заметим при этом, что все чаще в научных работах и управленческих документах термин устойчивое развитие, включающий конкретные 17 целей², заменяется на термин благополучие (well-being), при этом подразумевается совокупный эффект адаптационного развития на конкретной территории, а не исключительно достижение цели устойчивого развития № 3: “Здоровье и благополучие” (Bousquet et al., 2016; Farley and Voinov, 2016; Wilson et al., 2013). Целью настоящего исследо-

вания является анализ факторов, определяющих современные циклы развития социо-природной системы бассейна оз. Имандра для определения механизмов достижения ее благополучного обновления.

ТЕРРИТОРИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Бассейн оз. Имандра является наиболее хозяйственно-освоенной территорией Мурманской области. Площадь бассейна составляет около 12 тыс. км² (рис. 2). Социоприродная система территории формировалась в результате развития промышленного, селитебного, транспортного, лесохозяйственного и природоохранного видов природопользования. Хозяйственное освоение происходит в условиях северо-таежных ландшафтов цокольной равнины, испытывающей высокую степень техногенной нагрузки, связанной с механическими нарушениями природных геосистем, а также их деградацией вследствие поступления аэротехногенных поллютантов (соединений серы и азота, тяжелых металлов, пылевых частиц и др.). Так, объем выбросов в атмосферу от стационарных источников в Мончегорске превышает 20 тыс. т/год. В водах оз. Имандра у Мончегорска среднегодовое содержание меди достигает 10ПДК, никеля — 12ПДК, аммонийного азота — 30ПДК, доля проб почв селитебной зоны, не соответствующих санитарно-гигиеническим нормативам, превышает 55% и т.д. (Доклад ..., 2023). Основная доля антропогенной нагрузки формируется Мончегорским горнометаллургическим комбинатом Кольской ГМК.

Исследование построено на использовании теории природопользования, в которой определена структура социо-природной системы и обозначены ее функции (Красовская, 2008), теории панархических систем (Gunderson and

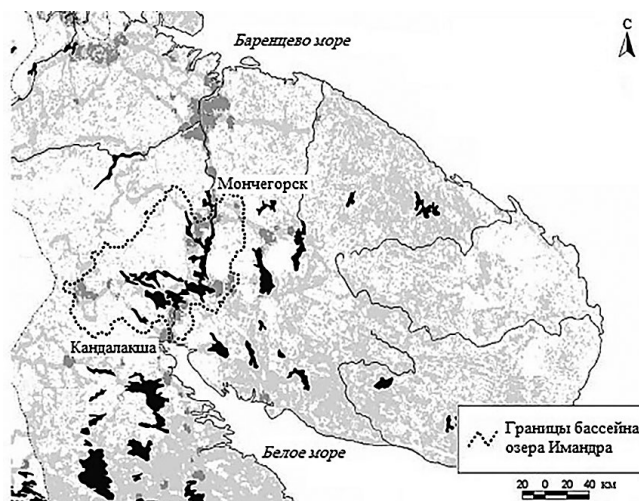


Рис. 2. Территория исследования.

² The 17 goals | Sustainable Development. <https://sdgs.un.org/goals> (дата обращения 26.05.2024).

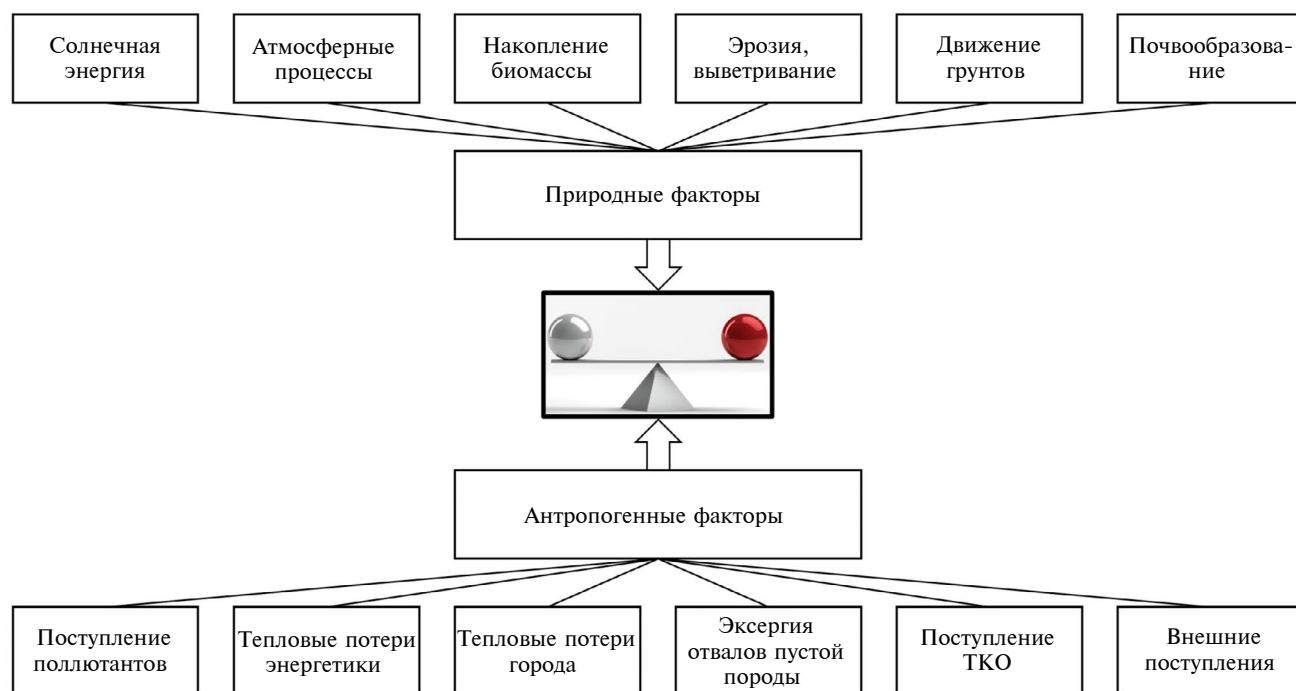


Рис. 3. Факторы формирования вещественно-энергетического баланса.

Holling, 2002), использованной для анализа развития социо-природной системы территории, материалах многолетних полевых ландшафтно-экологических исследований авторов, а также на основе анализа тематических публикаций. В нем использован бассейновый подход к геоэкологическому анализу (Корытный, 2001), позволяющий анализировать относительно локализованные потоки вещества и энергии в территориальной природно-антропогенной системе в целях ее сбалансированного развития.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вещественно-энергетические потоки. Вещественно-энергетический баланс бассейна оз. Имандра складывается за счет природных процессов, включающих поступление солнечной энергии, осадков, выветривание, почвообразование и т.д., а также антропогенных процессов, чаще всего негативных последствий хозяйственной деятельности: деградация растительного покрова, эрозия почв, накопление загрязнителей в геосистемах, разложение ТКО, тепловой эффект города, внешнего поступления загрязнителей в результате дальнего переноса и др. (рис. 3).

Количественные характеристики ряда этих факторов были определены нами ранее (Евсеев, Красовская, 2021, 2022; Красовская, 2008). Существующая база данных пока не позволяет обратиться к оценке роли всех факторов, обуславливающих формирование вещественно-энергетических потоков в социоприродной системе, влияющих на цикл развития ее отдельных блоков. Поэтому мы выбрали для анализа

те факторы, по которым имеются достаточно полные характеристики ландшафтных, экологических и социально-экономических изменений под воздействием потепления климата, ограничив территорию исследования наиболее изученным районом основного системообразующего производства — медно-никелевого Кольской ГМК в г. Мончегорске, с которым связаны типичные социально-экономические процессы, наибольшие экологические изменения прилегающей территории, отражающие отклик геосистем на потепление климата. Современная фаза развития социо-природной системы в настоящем исследовании анализируется с начала XXI в.

Динамические процессы в природном блоке. Натурные наблюдения и анализ тематических научных публикаций позволяет сделать вывод, что в современном цикле развития природного блока основной движущей силой является климатически фактор. Многолетние наблюдения (Второй ..., 2014; Доклад ..., 2008), свидетельствуют о климатических изменениях на территории с начала 1990-х годов. С 30-х годов XX в. до его последней четверти изменение климатических характеристик было медленным, а затем сменилось современным повышением температур воздуха (в основном за счет зимнего периода). Средняя скорость теплового изменения приземного воздуха в Мурманской области составила 0.6°C за десятилетие, при этом изменение летних температур — $0.6\text{--}0.8^{\circ}\text{C}$. (Второй ..., 2014). Современные среднегодовые температуры уже превышают периоды потеплений 1961—1990 гг. (Демин, 2012). Изменения в количестве осадков менее выражены, однако прогнози-

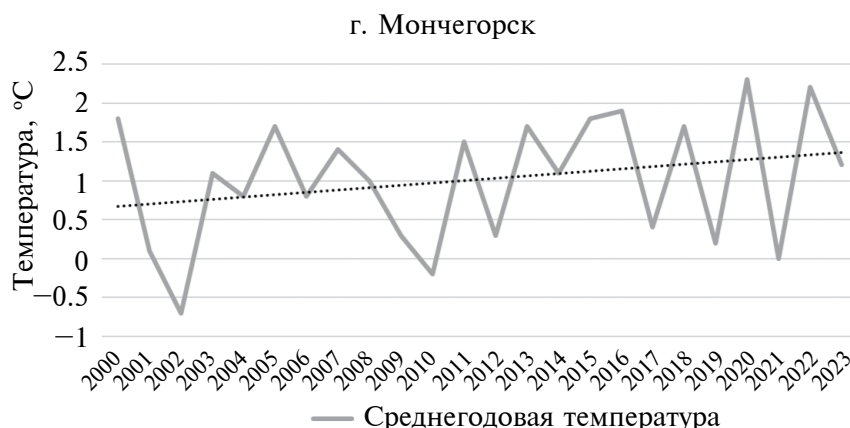


Рис. 4. Средние годовые температуры воздуха в Мончегорске в начале XXI в.

руется их увеличение, которое будет заметными к середине XXI в. Более детальные комментарии изменения климата выходят за рамки настоящего исследования, поэтому выделим периоды наиболее значительных колебаний для того, чтобы оценить экологические и социально-экономические процессы, соответствующие им, которые в социоприродной системе территории носят панархический характер. К таким периодам относится начало XXI в., когда, несмотря на значительные колебания, прослеживается рост средних годовых температур воздуха (рис. 4).

Рассмотренные климатические изменения находят отклик в геосистемах, повышается скорость их изменений: увеличение биологической продуктивности и биоразнообразия. Например, это хорошо заметно по скорости зарастания техногенной пустоши у Мончегорского горнометаллургического комбината (рис. 5). Экспериментальные исследования в Арктике показывают, что потепление увеличивает пиковые значения NDVI, показатель максимальной продуктивности, и продолжительность вегетационного периода на всех участках, причем наиболее интенсивно оно идет на участках с кустарниково-злаковыми формациями (Barrett et al., 2015; May et al., 2020). Сказывается оно и на увеличении запасов кормовых трав, заготавливаемых на исследуемой территории, урожайности зеленных и ягодных культур в местных СНТ. На основе широтного градиента летних температур воздуха — $0,3^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$ расчетная энергия продвижения лесной растительности к северу составила около $100\text{ МДж}/\text{м}^2$ (Евсеев, Красовская, 2021). Таким образом, можно заключить, что в природном блоке системы происходит накопление изменений, приводящих к активной реструктуризации геосистем.

Однако отмечаются и некоторые негативные последствия изменения климата: повышение частоты засух, ветроломов, поздневесенних заморозков вследствие нарастания экстремальных ветровых и погодных явлений и т.д. (Доклад ..., 2008;

Ключникова и др., 2017). Существует потенциальная опасность расширения ареалов природно-очаговых заболеваний (клещевые энцефалиты, туляремия и др.). Наблюдается активное внедрение адвентивных видов растений, вытесняющих местные, например, борщевика Сосновского, отмечаются нарастающие изменения состава гидробионтов оз. Имандра, приводящие к сокращению популяций ценных промысловых рыб.

Исходя из общей динамики природных процессов, можно заключить, что природный блок вступил в цикл активного обновления.

Динамические процессы в экономическом блоке. Рассмотрим тенденции развития экономического блока социоприродной системы и сопутствующей реструктуризации в период нарастающего потепления климата. Экономические перемены, успехи в экологизации производства, истощение запасов полиметаллических руд с неясными пока перспективами разработки Сопчегорских хромитовых месторождений Кольской ГМК привели к относительной стабилизации земель дегериорантного природопользования. Кольская ГМК последовательно осуществляет “Серпную программу 2.0”, направленную на снижение негативного влияния выбросов³. В планах развития Мончегорского горнометаллургического предприятия — строительство нового медеафи-

³ Серпная программа — Норникель. <https://nornickel.ru/sustainability/projects/sulphur/> (дата обращения 26.05.2024).



Рис. 5. Зарастание техногенной пустоши.

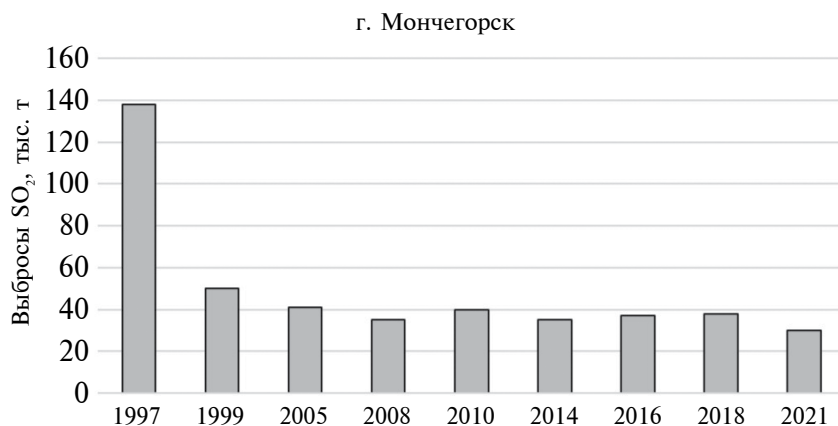


Рис. 6. Уменьшение выбросов диоксида серы, тыс. т/год, Мончегорск (Доклад ..., 2021).

нировочного производства, модернизация технологических процессов, для реализации которой до 2023 г. запланировано 7.8 млрд руб., и т.д. Проводимая модернизация производства привела к уменьшению выбросов диоксида серы, с которыми была связана наиболее выраженная деградация природной среды (рис. 6).

Наблюдавшиеся периоды рецессии производства не повлияли на его медленный экономический рост в Мурманской области. Так, индекс промышленного производства в 2001 г. составил 101.1%, в 2005 г. — 100.2%, в 2010 г. — 101.2%, в 2015 г. — 103.6%, в 2021 г. — 107.5% по отношению к предыдущим годам⁴. Уменьшению техногенной нагрузки на природную среду, кроме экологической модернизации производства, способствует активно идущий процесс диверсификации природопользования, предусмотренной Стратегией социально-экономического развития Мурманской области до 2035 г.⁵ Успешно развивается рекреационное, сельскохозяйственное и транспортное природопользование, связанные со значительно меньшими негативными экологическими последствиями. О наметившемся росте экономики свидетельствуют показатели постепенного повышения уровня жизни за последние 5 лет (с 2017 по 2022 г.): реальные располагаемые доходы населения выросли более чем на 2%⁶.

Современные климатические изменения расширяют возможности развития сельскохозяйственного использования территории (кормопроизводство, овощеводство открытого грун-

та), способствуют развитию туризма, повышают комфортность среды обитания горожан, приводят к снижению затрат на отопление, повышают эффективность процесса переработки бедного рудного сырья за счет усиления процесса биохимического выщелачивания и т.д. Однако одновременно потепление климата усиливает процессы эвтрофикации водоемов, повышающие затраты на подготовку вод для использования, активное распространение карантинных сорняков, требующих затрат на борьбу с ними, нарастающую угрозу поздневесенних заморозков, снижающих урожаи дикоросов, частоту лесных пожаров из-за большей повторяемости засух и т.д. (Ключникова и др., 2017; Сценарии ..., 2019). Степень влияния этих процессов, проявившихся совсем недавно, на развитие экономики еще предстоит оценить.

Рассмотренные векторы развития экономического блока позволяют заключить, что он находится в цикле активной реструктуризации.

Динамические процессы в социальном блоке. Социальные процессы на изучаемой территории в оцениваемый промежуток времени претерпевали существенные трансформации. Перестроенный период в Мурманской области ознаменовался значительным спадом производства, падением жизненного уровня населения, разрушением социальной инфраструктуры. Это привело к миграционной убыли и повышенной смертности населения. Так, с 2000 г. по настоящее время численность населения всей Мурманской области сократилась более чем на 70%. Численность населения продолжает снижаться, хотя темпы сокращения в целом замедлились (рис. 7). В последнее десятилетие (с 2010 по 2022 г.) для городов бассейна оз. Имандра сокращение численности населения составило: Мончегорска — около 9 тыс., Апатитов — 6 тыс., Оленегорска — 3 тыс. человек и т.д., что связано как с миграционными процессами, так и с изменившимися условиями проживания, старением населения. Это негатив-

⁴ Индексы промышленного производства по Мурманской области, % к предыдущему году. Социально-экономическое положение Мурманской области в 2021 году. <http://51.rosstat.gov.ru> (дата обращения 26.05.2024).

⁵ Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/ukaz645-26102020.pdf> (дата обращения 26.05.2024).

⁶ Мурманская область в цифрах / Федеральная служба государственной статистики по Мурманской области. <https://51.rosstat.gov.ru/folder/36664/document/36757> (дата обращения 26.05.2024).

г. Мончегорск

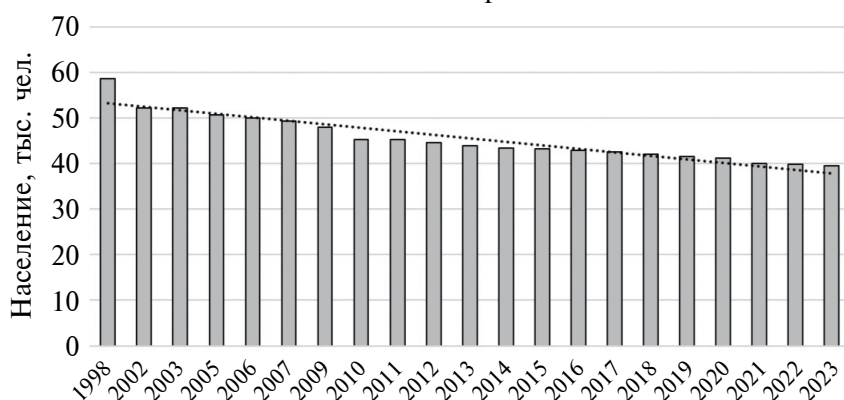


Рис. 7. Динамика численности населения Мончегорска (по данным Геоинформационного портала Мурманской обл. и Росстата).

Составлено по: Росстат. <http://www.rosstat.gov.ru> (дата обращения 12.12.2022); Геоинформационный портал Мурманской области. <http://gis.gov-murman.ru> (дата обращения 15.03.2022).

но сказывается на рынке труда. Об этом может свидетельствовать снижение численности трудоспособного населения за 2000–2020 гг. на 20%.

Сокращение численности населения слабо отразилось на давлении на природную среду вследствие накопившихся экологических проблем и скромного прогресса в их решении, особенно в области городского коммунального хозяйства (Евсеев, Красовская, 2022). Не решена проблема раздельного сбора и переработки ТКО, ликвидации мусора заброшенных площадок зданий и сооружений.

На фоне изменения климата (потепление, резкие колебания температур и осадков) отмечается увеличение простудных и сердечно-сосудистых заболеваний населения, снижение возможностей традиционной заготовки ими дикоросов вследствие снижения их урожайности из-за поздневесенних заморозков, резких летних похолоданий, появление угрозы расширения территорий с природно-очаговыми заболеваниями (клещевые энцефалиты), уменьшение долговечности зданий и других объектов инфраструктуры и т.п., что отражает негативный эффект потепления вопреки распространенному мнению, что это — только благо для населения.

Обобщая рассмотренную динамику, современный цикл развития социального блока можно оценить как стадию накопления изменений.

Обращает на себя внимание противодействующие векторы развития природного и экономического и социального блоков социо-природной системы, что подчеркивает ее панархический характер. Одновременно необходимо отметить процессы, способствующие ускорению перехода социального блока в цикл реструктуризации. Они включают: диверсификацию экономики и модернизацию технологических процессов, активное внедрение цифровой экономики и т.д. для фор-

мирования фокусных групп населения, заинтересованных в развитии своего края, противодействия его миграционной убыли. Это способствует появлению позитивных сдвигов в структуре занятости населения, а потепление климата — в улучшении условий его проживания.

Адаптивное развитие социоприродной системы территории. Управление природопользованием в панархической системе должно обеспечивать ее устойчивость и адаптивность к происходящим изменениям (Walker, 2004). Различные сценарии развития Мурманской области в условиях глобальных климатических изменений были детально рассмотрены в КНЦ РАН (Сценарии ..., 2019). Однако, несмотря на междисциплинарность этого исследования, в нем отсутствует четкий анализ взаимодействия временных циклов развития блоков социоприродной системы. Из приведенных выше оценок следует, что природный и экономический блоки находятся в цикле реструктуризации и обновления на фоне быстрого роста изменений слагающих их компонентов, а социальный блок — в цикле накопления изменений. Заметную роль в трансформации социоприродной системы играет климатический фактор, стимулирующий обновление природного блока. Заметим, однако, что климатические и экологические процессы (в отношении сохранившихся еще выбросов диоксида серы) в природном блоке также разнонаправлены, но с перевесом действия климатических (Евсеев, Красовская, 2021). Это означает постепенное преодоление порога опасных экологических нарушений природного блока за счет уменьшения антропогенной нагрузки и интенсификации биогеохимического круговорота, причем эта трансформация приняла ускоренные темпы с начала XXI в. Климатический фактор также подчеркивает панархический характер социоприродной системы, оказывая неоднозначное влия-



Рис. 8. Возможные последствия управленческих решений для гармонизации циклов развития социоприродной системы.

ние на развитие социального и экономического блоков, рассмотренное выше.

Обеспечение адаптационного развития блоков социо-природной системы всегда должно соответствовать конкретному фокусному промежутку времени и масштабу, так как все происходящие процессы в панархической системе взаимосвязаны (Farley et al., 2016; Gunderson et al., 2002). Устойчивое функционирование всей социо-природной системы в этот промежуток времени достигается путем определенных адаптационных мер для сближения циклов развития ее блоков. Для экономического блока, несмотря на достаточно уверенный темп реструктуризации на пути к обновлению, имеется и “черный лебедь”, появление которого сопряжено с современной геополитической обстановкой.

Социоприродная система не имеет абсолютного совпадения циклов развития, однако общее равновесие может быть обеспечено их сближением. Выскажем предположение, как сближение циклов социо-природной системы должно отражаться на управлении им, чтобы система вошла в цикл благополучного обновления. При

этом важно не допустить появления опасных для системы последствий, представленных на рис. 8.

Поскольку управление климатическим процессом утопично, природные системы “самонастраиваются” при определенном участии ускоряющего этот процесс человека (рекультивация, мелиорация и т.д.), а принятая стратегия развития экономического блока напрямую соответствует его обновлению, остается решить задачу, как ускорить переход системы социального блока к фазе реструктуризации, без которой развитие экономического блока затормозится, а то и вовсе станет невозможным. Как тут не вспомнить советский лозунг “Кадры решают все!”. В настоящее время развитие этого блока имеет противоположный от остальных вектор развития, дестабилизирующий систему. В табл. 1 показаны механизмы ускорения реструктуризации этого блока. Они предложены нами на основании изучения местной ситуации, а также имеющихся разработок рекомендаций по стабилизации всей социо-природной системы (Pascual et al., 2022).

Дадим некоторые пояснения к табл. 1. Развитие инновационной экономики сопряжено не толь-

Таблица 1. Механизмы ускорения реструктуризации социального блока

Направление действий	Взаимодействующие блоки	
	Экономический	Природный
Развитие инновационной экономики	+	+
Создание материальных стимулов	+	
Формирование фокусных групп поддержки	+	+
Обеспечение комплексного развития	+	+
Создание материальных стимулов	+	
Формирование региональной идентичности населения	+	+



Рис. 9. Комплекс мер по стимулированию адаптационного развития системы для ее обновления.

ко с новыми отраслями экономического блока, но и с диверсификацией использования ресурсов природного блока: ветра – для развития “зеленой энергетики”, озерных систем – для развития аквакультуры, местных видов растений – для решения проблем рекультивации отвалов и т.д. Формирование фокусных групп поддержки возможно не только за счет адептов инновационных отраслей экономики, но и за счет различных экологических групп населения, возникающих благодаря стремлению к сохранению природы.

Обновление всей социоприродной системы возможно путем обеспечения комплексности адаптационных мероприятий, стимулирующих сближение перехода/приближения ее отдельных блоков к общему циклу обновления (рис. 9).

Раскроем возможное содержание предлагаемых адаптационных мероприятий. Потепление климата позволяет снизить расходы на рекультивацию пустошей за счет лучшей приживаемости высаживаемых культур, на обогрев помещений за счет сокращения отопительного сезона до 20 дней, увеличивает продолжительность период летнего туристического сезона на месяц и др., что необходимо учитывать в планировании муниципальных бюджетов. Уже в настоящее время в Мурманской области осуществляются мероприятия, предусмотренные Стратегией развития Арктической зоны Российской Федерации, реализуемые как в целом для региона, так и в его муниципальных образованиях с учетом местных условий⁷. Формирование фокусных групп для продвижения преобразований – известный социологический прием. Важность сбалансиро-

ванного развития рассмотрена нами выше. Государственная инновационная политика России предусматривает использование материального стимулирования (приоритетное финансирование прорывных направлений науки, налоговые преференции и др.). В Мурманской области уже существуют инновационные ваучеры для финансирования разработок инженерных решений, научных изысканий в промышленности, туризме и т.д., грантовая поддержка инноваций в сфере IT и другие формы материального стимулирования, которые требуют дальнейшего развития.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Осуществляемая ныне стратегия устойчивого развития, отраженная во всех муниципальных и областной программах, пока слабо учитывает панархический характер социоприродной системы. Ни в одной из них нет оценки кумулятивного эффекта современных векторов ее развития. Отсюда – снижение эффективности многих мероприятий, оценка которой не проводится, хотя примеры можно привести уже сейчас. Так, при благоустройстве Комсомольской набережной в Мончегорске работы в 2022 г. осуществлялись только с июня, тогда как уже в мае температуры воздуха позволяли это сделать, обеспечив более благоприятные условия для приживаемости высаженных культур. В технологических программах металлургического производства в Мончегорске пока не учитывается возможность повышения эффективности применения физико-химических геотехнологий переработки бедного и техногенного сырья, содержащего цветные металлы, за счет увеличения продолжительности сезона биовыщелачивания (Сценарии ..., 2019).

Устойчивость социоприродной системы – это ее способность поглощать возмущения и ре-

⁷ Прогноз социально-экономического развития муниципального округа город Мончегорск с подведомственной территорией Мурманской области до 2029 года. <http://monchegorsk.gov-murman.ru> (дата обращения 26.05.2024); О прогнозе социально-экономического развития муниципального образования город Полярные Зори с подведомственной территорией на 2024 год и на период до 2026 года. <http://www.pz-city.ru> (дата обращения 26.05.2024).

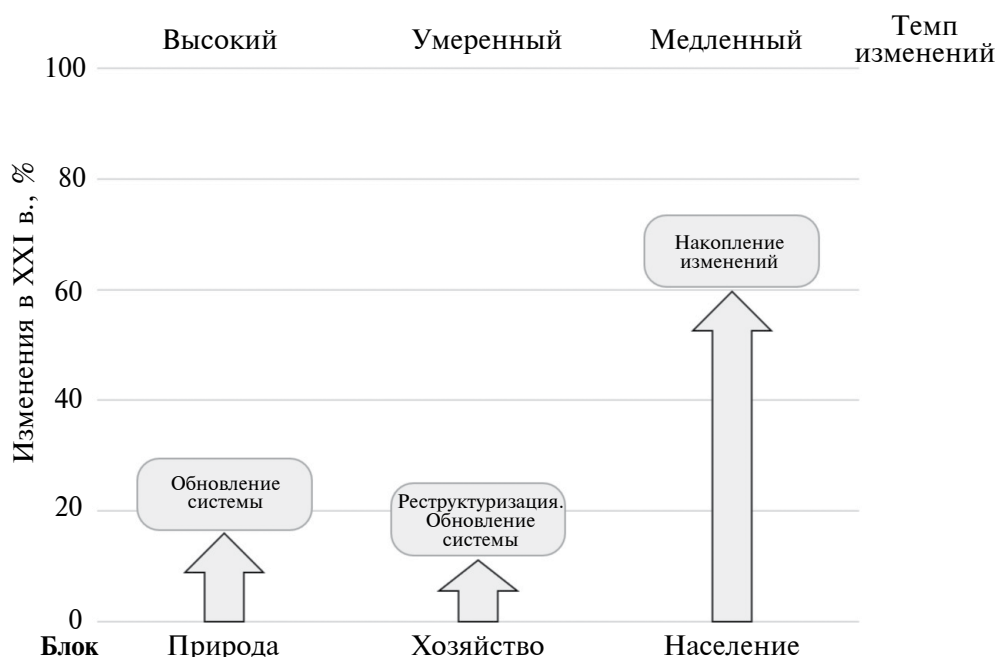


Рис. 10. Общая схема циклов развития блоков социо-природной системы.

организовываться, претерпевая изменения, сохраняя при этом свои основные функции. Устойчивость во многом определяется соотношением циклов развития системы исследуемой территории (рис. 10), гармонизация которых является сложной управленческой задачей.

Выявленные современные циклы развития блоков системы, среди которых наиболее динамичен природный в силу климатических изменений, четко обозначают направления их гармонизации в целях обеспечения адаптивного развития. Климатический фактор, обеспечивший переход природного блока в цикл обновления, оказывает неоднозначное влияние на развитие экономического и социального блоков, однако в целом стимулирует их общую реструктуризацию.

Гармонизация циклов требует анализа конкретных характеристик векторов развития блоков системы, существующих препятствий, приемлемых состояний их реструктуризации и преследуемых целей обновления. Возможные управленческие решения заключаются в разработке комплексных муниципальных планов, координирующих развитие экономики и социума на фоне потепления климата с использованием сценарного подхода. Решение управленческих задач осложняется и разномасштабными пространственно-временными циклами развития внутри самой социоприродной системы. Особого внимания заслуживает изучение экологических препятствий/порогов развития, для анализа которых уже имеется обширная база данных, а также возможности появления “черных лебедей”, связанных с экономической конъюнктурой и геополитической ситуацией.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено по теме двух Государственных заданий географического факультета МГУ: № 121040100322-8 и № 121051100162-6.

FUNDING

The study was carried out on the topic of two State assignments of the Faculty of Geography of the Moscow State University: nos. 121040100322-8 and 121051100162-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Второй оценочный докл. Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: общее резюме / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). М.: Росгидромет, 2014. 60 с.
- Демин В.И. Основные климатические тенденции на Кольском полуострове за период инструментальных метеорологических измерений // Тр. Кольского науч. центра РАН. 2012. Т. 1. № 2. С. 98–110.
- Оценочный докл. об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: общее резюме / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). М.: Росгидромет, 2008. 29 с.
- Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2020 году / Министерство природных ресурсов, экологии и рыбного хозяйства Мурманской области. Мурманск, 2021. 199 с.
- Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2022 году / Министерство

- природных ресурсов, экологии и рыбного хозяйства Мурманской области. Мурманск, 2023. 151 с.
- Евсеев А.В., Красовская Т.М. Кумулятивный эффект взаимодействия климатических и техногенных характеристик в панархической геосистеме импактной зоны Мурманской области // География: развитие науки и образования. 2021. Т. 2. С. 55–59.
- Евсеев А.В., Красовская Т.М. Техногенные энергетические потоки в бассейне оз. Имандра (Мурманская область) // География: развитие науки и образования. 2022. С. 47–51.
- Ключникова Е.М., Исаева Л.Г., Маслобоев В.А. и др. Сценарии развития ключевых отраслей экономики Мурманской области в контексте глобальных изменений в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2017. № 1 (25). С. 19–31.
- Корытный Л.М. Бассейновая концепция в природопользовании / отв. ред. В.А. Снытко. Иркутск: ИГ СО РАН, 2001. 163 с.
- Красовская Т.М. Природопользование Севера России. М.: Географический фак-тет МГУ, 2008. 288 с.
- Сценарии развития Мурманской области в условиях глобальных неопределенностей и изменений климата / кол. авторов; под ред. В.А. Маслобоева, Л.А. Рябовой, Е.М. Ключниковой. Апатиты: КНЦ РАН, 2019. 52 с.
- Экологический атлас Мурманской области / гл. ред. Г.В. Калабин. М.—Апатиты, 1999. 48 с.
- Экологический атлас России. Мин-во природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Русское географическое общ-во, Моск. гос. ун-т имени М.В. Ломоносова / гл. ред. Н.С. Касимов и В.С. Тикунов; отв. ред. В.Р. Венчикова и Т.В. Котова. М.: Феория, 2017. 509 с.
- Barrett R.T., Hollister R.D., Oberbauer S.F., Tweedie C.E. Arctic plant responses to changing abiotic factors in northern Alaska // Amer. J. of Botany. 2015. № 102 (12). P. 2020–2031.
- <https://doi.org/10.3732/ajb.1400535>
- Braat L.C., Rudolf D.G. The ecosystem services agenda: bridging the worlds of natural science and economics, conservation and development, and public and private Policy // Ecosystem Services. 2012. № 1 (1). P. 4–15. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.011>
- Bousquet F., Botta A., Alinovy L., et al. Resilience & Development: Mobilizing for Transformation // Ecology and Society. 2016. № 21 (3). Art. 40. <https://doi.org/10.5751/ES-08754-210340>
- Farley J., Voinov A. Economics, socio-ecological resilience and ecosystem services // J. of Environ. Management. 2016. Vol. 183. P. 389–398.
- Gunderson L., Holling C. Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems. Washington-Covelo-London: Island Press, 2002. 507 p.
- May J., Hollister R., Betway K., et al. NDVI changes show warming increases the length of the green season at tundra communities in Northern Alaska: A Fine-Scale Analysis // Front. Plant Sci. 2020. Art. 1174. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01174>
- Pascual U., Mcelwee P., Diamond S., et al. Governing for transformative change across the biodiversity–climate–society nexus // BioScience. 2022. June. <https://doi.org/10.1093/biosci/biac031>
- Walker B., Holling C., Carpenter S., et al. Resilience, adaptability and transformability in social–ecological systems // Ecology and Society. 2004. № 9 (2). Art. 5. <https://doi.org/10.5751/ES-00650-090205>
- Weber J.-L. Beyond GDP: Ecosystem services as components of progress, wealth and well-being // Solutions for Sustaining Natural Capital and Ecosystem Services. Proc. Int. Conference and Workshop. Salza Castle and Kiel Univ., 2010.
- Wilson S., Wilson L., Pearson L., et al. Separating adaptive maintenance (resilience) and transformative capacity of social–ecological systems // Ecology and Society. 2013. № 18 (1). Art. 22. <https://doi.org/10.5751/ES-05100-180122>

Climatic Factor in the Modern Cycle of Development of Socio-Natural Systems (on the Example of the Lake Imandra Basin)

A. V. Evseev^a and T. M. Krasovskaya^{a, *}

^aLomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*e-mail: krasovsktex@yandex.ru

For several decades a panarchic type of social-natural system has been formed in the territory of the Imandra basin (Murmansk oblast): within certain time intervals the development of its “nature–society–economy” blocks can be multidirectional, multi-temporal and multi-scale. The modern system of nature management in the territory determines the synergy of matter-energy flows produced by the blocks, which reflects the panarchic nature of the system. The modern development cycles of the social-natural system blocks were analysed in order to reveal the mechanisms for achieving their renewal in accordance with sustainable development. This reflects the aim of the research. The analysis was based on the processing of thematic publications and statistical data, results of field ecological-landscape studies conducted by the authors. Different rates of transformation of the system blocks were clearly manifested in the 21st century, each block having different stages of development. The climatic factor controlling the development of the natural block was clearly manifested since the last third of the 20th century and stimulated the renewal of the system. The modern stage of development of the social block was characterised by the accumulation cycle of changes, and the economic block by the restructuring cycle. The socio-natural system of the territory during its development overcomes certain thresholds—turning points of its vectors changes. Signs of overcoming the threshold of disturbances destroying the natural block by reducing the

anthropogenic load and intensification of the biogeochemical cycle due to climate warming have been marked. Harmonisation of development cycles is a complex management task, the solution of which requires an analysis of the specific characteristics of the system blocks, the existing obstacles to their development, the acceptable states of their restructuring and the objectives of their renewal. The socio-natural system does not have an absolute coincidence of development cycles, but the general equilibrium can be ensured by their convergence. Mechanisms have been proposed to accelerate the restructuring cycle of the social block for its renewal.

Keywords: panarchic system, development cycle, climatic vector, adaptation, management, Lake Imandra basin

REFERENCES

- Barrett R.T., Hollister R.D., Oberbauer S.F., Tweedie C.E. Arctic plant responses to changing abiotic factors in northern Alaska. *Amer. J. of Botany*, 2015, vol. 102, no. 12, pp. 2020–2031. <https://doi.org/10.3732/ajb.1400535>
- Bousquet F., Botta A., Alinovy L., et al. Resilience & development: mobilizing for transformation. *Ecol. Soc.*, 2016, vol. 21, no. 3, art. 40. <https://doi.org/10.5751/ES-08754-210340>
- Braat L.C., Rudolf D.G. The ecosystem services agenda: bridging the worlds of natural science and economics, conservation and development, and public and private Policy. *Ecosyst. Serv.*, 2012, vol. 1, no. 1, pp. 4–15. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.011>
- Demin V.I. The principle climatic tendencies at the Kola peninsula within the period of instrumental meteorological monitoring. *Tr. Kol'sk. Nauch. Ts. RAN*, 2012, vol. 1, no. 2, pp. 98–110. (In Russ.).
- Doklad o sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Murmanskoi oblasti v 2020 godu* [Report on the State and Environmental Protection of the Murmansk Region in 2020]. Murmansk, 2021. 199 p.
- Doklad o sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Murmanskoi oblasti v 2022 godu* [Report on the State and Environmental Protection of the Murmansk Region in 2022]. Murmansk, 2023. 151 p.
- Ekologicheskii atlas Murmanskoi oblasti* [Ecological Atlas of the Murmansk Region]. Kalabin G.V., Ed. Moscow: Apatity, 1999. 48 p.
- Ekologicheskii atlas Rossii* [Ecological Atlas of Russia]. Kasimov N.S., Tikunov V.S., Eds. Moscow: Feoria Publ., 2017. 509 p.
- Evseev A.V., Krasovskaya T.M. Cumulative effect of climatic and technogenic characteristics in panarchic geosystem in the impact zone of the Murmansk region. *Geogr.: Razvit. Nauki Obrazov.*, 2021, vol. 2, pp. 55–59. (In Russ.).
- Evseev A.V., Krasovskaya T.M. Technogenic energy fluxes in the lake Imandra basin, Murmansk region. *Geogr.: Razvit. Nauki Obrazov.*, 2022, vol. 2, pp. 47–51. (In Russ.).
- Farley J., Voinov A. Economics, socio-ecological resilience and ecosystem services. *J. Environ. Manage.*, 2016, vol. 183, pp. 389–398.
- Gunderson L., Holling C. *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Washington-Covelo-London: Island Press, 2002. 507 p.
- Kluchnikova E.M., Isaeva L.G., Masloboev V.A., et al. Scenarios for the development of the Murmansk Region key economic sectors in the context of global changes in the Arctic. *Arktika: Ekol. Ekon.*, 2017, no. 1, pp. 19–31. (In Russ.).
- Korytnyi L.M. *Basseinovaya kontseptsiya v prirodopol'zovanii* [Basin Concept in Nature Management]. Snytko V.A., Ed. Irkutsk: IG SO RAN, 2001. 163 p.
- Krasovskaya T.M. *Prirodopol'zovanie na Severe Rossii* [Environmental Management in the North of Russia]. Moscow: URSS, 2008. 288 p.
- May J., Hollister R., Betway K., et al. NDVI changes show warming increases the length of the green season at tundra communities in Northern Alaska: a fine-scale analysis. *Front. Plant Sci.*, 2020, art. 1174. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01174>
- Otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviy na territorii Rossiiskoi Federatsii: obshchee rezyume* [Assessment Report on Climate Change and Its Consequences on the Territory of the Russian Federation: General Summary]. Moscow: Rosgidromet, 2008. 29 p.
- Pascual U., McElwee P., Diamond S., et al. Governing for transformative change across the biodiversity–climate–society nexus. *BioScience*, 2022. <https://doi.org/10.1093/biosci/biac031>
- Stsenarii razvitiya Murmanskoi oblasti v usloviyakh global'nykh neopredelennostei i izmenenii klimata* [Scenarios for the Development of the Murmansk Region in the Context of Global Uncertainties and Climate Change]. Masloboeva V.A., Ryabovoi L.A., Klyuchnikovoi E.M., Eds. Apatity: Kol'skii Nauchnii Tsentr RAN, 2019. 52 p.
- Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii: obshchee rezyume* [The Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Change and Its Consequences on the Territory of the Russian Federation: General Summary]. Moscow: Rosgidromet, 2014. 59 p.
- Walker B., Holling C., Carpenter S., et al. Resilience, adaptability and transformability in social–ecological systems. *Ecol. Soc.*, 2004, vol. 9, no. 2, art. 5. <https://doi.org/10.5751/ES-00650-090205>
- Weber J.-L. Beyond GDP: Ecosystem services as components of progress, wealth and well-being. In *Solutions for Sustaining Natural Capital and Ecosystem Services. Proc. International Conference and Workshop. Salzau Castle and Kiel University*, 2010.
- Wilson S., Wilson L., Pearson L., et al. Separating adaptive maintenance (resilience) and transformative capacity of social–ecological systems. *Ecol. Soc.*, 2013, vol. 18, no. 1, art.22. <https://doi.org/10.5751/ES-05100-18012>

СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

УДК 551.583.63

ДИНАМИКА ПРОИЗВОДСТВА ЗЕРНА В РОССИИ: СООТНОШЕНИЕ ПОЛИТИЧЕСКОГО И КЛИМАТИЧЕСКОГО ФАКТОРОВ В ИСТОРИЧЕСКОМ КОНТЕКСТЕ

© 2024 г. Н. М. Дронин^{1, *}, Д. И. Ковбашин¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: ndronin@gmail.com

Поступила в редакцию 25.10.2023 г.

После доработки 30.04.2024 г.

Принята к публикации 16.05.2024 г.

В последние годы Россия зарекомендовала себя как ведущий мировой экспортер зерна. Рекордный рост урожайности зерновых в последнее десятилетие происходит на фоне ухудшения климатических условий, предсказанных моделями глобальной циркуляции. В контексте российской аграрной истории такой рост производства зерна выглядит исключительным, так как текущие темпы годового роста производства зерна примерно вдвое выше, чем в любом историческом периоде, когда происходила модернизация российского аграрного сектора. В связи с этим в статье обсуждается характер климатических изменений и аграрной политики в последнее десятилетие и их вклад в ускоренный рост производства зерна в современный период на основе регрессионных моделей урожайность—погода. Анализ результатов, полученных с помощью регрессионных моделей за период 1958–2020 гг., свидетельствует о том, что последнее десятилетие отличается отчетливой дивергенцией реальных и климатически обусловленных (моделируемых) урожаев в главной зернопроизводящей зоне страны. Регионы с усиливающейся дивергенцией между результатами регрессионных моделей и реальной урожайностью зерновых образуют географически компактную группу и охватывают два макрорегиона — Северный Кавказ и Центрально-Черноземный район. В то время как в остальных регионах наблюдается по-прежнему хорошее согласие между модельными результатами и урожайностью. Успехи зернового хозяйства на юге Европейской России трудно объяснить климатическим фактором из-за заметного роста температур с небольшими изменениями осадков или даже их снижением, что обуславливает более засушливые условия в вегетационный период. Мы рассматриваем расхождение результатов климатических регрессионных моделей и реальных урожаев в этих регионах как свидетельство более значительного вклада сельскохозяйственных реформ в повышение урожайности. Эти реформы в первую очередь приносят пользу агрохолдингам, занимающим большую часть наиболее продуктивных земель в Центрально-Черноземном и Северо-Кавказском макрорегионах.

Ключевые слова: статистические модели, урожайность зерновых, климатическая урожайность, регионы России, сельское хозяйство, сельскохозяйственные реформы, агрохолдинги

DOI: 10.31857/S2587556624030104 EDN: SODCDP

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В 2000 г. Россия занимала лишь 18 место по экспорту пшеницы в мире, а в 2010-х годах стала крупнейшим поставщиком зерна на мировые рынки. Федеральная программа развития сельского хозяйства поставила цель к 2020 г. достичь валового сбора зерна в 115 млн т, а экспорта — 30 млн т¹. Но уже в 2016 г. экспорт зерна достиг

30.5 млн т при сборе 117 млн т. Европейский банк реконструкции и развития оценил максимальный потенциал производства зерна в России в 126 млн т, предполагая, что агроклиматические условия в России аналогичны таковым в Канаде, где текущая урожайность составляет 3.54 т/га (EBRD-FAO ..., 2008). Аналогичным образом, Российский институт конъюнктуры аграрного рынка прогнозировал в 2012 г., что производство зерна в России в 2019 г. достигнет 125 млн т, а экспорт зерна — примерно 45–50 млн т (Schierhorn et al., 2014). Россия

¹ Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия — Правительство России (government.ru).

превысила и эти прогнозы: в 2017 г. было собрано 134.1 млн т, из которых 48.8 млн т зерна было экспортировано². В 2022 г. установлен новый рекорд по сбору зерна — 157.7 млн т, а в 2023 г. получен урожай в 140.2 млн т.

В контексте российской аграрной истории такой рост производства зерна выглядит исключительным. В советский период российское сельское хозяйство ни разу не смогло выполнить пятилетние планы. Климат справедливо признавался главным фактором неустойчивости урожаев зерновых культур в России. Погода определяла большие колебания урожайности из года в год. Но и среднесрочные колебания климата также были ответственны за снижение средней урожайности в разные десятилетия. В России наблюдалось несколько десятилетий с преобладанием неблагоприятной погоды (1930-е, 1950-е, 1990-е годы), но некоторые десятилетия отличались относительно хорошей погодой (1910-е, 1970-е, 1980-е годы) (Dronin and Kirilenko, 2013). В прошлом веке было также несколько эпизодов быстрого роста урожайности зерновых, когда аграрная политика, ориентированная на развитие рынка или его элементов, совпадала с благоприятными погодными условиями (столыпинские реформы в начале 1910-х годов, реформы Косыгина в конце 1960-х годов). Однако текущие темпы годового роста производства зерна примерно вдвое выше, чем в любом из таких исторических эпизодов. В статье обсуждаются характер климатических изменений и аграрной политики в последнее десятилетие как возможные причины ускоренного роста производства зерна в современный период.

Успехи зернового хозяйства России трудно объяснить климатическим фактором, особенно на юге Европейской России. Центральное Черноземье и Северный Кавказ испытывают заметный рост температур с небольшими изменениями или даже снижением осадков, что привело к более засушливым условиям в вегетационный период. Например, с 1960-х по 2010-е годы в Воронежской области средняя температура в период с апреля по сентябрь увеличилась на 1.8°C. Хотя общее количество осадков не изменилось, они становятся более интенсивными. За ливневыми дождями обычно следует жаркая и сухая погода с суховеями, что приводит к высокому испарению почвы и истощению запасов влаги в почвах (Гордеев, Турусов, 2015). Летом 2020 г., впервые с 1892 г., знаменитый колодец Докучаева в Каменной степи высох, так как уровень грунтовых вод упал ниже 8 м.³ В Ставропольском крае уве-

личение частоты дней с температурой выше 40°C наблюдалось на 12 метеостанциях из 16. За 18 последних лет произошло восемь катастрофических ливней с выпадением более 100 мм осадков⁴. В течение того же периода времени наблюдались три крупные продолжительные засухи (2010, 2012, 2014 гг.) (Кузнецова, 2019).

Российские СМИ регулярно описывают погодные трудности со ссылкой на местных сельхозпроизводителей и руководителей хозяйств. В этом отношении история рекордного урожая 2017 г. показательна. Весной и в начале июня в СМИ появились многочисленные сообщения о неблагоприятных погодных условиях. Нестабильная погода с дождями и очень сильными колебаниями температуры в июне наблюдалась в Центральном, Северо-Западном и Поволжском макрорегионах. Сообщалось, что многие районы на Урале в течение нескольких недель страдали от холодной и дождливой погоды. В конце мая заморозки повредили посевы различных культур на площади до 150 тыс. га в Мордовии, где местным властям пришлось объявить даже чрезвычайную ситуацию. Холодная погода с температурой 2–3°C ниже нормы и дождями, продолжающимися без перерыва в течение 2–5 дней, наблюдалась на Северном Кавказе. Гидрометеорологическая служба России сообщила, что зерно созревает слишком медленно из-за частых дождей и чрезмерной атмосферной влаги в сочетании с заболачиванием почв в некоторых регионах, что вызывает распространение грибка. Минсельхоз сообщил об уничтожении урожая от проливных дождей и града в некоторых районах Северного Кавказа. В местной прессе также отмечены публикации о гибели озимых посевов в Ярославской и Орловской областях. Первый официальный прогноз по производству зерна Минсельхозом предполагал урожай около 110 млн т. В начале июня министерство пересмотрело свой прогноз в сторону понижения, установив его на уровне 100–103 млн т. Снижение прогноза объяснялось тем, что погодные условия оказались значительно хуже, чем в 2016 г., когда было собрано 117 млн т⁵. Министерство ошиблось в своих прогнозах на 30 млн т. Фактическое производство в 2017 г. достигло исторического максимума в 134.1 млн т. Наибольшие урожаи были собраны в регионах Северного Кавказа и Центрального Черноземья.

Ухудшение климатических условий к 2020-м годам предсказывалось большинством моделей глобальной циркуляции (МГЦ), которые показывали либо уменьшение, либо незначительное увеличение осадков на фоне повышения температуры на юге Европейской России (Bobylyev et

² http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/commodities_by_country_exports

³ <https://riavm.ru/districts/talovsky/vpervye-za-128-let-v-dokuchaevskom-gidrologicheskom-kolodtse-voronezhskoy-oblasti-ischezla-voda/> (дата обращения 08.09.2023).

⁴ Влияние изменения климата Ставропольского края на экономику и экологию региона (APK-news.ru).

⁵ <https://www.gazeta.ru/business/2017/06/15/10721987.shtml>.

al., 2012; Kiselev et al., 2013). В связи с изменением климата увеличивается вероятность сильных засух на Северном Кавказе и в Западной Сибири (Павлова, Варчева, 2017; Alcamo et al., 2007), что подтверждается более частыми засухами в 1999–2015 гг. по сравнению с 1982–1998 гг. (Вильфанд и др., 2016). Росгидромет оценивал возможное падение производства зерна на 10–20% к 2035 г. относительно конца XX в. из-за растущего дефицита влаги в основном зернопроизводящем поясе (Второй ..., 2014). В модели Алкамо и др. (Alcamo et al., 2007) климатически обусловленная урожайность (т.е. избавленная от агротехнического тренда) для 2020-х годов прогнозировалась на 6–12% ниже по сравнению с периодом 1960–1990 гг. Павлова и др. (Pavlova et al., 2018) оценивает снижение урожайности яровой пшеницы на 6% в 2030-х годах, особенно сильное падение ожидается в Центрально-Черноземном районе из-за значительного увеличения засушливости. Наш ранний прогноз (Lioubimtseva et al., 2015) производства зерна и зернового баланса России для 2020 г. разрабатывался для двух сценариев: трендового и с учетом климатических изменений. В трендовом сценарии средний объем производства зерна в России в 2020 г. оценивался на уровне не выше 100 млн т, а с учетом изменения климата – на уровне 90–93 млн т. Большинство МГЦ также предсказывали заметный рост урожаев в менее продуктивных центральных и северных районах лесной зоны, а также в Восточной Сибири, где климат становится значительно мягче с повышением температуры и увеличением количества осадков (Alcamo et al., 2007). Данные прогнозы пока не подтверждаются: юг европейской части России продолжает играть роль главного зернопроизводящего региона, тогда как вклад других регионов продолжает снижаться в силу экономических, демографических и инфраструктурных проблем.

Лобелл и др. (Lobell, 2009; Lobell et al., 2011) показали, что климатические изменения уже вызвали снижение климатически обусловленной урожайности российской пшеницы на 3.9–6.5% за десятилетие в период с 1980 по 2008 г. В (Сиротенко, Павлова, 2012), напротив, был обнаружен рост климатической урожайности за период с 1975 по 2006 г., равный 0.4% за десятилетие в Центральном экономическом регионе и до 2.8% за десятилетие в Поволжье, но авторы делали расчет для озимых культур. Однако в более поздней работе (Павлова, Карачёнок, 2020) показано, что тренды климатически обусловленной урожайности озимой и яровой пшеницы отрицательны на большей части территории юга Европейской России. Средняя за 2006–2015 гг. климатически обусловленная урожайность яровой пшеницы, по данным этих авторов, составляет 75% от уровня 1961–1990 гг. Отрицательные

тренды климатически обусловленной урожайности в основных зерновых районах Европейской территории России на фоне продолжающегося потепления вызваны аридизацией и напряженностью термического режима вегетационного периода зерновых культур. Согласно моделям Беляевой и Бокушевой (Belyaeva and Bokusheva, 2018), снижение урожайности связано, прежде всего, с ростом летних температур. Каждый дополнительный тепловой день при базовой температуре 25°C должен вызывать снижение климатически обусловленной урожайности озимой пшеницы на 0.8%, ярового ячменя – на 1% и яровой пшеницы – на 1.44%.

Таким образом, рост урожайности зерновых в последнее десятилетие происходит на фоне ухудшения климатических условий в главной зернопроизводящей зоне страны. Соответственно, высокие урожаи в последнее десятилетие должны быть объяснены другими, не климатическими факторами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данного исследования была оценка степени соответствия реальной и климатически обусловленной урожайности зерновых в России (и соответственно в РСФСР, если это касается статистики советского периода) на основе регрессионной модели урожайность–погода на период 1958–2020 гг. Наша эмпирико-статистическая модель для периода 1958–2010 гг. показала высокую корреляцию (0.75) между наблюдаемой и климатической (моделируемой) урожайностью зерновых, и в этом отношении недавний период 2000–2010 гг. вполне соответствует паттерну исторической динамики урожайности (Dronin and Kirilenko, 2013). Расширение временного ряда до 2020 г. позволило оценить, насколько современный период рекордных урожаев отличается от других исторических периодов. Кроме того, мы усовершенствовали примененный подход за счет использования трех регрессионных моделей.

Статистика урожайности на региональном уровне, использованная в данном исследовании, взята из советских и российских официальных статистических сборников за соответствующие годы и представляется надежной (Дронин, 2014). В частности, в сборнике 2000 г. приводятся откорректированные данные по урожайности для позднесоветского периода, которые не меняют характер динамики урожайности за рассматриваемый период (Сельское ..., 2000). В (Растяников, Дерюгина, 2009) предложена авторская коррекция официальных данных до 1991 г., но с тем же результатом, показывающим возможность использования советских данных для ре-

грессионной модели на протяженный исторический период.

Следуя стандартной процедуре, следующим шагом являлось устранение так называемого агротехнического тренда из временных рядов урожайности, связанного с постепенными улучшениями в агротехнологиях. Понятие агротехнического тренда и способы его определения были впервые предложены российским (советским) статистиком В.М. Обуховым (1927). Полученные в результате исключения агротехнического тренда разностные величины используют в качестве зависимой переменной в модели множественной регрессии с климатическими переменными, такими как температура и осадки, используемыми в качестве предикторов (Lobell and Ortiz-Monasterio, 2007; Matiu et al., 2017; Nicholls, 1997).

В качестве климатических переменных использовались среднегодовые, сезонные и месячные температуры и осадки. Среднемесячные температуры воздуха были получены с помощью глобального продукта GISS GISTEMP v4 SBBX. Tsurf250 Института космических исследований имени Годдарда НАСА (GISS), представленного по сетке $1^\circ \times 1^\circ$ с примененным фильтром сглаживания 250 км (Hansen et al., 1987; Lenssen et al., 2019). Для месячного количества осадков за 1958–2016 гг. мы использовали данные ежемесячного продукта V.2018 (V8) Глобального климатологического центра осадков (GPCC) (Schneider et al., 2018). Последние годы, отсутствующие в полностью проверенном продукте (2017–2019 гг.), были получены из ресурса First Guess (Schamm et al., 2014; Ziese et al., 2011). Осадки от обоих продуктов сравнивались за один перекрывающийся год (2016 г.) для обеспечения совместимости данных. Все данные были интерполированы в стандартную сетку $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ географической широты и долготы.

Климатические переменные были привязаны к административным единицам с использованием средневзвешенных значений. Весовые коэффициенты представляли собой площадь, занятую посевами в 1992 г. в каждой ячейке сетки (Ramankutty and Foley, 1998). Административные единицы с отсутствующими данными за 10 или более лет, а также административные единицы, в которых производство зерна было незначительным или отсутствовало вовсе, были исключены из рассмотрения, в результате чего было получено 59 территориальных единиц для дальнейшего анализа.

Для повышения надежности результатов мы использовали три модели: множественную линейную регрессию (MLR), регрессию Лассо (LR) и гребневую регрессию (RR). Для каждой модели были выбраны пять переменных с наилучшей объяснительной силой. Выбор перемен-

ных в моделях был индивидуальным для каждой административной единицы. Наиболее часто выбираемыми переменными (релевантными для не менее половины административных единиц) были количество осадков за вегетационный период (апрель–июль с положительными коэффициентами), количество осадков за период сбора урожая (август–сентябрь с отрицательными коэффициентами) и февральские осадки (с отрицательными коэффициентами). Из трех регрессий несколько лучший результат показала модель RR.

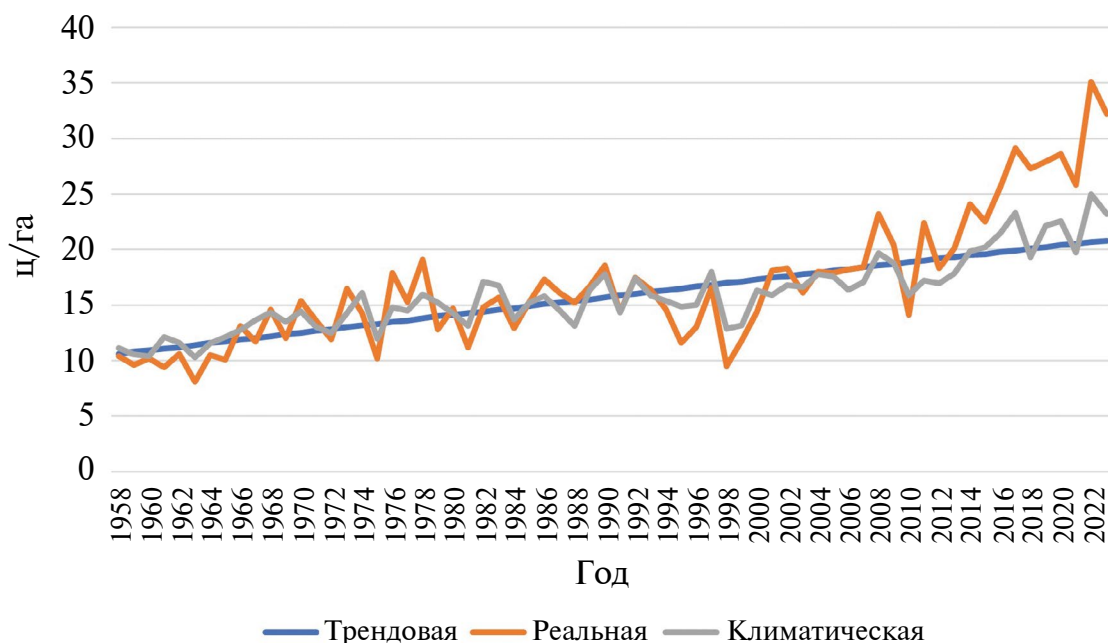
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты регрессионной модели показывают высокую корреляцию между реальной и климатически обусловленной урожайностью для периода 1958–2010 гг. и их отчетливую дивергенцию после 2010 г. (рис. 1). При этом климатическая урожайность не меняет характера своей динамики на протяжении всего периода, несколько повышаясь (в благоприятные годы) или понижаясь (в неблагоприятные годы) относительно трендовой урожайности. Ряд урожайности зерновых (1958–2023 гг.) имеет коэффициент вариации 9%, а климатической урожайности – 5%. Максимальные отклонения климатической урожайности от тренда находятся в диапазоне $\pm 10\%$. В последнее десятилетие это отклонение от тренда также составляет от -6% (2011–2015 гг.) до $+9\%$ (2016–2020 гг.) (табл. 1). Максимальные отклонения реальной урожайности от трендовых значений в исторический период более значительны – от -23% (1995–2000 гг.) до $+15\%$ (1976–1980 гг.) (см. табл. 1). Современный период (2016–2020 гг.) в этом отношении разительно отличается, так как превышение реальной урожайности над трендовыми значениями достигает исторического максимума в 42%, при этом модельная и наблюдаемая урожайность отчетливо расходятся (см. рис. 1).

В основе нашего подхода лежит предположение о том, что разница между смоделированной климатической и реальной урожайностью обусловлена влиянием политического фактора, под которым мы понимаем конкретные программы развития сельского хозяйства. Это предположение подтверждено следующим тестом. Основываясь на историческом анализе, экспертным образом присваивался каждому году либо положительный (+1), либо отрицательный (–1) индекс аграрной политики. Таким же образом были ранжированы отклонения реальной урожайности от расчетной климатической для всех регионов. Несмотря на упрощенный характер данного теста, между двумя рядами значений была получена относительно высокая корреляция (ранговая корреляция Спирмена), равная 0.53

Таблица 1. Средняя урожайность зерновых в России в 1958–2020 гг.: наблюдаемая, климатическая урожайность, прогнозируемая на основе погоды, разница между наблюдением и прогнозом (модель RR)

Период (годы)	Агротехнический тренд, ц/га	Реальная урожайность, ц/га	Отклонение реальной урожайности от тренда, ц/га	Предсказанное отклонение климатически обусловленной урожайности от тренда, ц/га
1958–1965	11.2	9.8	–1.3	+0.07
1966–1975	12.2	13.4	+1.2	+1.5
1976–1980	13.8	15.9	+2.2	+1.2
1981–1985	14.6	13.9	–0.6	+0.6
1986–1990	15.4	17.3	+2.0	–0.04
1991–1995	16.2	14.9	–1.3	+0.6
1995–2000	16.9	13.1	–3.9	–1.9
2001–2005	17.8	17.7	–0.1	–0.8
2006–2010	18.6	18.9	+0.3	–1.0
2011–2015	19.3	21.5	+2.2	–0.9
2016–2020	20.3	28.9	+8.7	+1.8

**Рис. 1.** Наблюдаемая и климатически обусловленная (модельная) урожайность зерновых (ц/га), осредненная по 59 регионам России (модель RR).

($p < 0.01$), что подтверждает сильное влияние аграрной политики на динамику урожайности зерновых в России в период 1958–2010 гг. (Dronin and Kirilenko, 2013).

Пространственный анализ показывает, что регионы с усиливающейся после 2010 г. дивергенцией между реальной и моделируемой урожайностью образуют географически компактную группу и охватывают два района – Северный Кавказ и Центрально-Черноземный (рис. 2). Во всех остальных регионах (за исключением Приморского края) наблюдается по-прежнему хоро-

шее согласие между моделируемой и реальной урожайностью.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе политический фактор определяется как конкретные государственные программы развития сельского хозяйства, которые имеют определенные временные исторические рамки. Если в пределах этих временных рамок разница между смоделированной климатической и реальной урожайностью показывает устойчивое отрицательное или положительное

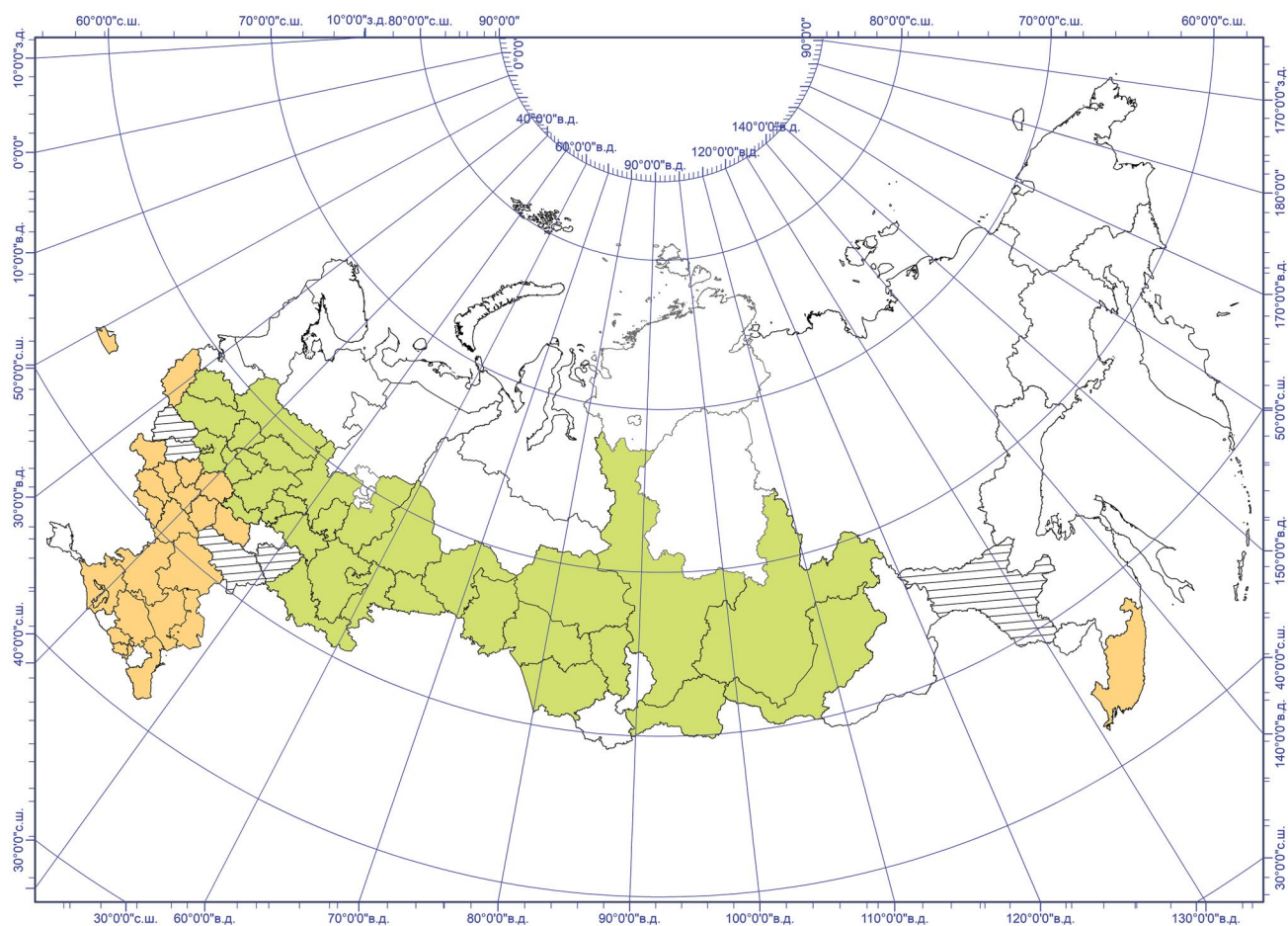


Рис. 2. Группы регионов России по степени дивергенции реальной и климатической урожайности зерновых: оранжевый цвет — регионы, где реальная урожайность заметно превышает климатически обусловленную; зеленый цвет — регионы, где расхождение реальной и климатической урожайности не наблюдается; штриховка — регионы, где превышение реальной урожайности над климатической не является статистически значимым.

отклонение, а не варьирует из года в год попеременно в положительную и отрицательную стороны, то есть основания считать, что эти систематические отклонения связаны с реализацией данной программы. В истории российского сельского хозяйства за последние 120 лет (начиная с реформ Столыпина) не было ни одного исторического периода, в котором аграрный сектор развивался вне какой-либо государственной программы развития (подъема, реформирования, ускорения и др.). Эти программы можно оценить по потерям потенциального (т.е. климатического) урожая в период их реализации (Dronin and Kirilenko, 2013). В 1995–2000 гг. потери потенциальной урожайности зерновых в размере 12% могут считаться ценой неудачных рыночных реформ в сельском хозяйстве в этот период. Программа освоения целинных земель 1957–1965 гг. стоила стране также 12% урожайности зерновых в Российской Федерации. Напротив, в периоды успешных (стимулирующих) программ развития, как в период реформ Косыгина (1965–1975 гг.), когда рост государственных инвестиций в сельское хозяйство СССР превы-

шал показатели США, производство зерновых (на единицу посевной площади) было на 10% выше моделируемых климатических урожаев. В рамках такой логики мы можем рассматривать и нынешний период рекордных урожаев, когда превышение реальных урожаев над климатическими составило более 30% (рис. 3).

Особенностью современного периода является то, что политика аграрных реформ началась в 2000 г. и в целом отличалась положительной динамикой урожайности, но быстрый рост урожайности начался только после 2012 г. (см. рис. 1, табл. 1). Первый период реформ в 2000-х годах позволил российскому сельскому хозяйству выйти из затяжного кризиса, но реальные урожаи были не выше трендовых показателей. Медленное развитие российского аграрного сектора в первое десятилетие реформ объяснялось многими причинами, такими как приоритет продовольственной безопасности и самообеспеченности, ограничение волатильности цен в поддержку животноводов (Wegren, 2013), экспортные ограничения при ограниченном внутреннем спросе (USDA, 2017), острая

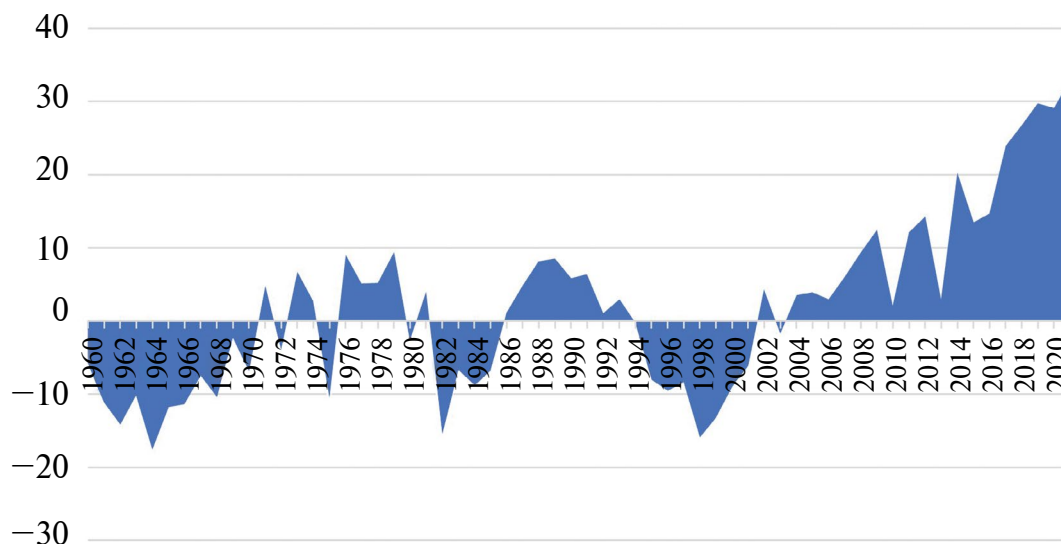


Рис. 3. Отклонение реальной от климатически обусловленной урожайности зерновых в 1958–2020 гг. (трехлетняя скользящая средняя), % от трендовых значений.

нехватка современной сельскохозяйственной техники (Алабушев и др., 2010), перегруженность инфраструктуры, включая сеть железных дорог и порты, плохое состояние зернохранилищ, удаленность сибирских регионов от рынков, минимальное использование агрохимикатов и недостаточное применение удобрений, недостаточные субсидии на региональном уровне (Kiselev et al., 2013), плохое качество семян (USDA ..., 2017), рост стоимости ввозимых ресурсов, включая семена, химикаты, горюче-смазочные материалы. Эти проблемы называются в числе медленно решаемых и после 2010 г.

В аграрной политике могут формулироваться одни цели и инструменты их достижения, но в ходе ее реализации могут быть получены и незапланированные результаты, которые обеспечивают реальный прогресс в сельском хозяйстве. Таким важным результатом, на наш взгляд, стало появление агрохолдингов.

В 1990-х годах реформы в сельском хозяйстве страны предполагали ускоренное развитие частного (семейного) сельхозпроизводителя. Но эта ставка на индивидуального сельхозпроизводителя не оправдала себя. Прямым, но непреднамеренным (Davydova and Franks, 2015) результатом рыночных реформ в России стало появление в 2000-х годах сверх крупных корпоративных хозяйств — агрохолдингов. Агрохолдинги появились, прежде всего, в главных сельскохозяйственных регионах страны, поглотив многие земли бывших колхозов и индивидуальных хозяйств (Davydova and Franks, 2015). Это стало общей тенденцией для трех зернопроизводящих стран: в настоящее время Россия, Украина и Казахстан имеют самый высокий уровень концен-

трации обрабатываемых земель даже по мировым стандартам (Deininger and Byerlee, 2011).

Это увеличение концентрации сельского хозяйства, по-видимому, определяется тем, как распределяются сельскохозяйственные субсидии. Основной интерес государственного регулирования заключается в увеличении производства со стратегической целью достижения продовольственной независимости, и фактическая поддержка широко варьируется в зависимости от производительного потенциала регионов. Разделение ответственности между федеральным правительством и региональными властями бывает не совсем ясным, а сам механизм перераспределения субсидий является непрозрачным (Kvartiuk and Herzfeld, 2021). Крупные предприятия, такие как агрохолдинги, имеют больше возможностей влиять на принятие решений о распределении субсидий между регионами и внутри них. В свою очередь федеральное правительство неоднократно выражало приоритетную поддержку крупным сельскохозяйственным предприятиям, рассматривая их как локомотивы аграрного развития (Wegren, 2021). Еще одним важным фактором является то, что федеральное правительство использует сельскохозяйственные субсидии для укрепления доминирования элит в регионах и обеспечения большей поддержки в избирательных кампаниях (Kvartiuk and Herzfeld, 2021).

В результате доступ к государственной поддержке, кредитам, инфраструктуре и рынкам различается в разных аграрных структурах и среди регионов. Мелкие сельхозпроизводители страдают от отсутствия доступа к новым технологиям, плохой связи с розничной торговлей, производителями продуктов питания, отсут-

ствия транспорта, нехватки рабочей силы, доступа к кредитам и других ограничений (Wegren, 2018). Это привело к снижению их доли в производстве продовольствия с 57% в 1997 г. до 35% в 2016 г. В то время как крупные агрохолдинги обладают доступом к инвестициям, федеральной поддержке и политическим лобби, неуклонно увеличивая свою долю в производстве (Wegren, 2018). Недостаточная поддержка аграрного сектора в дотационных регионах наряду с приоритизацией крупных предприятий привела к ускорению дивергенции регионов в развитии сельского хозяйства (Узун и др., 2012; Узун, Шагайда, 2020; Uzun et al., 2019).

Нынешний бум производства зерна в основном обусловлен компактной группой регионов в Центрально-Черноземном экономическом районе и Северо-Кавказском федеральном округе. Эти регионы отличаются плодородными почвами и относительно мягким климатом и имеют явные природные преимущества, несмотря на повышенный риск возникновения засух. Регионы также имеют самый высокий процент пахотных земель, управляемых агрохолдингами, часто владеющими более одного миллиона гектаров земли. В Центральном Черноземье агрохолдингами эксплуатируется 45% пахотных земель, на Северном Кавказе эта доля составляет 21%, в Поволжье — 17%, на Южном Урале — 9%, а в Западной Сибири — только 7% (Grouiez, 2012). Среди 100 крупнейших производителей зерна в России — 88 находятся в Центрально-Черноземном и Северо-Кавказском районах, 2 — в Поволжье и 4 — в Сибири (ВИАПИ, 2009).

Статистический анализ экономической эффективности агрохолдингов затруднен (Visser et al., 2017), поскольку эти структуры до сих пор не выделены Госкомстатом России в отдельную категорию хозяйств (Узун, Шагайда, 2020). По данным (Узун и др., 2012), агрохолдинги существенно отличаются по рентабельности (% от затрат) — от 26% в хозяйствах, имеющих иностранных собственников (что более чем в два раза превышает средний показатель по всем остальным корпоративным хозяйствам в России), до —12.5% в муниципальных агрохолдингах. Во всяком случае, имеющиеся данные показывают, что использование удобрений в агрохолдингах на 260% выше, чем в других сельскохозяйственных компаниях (Узун и др., 2012). В 2009 г. средняя урожайность зерновых в России составила 1.79 т/га и 3.56 т/га в топ-100 крупнейших производителей зерна (ВИАПИ, 2009).

Воздействие на окружающую среду агрохолдингов может быть намного сильнее по сравнению со средними и мелкими хозяйствами из-за большей специализации, внесения удобрений и ядохимикатов, укрупнения полей и т.д. Многие агрохолдинги, следуя международной прак-

тике, добровольно принимают систему корпоративной социальной ответственности (КСО). Однако этот процесс все еще находится в зачаточном состоянии. Например, в Краснодарском крае только 7 из 20 крупнейших хозяйств упоминают деятельность в рамках КСО на своих сайтах (Visser et al., 2017). В других регионах страны такие программы единичны. Основной мотивацией для принятия концепции КСО российскими агрохолдингами является поддержание хороших отношений с местными властями и обеспечение доступа к земле путем развития социальной и физической инфраструктуры сельских районов (Davydova and Franks, 2015). Экологические инициативы со стороны агрохолдингов ограничиваются технологическими инновациями (безотвальная вспашка, капельное орошение, механическая борьба с сорняками и другие), тогда как развитие альтернативной энергетики или охрана биоразнообразия являются очень редкими в программах КСО (Gagalyuk and Schaft, 2018).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С точки зрения истории сельского хозяйства России за последние 120 лет современный период не имеет аналогов, так как впервые характеризуется отчетливой дивергенцией реальных и климатически обусловленных урожаев. Россия, возможно, смогла преодолеть фатальную зависимость сельскохозяйственного производства от климатических условий. В результате, Россия стала третьей по величине страной по экспорту зерна и первой — по экспорту пшеницы. Этот успех достигнут в основном за счет значительного повышения урожайности в двух макрорегионах: Центрально-Черноземном и Северо-Кавказском. Между тем, как это было предсказано моделями глобальной циркуляции, климатические условия для сельского хозяйства в этих макрорегионах не улучшаются, а скорее создают новые проблемы для сельхозпроизводителей. В период бума (2012–2020 гг.) семь крупных засух затронули 4.4 млн га сельскохозяйственных угодий и принесли убытки в среднем на 10.2 млрд руб. (Wegren and Nilssen, 2022).

Но именно эти регионы с плодородными почвами, прямым выходом к морским портам и наибольшей долей земель у агрохолдингов стали основными бенефициарами сельскохозяйственных реформ. Возможная роль агрохолдингов в нынешних успехах российского сельского хозяйства, не только в зерновом, но и других секторах аграрного сектора, заслуживает обстоятельного анализа. Несмотря на то, что агрохолдинги как отдельная категория хозяйств до сих пор не входят в официальную статистику, они привлекают значительную часть государственной финансовой поддержки и играют решаю-

шую роль в реализации сельскохозяйственного потенциала России. Более мелкие операторы и отдаленные нечерноземные регионы отстают в этом отношении. В лесных зонах России многие участки сельскохозяйственных угодий остаются заброшенными и сейчас заросли лесом. Доступность государственной поддержки и кредитов, развитие инфраструктуры и близость к основным рынкам являются факторами растущей дивергенции российских регионов в отношении развития сельского хозяйства, что является еще одним (наряду с появлением агрохолдингов) непреднамеренным результатом государственной аграрной политики, которая была направлена на восстановление пахотных угодий во всех регионах в рамках доктрины усиления национальной продовольственной безопасности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, грант № 20-55-76005.

FUNDING

The study was carried out with financial support from the Russian Foundation for Basic Research, grant no. 20-55-76005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алабушев А.В., Гуреева А.В., Раева С.А. Состояние и перспективы развития семеноводства зерновых культур в России // Зерновое хозяйство России. 2010. № 6 (12). С. 13–17.
- ВИАПИ. Рейтинги крупнейших производителей сельскохозяйственной продукции России (2006–2008 гг.). М.: ВИАПИ, Энциклопедия российских деревень, 2009. 28 с.
- Вильфанд Р.М., Страшная А.И., Береза О.В. О динамике агроклиматических показателей условий сева, зимовки и формирования урожая основных зерновых культур // Тр. Гидрометцентра России. 2016. Вып. 360. С. 45–78.
- Второй оценочный докл. Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с.
- Гордеев А.В., Турусов В.И. Изменение плодородия черноземных почв в результате антропогенеза и способы его воспроизводства в современных системах земледелия / ред. А.В. Гордеев. Каменная степь. Воронеж: Истоки, 2015. С. 9–23.
- Дронин Н.М. Изменение климата и продовольственная безопасность России: исторический анализ и модельные прогнозы. М.: ГЕОС, 2014. 306 с.
- Кузнецова Н.Ф. Засухи в лесостепной зоне Центрально-Черноземного региона и критерии оценки их интенсивности // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2019. Т. 19. Вып. 3. С. 142–148.

- Обухов В.М. Движение урожаев зерновых культур в бывшей Европейской России в период 1883–1915 // Влияние неурожая на народное хозяйство России / под ред. В.Г. Громана. М.: РАНИИОН, 1927. С. 5–53.
- Павлова В.Н., Варчева С.Е. Оценки степени уязвимости территории и климатического риска крупных неурожая зерновых культур в зерносеющих регионах России // Метеорология и гидрология. 2017. № 8. С. 39–49.
- Павлова В.Н., Карачёнок А.А. Продуктивность зерновых культур на территории Европейской России при изменении климата за последние десятилетия // Метеорология и гидрология. 2020. № 1. С. 78–94.
- Растянкин В.Г., Дерюгина И.В. Урожайность хлебов в России. 1795–2007 / РАН. Институт востоковедения. М.: ИВ РАН, 2009. 192 с.
- Сельское хозяйство России. Стат. сб. М.: Госкомстат России, 2000. 414 с.
- Сиротенко О.Д., Павлова В.Н. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства. В кн: Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет, 2012. С. 165–189.
- Узун В., Шагайда Н. Развитие сельского хозяйства: от крупного импортера до экспортера / В. Гуриев и др. Российская экономическая политика: турбулентная декада 2008–2018. М.: Дело, 2020. С. 407–32.
- Узун В., Шагайда Н., Сарайкин В. Агрохолдинги России и их роль в производстве зерна. Исследования по политике перехода сельского хозяйства. ФАО Региональное Бюро для Европы и Центральной Азии, 2012. 33 с.
- Alcamo J., Dronin N., Endejan M., Golubev G., Kirilenko A. A new assessment of climate change impacts on food production shortfalls and water availability in Russia // Global Environ. Change. 2007. № 17 (3). P. 429–444.
- Belyaeva M., Bokusheva R. Will climate change benefit or hurt Russian grain production? A statistical evidence from a panel approach // Climatic Change. 2018. Vol. 149. P. 205–217.
- Bobylev S., Kiselev S., Romashkin R., Solov'eva S. The Adaptation Challenge: Key Issues for Crop Production and Livelihoods Under Climate Change in the Russian Federation. Oxford: Oxfam, 2012. 40 p.
- Davydova I., Franks J.R. The Rise and Rise of Large Farms: Why Agrohholdings Dominate Russia's Agricultural Sector // J. of the National Res. Univ. Higher School of Economics. 2015. Vol. 24 № 3. P. 133–159.
- Deininger K., Byerlee D. The Rise of Large Farms in Land Abundant Countries: Do They Have a Future // World Development. 2011. Vol. 40. № 4. P. 701–714.
- Dronin N.M., Kirilenko A.P. Weathering the soviet countryside: The impact of climate and agricultural policies on Russian grain yields, 1958–2010 // The Soviet and Post-Soviet Review. 2013. Vol. 40. № 1. P. 115–143.

- EBRD-FAO. Grain production and export potential in CIS countries. Fighting food inflation through sustainable investment. European Bank for Reconstruction and Development / Food and Agriculture Organization. London, 2008. 8 p.
- Gagalyuk T., Valentinov V., Schaft F. The corporate social responsibility of Ukrainian agroholdings: the stakeholder approach revisited // Systemic Practice and Action Research. 2018. № 31. P. 675–698.
- Grouiez P. Farming Strategies regarding the Production of Collective Goods in the Russian Agricultural Sector. LEMNA working paper EA 4272, Univ. of Nantes, 2012. 21 p.
- Hansen J.E., Lebedeff S. Global trends of measured surface air temperature // J. Geophys. Res. 1987. Vol. 92. P. 13345–13372.
- Kiselev S., Romashkin R., Nelson G.C., Mason-D'Croz D., Palazzo A. Russia's food security and climate change: looking into the future // Economics. 2013. Vol. 7. № 2013–39. P. 1–66.
- Kvartiuk V., Herzfeld T. Redistributive politics in Russia: The political economy of agricultural subsidies // Comparative Economic Studies. 2021. Vol. 63. № 1. P. 1–30.
- Lenssen N., Schmidt G., Hansen J., Menne M., Persin A., Ruedy R., Zyss D. Improvements in the GISTEMP uncertainty model // J. Geophys. Res. Atmos. 2019. Vol. 124. № 12. P. 6307–6326.
- Lioubimtseva E., Dronin N., Kirilenko A. Grain production trends in the Russian Federation, Ukraine and Kazakhstan in the context of climate change and international trade / A. Elbehri (Ed.). In: Climate change and food systems. Global assessments and implications for food security and trade. FAO: Rome, 2015. P. 212–237.
- Lobell D. Crop Responses to Climate: Time-Series Models / D.B. Lobell, M.B. Burke (Eds.). In: Climate Change and Food Security: Adapting Agriculture to a Warmer World. Springer, 2009. P. 85–98.
- Lobell D.B., Ortiz-Monasterio J.I. Impacts of day versus night temperatures on spring wheat yields: a comparison of empirical and CERES model predictions in three locations // Agron. J. 2007. Vol. 99. № 2. P. 469–477.
- Lobell D.B., Schlenker W., Costa-Roberts S. Climate Trends and Global Crop Production Since 1980 // Science. 2011. P. 333–616.
- Matiu M., Ankerst D.P., Menzel A. Interactions between temperature and drought in global and regional crop yield variability during 1961–2014 // PLoS ONE. 2017. Vol. 12. № 5. Art. e0178339. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178339>
- Nicholls N. Increased Australian Wheat Yield Due to Recent Climate Trends // Nature. 1997. Vol. 387. P. 484–485.
- Pavlova V., Shkolnik I., Pikaleva A., Efimov S., Karachenkova A., Kattsov V. Future changes in spring wheat yield in the European Russia as inferred from a large ensemble of high-resolution climate projections // Environ. Res. Lett. 2018. Vol. 14. Art. 034010.
- Ramankutty N., Foley J.A. Characterizing patterns of global land use: an analysis of global croplands data // Global Biogeochemical Cycles. 1998. Vol. 12. № (4). P. 667–685.
- Schamm K., Ziese M., Becker A., Finger P., Meyer-Christoffer A., Schneider U., Schröder M., Stender P. Global gridded precipitation over land: a description of the new GPCC First Guess Daily product // Earth System Science Data. 2014. Vol. 6. № 1. P. 49–60. <https://doi.org/10.5194/essd-6-49-2014>
- Schierhorn F., Faramarzi M., Prishchepov A.V., Koch F.J., Müller D. Quantifying yield gaps in wheat production in Russia // Environ. Res. Lett. 2014. Vol. 9. Art. 084017.
- Schierhorn F., Muller D., Prishchepov A., Balmann A. Grain potentials on abandoned cropland in European Russia. Paper prepared for presentation at the Annual World Bank Conference on Land and Poverty, World Bank. Washington, D.C., 23–26 April 2012.
- Schneider U., Becker A., Finger P., Meyer-Christoffer A., Ziese M. GPCC Full Data Monthly Product Version 2018 at 0.5°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historical Data, 2018. https://doi.org/10.5676/DWD_GPCC/FD_M_V2018_050
- USDA. Foreign Agricultural Service. Russian Federation. Grain and Feed Annual, 2017. 34 p.
- Uzun V., Shagaida N., Lerman Z. Russian agriculture: Growth and institutional challenges // Land Use Policy. 2019. Vol. 83. P. 475–487.
- Visser O., Spoor M., Mamonova N. Is Russia the emerging global “breadbasket”? Re-cultivation, agroholdings and grain production / S. Fortescue (Ed.). In: The Russian Economy. Critical Concepts in Economics. NY: Routledge, 2017. P. 1589–1610.
- Wegren S., Nilssen F. Introduction: Is Russia's Role in the International Agri-Food System Sustainable? In: Russia's Role in the Contemporary International Agri-Food Trade System. Switzerland: Palgrave Macmillan, Springer Nature, 2022. P. 1–34.
- Wegren S.K. Food security in the Russian Federation // Eurasian Geogr. Econ. 2013. Vol. 54. № 1. P. 22–41.
- Wegren S.K. Russian grain production: too much of a good thing? // Post Communist Economies. 2018. Vol. 30. № 6. P. 1–12. <https://doi.org/10.1080/14631377.2018.1470856>
- Wegren S.K. History, prospects, and scenarios for smallholders in Russia / D. Horváth (Ed.). In: Opportunities and Challenges of Smallholders and Smallholding. Nova Press, 2021. P. 1–60.
- Ziese M., Becker A., Finger P., Meyer-Christoffer A., Rudolf B., Schneider U. GPCC First Guess Product at 1.0°: Near Real-Time First Guess monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges based on SYNOP Data. 2011. https://doi.org/10.5676/DWD_GPCC/FG_M_100

Dynamics of Grain Production in Russia: Influence of Political and Climatic Factors in the Historical Context

N. M. Dronin^{a,*} and D. I. Kovbashin^a

^a*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

*e-mail: ndronin@gmail.com

In recent years, Russia has established itself as the world's leading grain exporter. The record increase in grain yields over the past decade has occurred against a backdrop of worsening climatic conditions predicted by most global circulation models. In the context of Russia's agricultural history, such an increase in cereal production looks exceptional, as the current annual growth rate of cereal production is about twice as high as in any historical period when the modernisation of Russia's agricultural sector took place. In this context, the nature of climate change and agricultural policy in the last decade and their contribution to the accelerated growth of grain production in the modern period are discussed on the basis of "yield-weather" regression models. Regression models for the period 1958–2020 show that the last decade has been characterised by a clear divergence between actual and climate-related (modelled) yields in the main grain-producing zone of the country. The regions with increasing divergence between regression model results and actual grain yields form a geographically compact group and include two regions, the North Caucasus and the Central Chernozem, while in the other regions there is still good agreement between regression models and yields. The success of cereal production in southern European Russia is difficult to explain in terms of climate, as there has been a marked increase in temperature with slight changes or even decreases in precipitation, leading to drier conditions during the growing season. We see the discrepancy between climate regression models and real yields in these regions as evidence of a larger contribution of agricultural reforms to higher yields. These reforms primarily benefit the farms that occupy most of the most productive land in the Central Chernozem and North Caucasus regions.

Keywords: statistical models, grain yield, climate yield, regions of Russia, agriculture, agrarian reforms, agricultural holdings

REFERENCES

- Alabushev A.V., Gureeva A.V., Raeva S.A. Status and prospects of development of seed production of grain crops in Russia). *Zernov. Khoz. Rossii*, 2010, vol. 12, no. 6, pp. 13–17. (In Russ.).
- Alcamo J., Dronin N., Endejan M., Golubev G., Kirilenko A. A new assessment of climate change impacts on food production shortfalls and water availability in Russia. *Glob. Environ. Change*, 2007, vol. 17, no. 3–4, pp. 429–444.
- Belyaeva M., Bokusheva R. Will climate change benefit or hurt Russian grain production? A statistical evidence from a panel approach. *Clim. Change*, 2018, vol. 149, pp. 205–217.
<https://doi.org/10.1007/s10584-018-2221-3>
- Bobylov S., Kiselev S., Romashkin R., Solov'eva S. *The Adaptation Challenge: Key Issues for Crop Production and Livelihoods Under Climate Change in the Russian Federation*. Oxford: Oxfam, 2012. 40 p.
- Davydova I., Franks J.R. The rise and rise of large farms: Why agroholdings dominate Russia's agricultural sector. *Mir Rossii*, 2015, vol. 24, no. 3, pp. 133–159.
- Deininger K., Byerlee D. The rise of large farms in land abundant countries: Do they have a future. *World Dev.*, 2011, vol. 40, no. 4, pp. 701–714.
- Dronin N.M. *Izmenenie klimata i prodovol'stvennaya bezopasnost' Rossii: istoricheskii analiz i model'nye prognozy* [Climate Change and Food Security in Russia: Historical Analysis and Model Forecasts]. Moscow: GEOS Publ., 2014. 306 p.
- Dronin N.M., Kirilenko A.P. Weathering the soviet countryside: The impact of climate and agricultural policies on Russian grain yields, 1958–2010. *Post-Sov. Rev.*, 2013, vol. 40, no. 1, pp. 115–143.
- EBRD-FAO. *Grain production and export potential in CIS countries. Fighting food inflation through sustainable investment*. London: European Bank for Reconstruction and Development, FAO, 2008. 8 p.
- Gagalyuk T., Schaft F. Corporate social responsibility in agribusiness. In *Agricultural policy report series. German-Ukrainian Agricultural Policy Dialogue*. Kyiv, 2016, pp. 675–698.
- Gordeev A.V., Turusov V.I. Changes in the fertility of chernozem soils as a result of anthropogenesis and methods of its reproduction in modern farming systems). In *Kamennaya step' [Kamennaya Steppe]*. Gordeev A.V., Ed. Voronezh: Istoki Publ., 2015, pp. 9–23. (In Russ.).
- Grouiez P. *Farming Strategies regarding the Production of Collective Goods in the Russian Agricultural Sector*. LEMNA working paper. University of Nantes, 2012. 21 p.
- Hansen J.E., Lebedeff S. Global trends of measured surface air temperature. *J. Geophys. Res.*, 1987, vol. 92, pp. 13345–13372.
<https://doi.org/10.1029/JD092iD11p13345>

- Kiselev S., Romashkin R., Nelson G.C., Mason-D'Croz D., Palazzo A. Russia's food security and climate change: Looking into the future. *Econ.*, 2013, pp. 1–66.
- Kuznetsova N.F. Droughts in the forest-steppe zone of the Central Black Earth Region and criteria for assessing their intensity. *Izv. Saratov. Univ. Nov. Ser. Ser. Nauki Zemle*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 142–148. (In Russ.).
- Kvartiuk V., Herzfeld T. Redistributive politics in Russia: The political economy of agricultural subsidies. *Comp. Econ. Stud.*, 2021, vol. 63, no. 1, pp. 1–30.
- Lenssen N., Schmidt G., Hansen J., Menne M., Persin A., Ruedy R., Zyss D. Improvements in the GISTEMP uncertainty model. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2019, vol. 124, no. 12, pp. 6307–6326. <https://doi.org/10.1029/2018JD029522>
- Lioubimtseva E., Dronin N., Kirilenko A. Grain production trends in the Russian Federation, Ukraine and Kazakhstan in the context of climate change and international trade. In *Climate change and food systems. Global assessments and implications for food security and trade*. Elbehri A., Ed. Rome: FAO, 2015, pp. 212–237.
- Lobell D. Crop responses to climate: Time-series models. In *Climate Change and Food Security: Adapting Agriculture to a Warmer World*. Lobell D.B., Burke M.B., Eds. Springer, 2009, pp. 85–98.
- Lobell D.B., Ortiz-Monasterio J.I. Impacts of day versus night temperatures on spring wheat yields: a comparison of empirical and CERES model predictions in three locations. *Agron. J.*, 2007, vol. 99, no. 2, pp. 469–477.
- Lobell D.B., Schlenker W., Costa-Roberts S. Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 2011, pp. 333–616.
- Matiu M., Ankerst D.P., Menzel A. Interactions between temperature and drought in global and regional crop yield variability during 1961–2014. *PLoS ONE*, 2017, vol. 12, no. 5, art. e0178339. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178339>
- Nicholls N. Increased Australian wheat yield due to recent climate trends. *Nature*, 1997, vol. 387, pp. 484–485.
- Obukhov V.M. Movement of grain crops harvests in the former European Russia in the period 1883–1915). In *Vliyanie neurozhaev na narodnoe khozyaistvo Rossii* [Influence of Crop Failures on the National Economy of Russia]. Groman V.G., Ed. Moscow: RANIION, 1927, pp. 5–53. (In Russ.).
- Pavlova V., Shkolnik I., Pikaleva A., Efimov S., Karachenkova A., Kattsov V. Future changes in spring wheat yield in the European Russia as inferred from a large ensemble of high-resolution climate projections. *Environ. Res. Lett.*, 2018, vol. 14, art. 034010.
- Pavlova V.N., Calanca P., Karachenkova A.A. Grain crops productivity in the European part of Russia under recent climate change. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, pp. 290–302. <https://doi.org/10.3103/S106837392004010X>
- Pavlova V.N., Varcheva S.E. Estimating the level of territory vulnerability and climate-related risk of significant grain crop failure in grain-producing regions of Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, pp. 510–517. <https://doi.org/10.3103/S1068373917080040>
- Ramankutty N., Foley J.A. Characterizing patterns of global land use: an analysis of global croplands data. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 1998, vol. 12, no. 4, pp. 667–685.
- Rastyannikov V.G., Deryugina I.V. *Urozhainost' khlebov v Rossii. 1795–2007* [Yield of Bread in Russia. 1795–2007]. Moscow: IV RAN, 2009. 192 p.
- Reitingi krupneishikh proizvoditelei sel'skokhozyaistvennoi produktsii Rossii (2006–2008 gg.) [Ratings of the Largest Producers of Agricultural Products in Russia (2006–2008)]. Moscow: VIAPI, Entsiklopediya rossiiskikh dereven', 2009. 28 p.
- Schamm K., Ziese M., Becker A., Finger P., Meyer-Christoffer A., Schneider U., Schröder M., Stender P. Global gridded precipitation over land: a description of the new GPCC First Guess Daily product. *Earth Syst. Sci. Data*, 2014, vol. 6, no. 1, pp. 49–60. <https://doi.org/10.5194/essd-6-49-2014>
- Schierhorn F., Muller D., Prishchepov A., Balmann A. Grain potentials on abandoned cropland in European Russia. In *The Annual World Bank Conference on Land and Poverty, 23–26 April 2012*. Washington: World Bank, 2012.
- Schierhorn F., Faramarzi M., Prishchepov A.V., Koch F.J., Müller D. Quantifying yield gaps in wheat production in Russia. *Environ. Res. Lett.*, 2014, vol. 9, art. 084017.
- Schneider U., Becker A., Finger P., Meyer-Christoffer A., Ziese M. *GPCC Full Data Monthly Product Version 2018 at 0.5°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historical Data*, 2018. https://doi.org/10.5676/DWD_GPCC/FD_M_V2018_050
- Sel'skoe khozyaistvo Rossii. *Statisticheskii sbornik* [Agriculture of Russia. Statistical Collection]. Moscow: Goskomstat Rossii, 2000. 414 p.
- Sirotenko O.D., Pavlova V.N. Methods for assessing the impact of climate change on agricultural productivity. In *Metody otsenki posledstviy izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem* [Methods for Assessing the Effects of Climate Change on Physical and Biological Systems]. Moscow: Rosgidromet, 2012, pp. 165–189. (In Russ.).
- USDA. *Foreign Agricultural Service. Russian Federation. Grain and Feed Annual*, 2017. 34 p.
- Uzun V., Shagaida N. Agricultural development: from a major importer to an exporter. In *Rossiiskaya ekonomicheskaya politika: turbulentnaya dekada 2008–2018* [Russian Economic Policy: Turbulent Decade 2008–2018]. Moscow: Delo Publ., 2020, pp. 407–432. (In Russ.).
- Uzun V., Shagaida N., Lerman Z. Russian agriculture: Growth and institutional challenges. *Land Use Policy*, 2019, vol. 83, pp. 475–487.

- Uzun V., Shagaida N., Saraikin V. *Agrokholdingi Rossii i ikh rol' v proizvodstve zerna. Issledovaniya po politike perekhoda sel'skogo khozyaistva* [Agricultural Holdings of Russia and Their Role in Grain Production. Agricultural Transition Policy Studies]. FAO Regional Office for Europe and Central Asia, 2012. 33 p.
- Vil'fand R.M., Strashnaya A.I., Bereza O.V. On the dynamics of agroclimatic indicators of sowing, wintering and formation of harvest of basic grain crops. *Tr. Gidromettsentra Rossii*, 2016, vol. 360, pp. 45–78. (In Russ.).
- Visser O., Spoor M., Mamonova N. Is Russia the emerging global “breadbasket”? Re-cultivation, agroholdings and grain production. In *The Russian Economy. Critical Concepts in Economics*. Fortescue S., Ed. New York: Routledge, 2017, pp. 1589–1610.
- Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii [Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Changes and Their Impact on the Territory of the Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet, 2014. 1009 p.
- Wegren S., Nilssen F. Introduction: Is Russia's Role in the International Agri-Food System Sustainable? In *Russia's Role in the Contemporary International Agri-Food Trade System*. Switzerland: Palgrave Macmillan, Springer Nature, 2022, pp. 1–34.
- Wegren S.K. Food security in the Russian Federation. *Eurasian Geogr. Econ.*, 2013, pp. 22–41.
- Wegren S.K. Russian grain production: too much of a good thing? *Post-Communist Econ.*, 2018, vol. 30, no. 6, pp. 1–12.
<https://doi.org/10.1080/14631377.2018.1470856>
- Wegren S.K. History, prospects, and scenarios for smallholders in Russia. In *Opportunities and Challenges of Smallholders and Smallholding*. Horváth D., Ed. Nova Press, 2021, pp. 1–60.
- Ziese M., Becker A., Finger P., Meyer-Christoffer A., Rudolf B., Schneider U. *GPCC First Guess Product at 1.0°: Near Real-Time First Guess monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges based on SYNOP Data*, 2011.
https://doi.org/10.5676/DWD_GPCC/FG_M_100

СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

УДК 911.52

ЛАНДШАФТНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СТАНОВЛЕНИЯ
СРЕДНЕВЕКОВОЙ ПОСЕЛЕНЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВЕРХНЕВОЛЖЬЯ

© 2024 г. В. А. Низовцев¹ *, Н. М. Эрман²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²ИИЕТ РАН им. С.И. Вавилова, Москва, Россия

*e-mail: nizov2118@mail.ru

Поступила в редакцию 02.10.2023 г.

После доработки 04.03.2024 г.

Принята к публикации 16.05.2024 г.

Формирование поселенческой структуры является пространственным отражением жизнедеятельности (видов и способов ведения хозяйства) поселенцев и, соответственно, полностью обусловлено местными ландшафтно-климатическими условиями. Поэтому главной целью исследования является выявление особенностей формирования средневековой поселенческой структуры Верхневолжья в зависимости от ландшафтно-климатических условий и периодизация этого процесса. Важнейшими практическими задачами являлись: установление ландшафтно-ресурсной базы и реконструкция динамики природопользования на ключевых участках, а также флуктуации климатических условий хозяйственной деятельности человека. На основе сопряженного анализа исторических документов и опубликованных материалов установлены особенности климатических условий и характер проявления неблагоприятных природных явлений в основные исторические периоды. Ландшафтно-исторические исследования проводились на региональном (для всего Верхневолжья) и на локальном (для ключевых участков) уровнях. Оценка ресурсной базы выполнена на основе палеорекострукции ландшафтной структуры с последующим эколого-эдафическим анализом. Локационно-ландшафтный анализ археологических и исторических материалов на ключевых участках стал основой для ретроспективной реконструкции природопользования и поселенческой структуры Верхневолжья. Рассмотрены основные периоды средневекового расселения в Верхневолжье. Основное внимание уделялось влиянию местных ландшафтных условий и флуктуаций климата на природопользование и формированию поселений. В период средневекового оптимума на рубеже первого и второго тысячелетий, с максимумом в конце X в., начинается функционирование Великого Волжского пути и интенсивное славянское заселение его Верхневолжского отрезка. На раннем этапе осваивались преимущественно долинные ландшафтные комплексы с наиболее благоприятными для поселенцев свойствами для ведения натурального хозяйства. В эпоху малого ледникового периода источники все чаще фиксируют резкие колебания климата с проявлениями экстремальных негативных процессов, что приводит к переносу селений на более высокие, и более теплые ландшафтные комплексы междуречий.

Ключевые слова: Великий Волжский путь, древнерусские города, ландшафт, климатические условия, экстремальные природные явления, ресурсная база, историческое природопользование

DOI: 10.31857/S2587556624030117 EDN: SNSJPA

ВВЕДЕНИЕ

В Верхневолжье — верховьях р. Волги до впадения в нее р. Оки — сходились основные пути расселения и освоения Центра и Севера Восточно-Европейской равнины. Разветвленная речная сеть с ответвлениями от Волги к Западной Двине и Днепру стала важнейшим в истории районом формирования Древней Руси. Сложившаяся система местных коммуникаций Верхней

Волги с притоками не только связывала эту территорию с другими регионами формирующегося древнерусского государства, но и становится коммуникационным каркасом для формирования поселенческой структуры всего Верхневолжья. К тому же формированию густой сети поселений благоприятствовало большое разнообразие и богатство ресурсной базы, обусловленное контрастностью зонально-ландшафтных условий. Разнообразие природных ресурсов

привлекало переселенцев возможностью вести гибкое комплексное хозяйство и таким образом приспособляться к изменениям климата.

В VIII в. начал складываться Великий Волжский путь — один из главных транзитных путей Восточной Европы, соединявший формирующиеся страны Северной Европы с Прикаспием, Средиземноморьем и Ближнем Востоком. Поэтому в историографии он и получил название “Из варяг в арабы” и “Из варяг в персы”. Еще одно его название — “Волжско-Каспийский путь”, так как он шел от Каспия по Волге к ее верховьям. Верхневолжский отрезок стал основным коммуникационным узлом всего Великого Волжского пути, так как от верховий Волги волоками он поворачивал на север к рр. Поле или Мсте, впадавшим в Ильмень. А уже от Ильменя по Волхову шел к Ладоге, а из него по Неве в Балтийское море (Дубов, 1989; Кирпичников, 2002).

Главной целью исследования является выявление особенностей формирования средневековой поселенческой структуры Верхневолжья в зависимости от ландшафтно-климатических условий и периодизация этого процесса. Важнейшими практическими задачами являлись: установление ландшафтно-ресурсной базы и реконструкции динамики природопользования на ключевых участках, а также флуктуации климатических условий хозяйственной деятельности человека. Важнейшее место в исследовании климатических условий жизнедеятельности поселенцев занимает анализ необычайных и опасных метеорологических, в частности, и природных явлений в целом. Временные рамки исследования с VIII по XVI в., т.е. начиная от стадии активного заселения этой территории славянскими поселенцами и заканчивая поздним средневековьем — периодом становления поселенческой системы, близкой к современной. В климатическом плане, как считают А.М. Слепцов и В.В. Клименко (2005), — в это время установились условия средневековой теплой эпохи, предшествовавшие малому ледниковому периоду, это наиболее значительные климатические события последнего тысячелетия на территории всей Восточной Европы.

При анализе и обобщении многочисленных опубликованных материалов по истории средневекового расселения и хозяйственного освоения Центральной России в целом и Верхневолжском бассейне в частности, выясняется, что ландшафтные аспекты исследования истории формирования систем поселений в связи с изменениями климатических условий находятся в пионерной стадии разработки. К сожалению работ, дающих целостное представление об особенностях расселения и хозяйственного освоения исследуемой территории в средневековый период, что в пространственном плане отражается формированием

поселенческих структур, не так много. Историко-археологический аспект этого процесса наиболее полно рассмотрен Е.И. Горюновой (1961), Х.Д. Сориной и Ю.Н. Урбаном (1976), В.А. Кучкиным (1984), И.В. Дубовым (1989), И.Н. Кирпичниковым (2002), Н.А. Макаровым с соавторами (2005) и др. Особое внимание уделялось анализу публикаций, посвященных ландшафтно-климатическим условиям жизнедеятельности поселенцев средневекового периода. Опорой для климатических характеристик послужили работы М.А. Боголепова (1907), И.Е. Бучинского (1957), Э. Ле Руа Ладюри (1971), А.С. Мониной, Ю.А. Шишкова (1979), Золотокрылина с соавторами (1986), В.В. Клименко и др. (2001). Наиболее полные описания изменений климатических условий представлены в работе Е.П. Борисенкова и В.М. Пасецкого (1988). Проблема зависимости урожаев от погодных условий в Европе обстоятельно рассмотрена С.И. Барашем (1989). О решающем влиянии природно-климатического фактора на сельскохозяйственное производство говорится в работах В.Т. Пашуто (1964) и особенно Л.В. Милова (1992, 2001). Взаимоотношения человека и ландшафтов в отдельных районах Верхневолжья рассматриваются Л.В. Муравьевой (1985), Е.Р. Хохловой (1995) и А.А. Дорофеевым и Е.Р. Хохловой (2016). Достаточно целостная картина хозяйственного освоения территории Ярославского Поволжья с учетом местных ландшафтно-климатических условий представлена в работе Е.Ю. Колбовского (1993).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основной метод исследования в данной работе — сопряженный анализ исторических, археологических и географических (ландшафтных, природно-компонентных, палеогеографических и др.) материалов.

Особое внимание при этом уделено анализу ландшафтно-эдафических и климатических условий формирования поселенческой структуры данного региона. Основой для получения сведений об изменениях климата, неблагоприятных и опасных природных явлениях (особенно экстремальных) на исследуемый период послужил комплексный анализ летописных и литературных источников, а также результатов дендрологических, спорово-пыльцевых, радиоуглеродных и др. исследований, проводившихся как на этой территории, так и в аналогичных ландшафтно-зональных условиях. В первую очередь было обращено внимание на сведения о проявлении экстремальных природных явлений и их частоте, так как именно интенсивность и повторяемость экстремальных природных явлений влияют на функционирование и динамику ландшафтов

и, соответственно, определяют особенности ведения хозяйства и даже всего исторического развития. Не случайно экстремальные природные явления постоянно привлекают повышенное внимание многих исследователей (Боголепов, 1907; Борисенко, Пасецкий, 1983, 1988; Кренке, Чернавская, 1998; Ле Руа Ладюри, 1971; Ляхов, 1984; Раунер, 1981). Нами, совместно со студентами, на протяжении многих лет делались выборки основных климатических характеристик и экстремальных природных явлений, а по итогам проведенной работы составлены сводные таблицы-графики их регистрации за каждый год, начиная с 900 г. н. э. (рис. 1). В этих таблицах-графиках указаны как прямые климатические характеристики: жарко, тепло, холодно, влажно, засуха и т.п. с характеристикой сезонов, так и экстремальные (аномальные) природные явления. Фиксировалась также и опосредованная информация об изменчивости климата (наводнения, неурожай, голодные годы, массовые эпидемии т.д.). Такая сводная таблица-график позволяет наглядно оценить климатические условия, включая экстремальные явления, жизнедеятельности поселенцев средневековья в регионе Верхневолжья (Низовцев, Эрман, 2015).

Тематическое картографирование в данной работе реализовалось в составлении крупномасштабных карт ландшафтной приуроченности поселений на ключевых участках, а также среднемасштабных карт ландшафтно-провинциально-зональной приуроченности городов. Выявление и оценка ландшафтных условий формирования поселенческой структуры выполнялись на региональном (для всего Верхневолжья) и локальном (для ключевых участков) уровнях на основе анализа опубликованных ландшафтных исследований на отдельные участки Верхневолжья, мелкомасштабных ландшафтных карт СССР, среднемасштабных ландшафтных карт в атласах областей Верхневолжья и обобщения крупномасштабных полевых исследований с составлением ландшафтных карт на ключевые участки ряда исторических городов (Ржев, Старица, Тверь, Углич, Мышкин, Рыбинск, Ярославль и др.) и их окрестностей. Палеорекострукция структуры коренных ландшафтов на ключевых участках выполнялась на основе ландшафтно-эдафического подхода (Низовцев, 1999) с привлечением опубликованных данных, полученных по результатам палинологических и палеопедологических исследований. Выявление в целом исходной (коренной) ландшафтной структуры территории и оценка эколого-эдафических свойств и природно-ресурсного потенциала основных видов урочищ позволили установить детерминированный характер природопользования и становления поселенческой структуры в зависимости от местных ландшафтных условий и ресурсной базы. Так, для

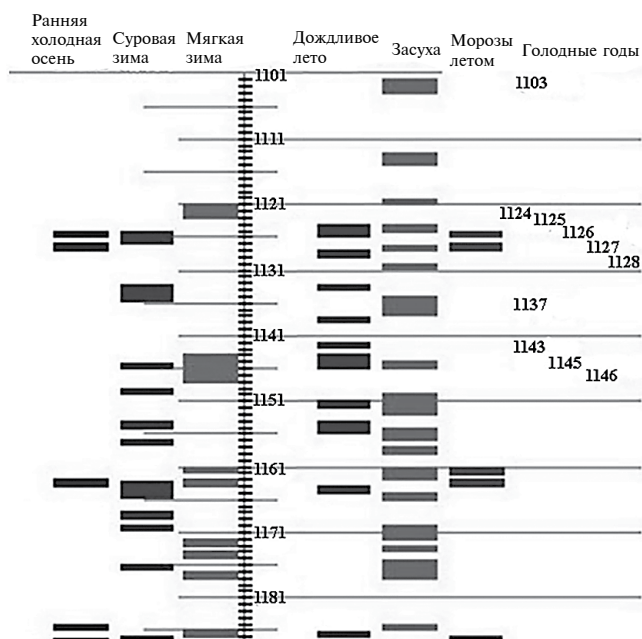


Рис. 1. Экстремальные климатические явления в Центральной России (фрагмент).

Ярославского отрезка Верхневолжья составлены карты ландшафтных условий формирования поселенческой структуры в масштабе 1 : 200000, начиная с неолита и по средневековье. На основе историко-генетического и диахронического метода разработана периодизация процесса хозяйственного освоения Верхневолжского отрезка Великого Волжского водного пути в начальные периоды социоестественной истории, что позволяет судить как об особенностях становления поселенческой структуры, так и о развитии и функционировании древнерусских городов Верхневолжья (Дорофеев, Хохлова, 2016; Эрман, Низовцев, 2019).

Для анализа ландшафтно-провинциально-зональной приуроченности поселений использовалась выборка поселений из опубликованных источников, включая анализ выпусков "Археологическая карта России" по Ивановской, Костромской, Нижегородской, Тверской и Ярославской областям, а также по древнерусским летописным городам и городищам из работы А.В. Кузы (1989) и других опубликованных материалов по основным исследуемым историческим периодам. Выбранные поселения и города наносились на ландшафтные карты, составленные под редакцией А.Г. Исаченко (1988) и Н.А. Гвоздецкого (1983). Например, только для древнерусского периода по этим материалам составлены следующие картосхемы: "Древнерусские большие и летописные города на Верхневолжском отрезке Великого Волжского исторического пути", "Древнерусские городища Верхневолжья XII–XIII вв. на карте ландшафтных зон", "Древнерусские летописные города Верхневолжья XII–XIII вв. на карте ланд-

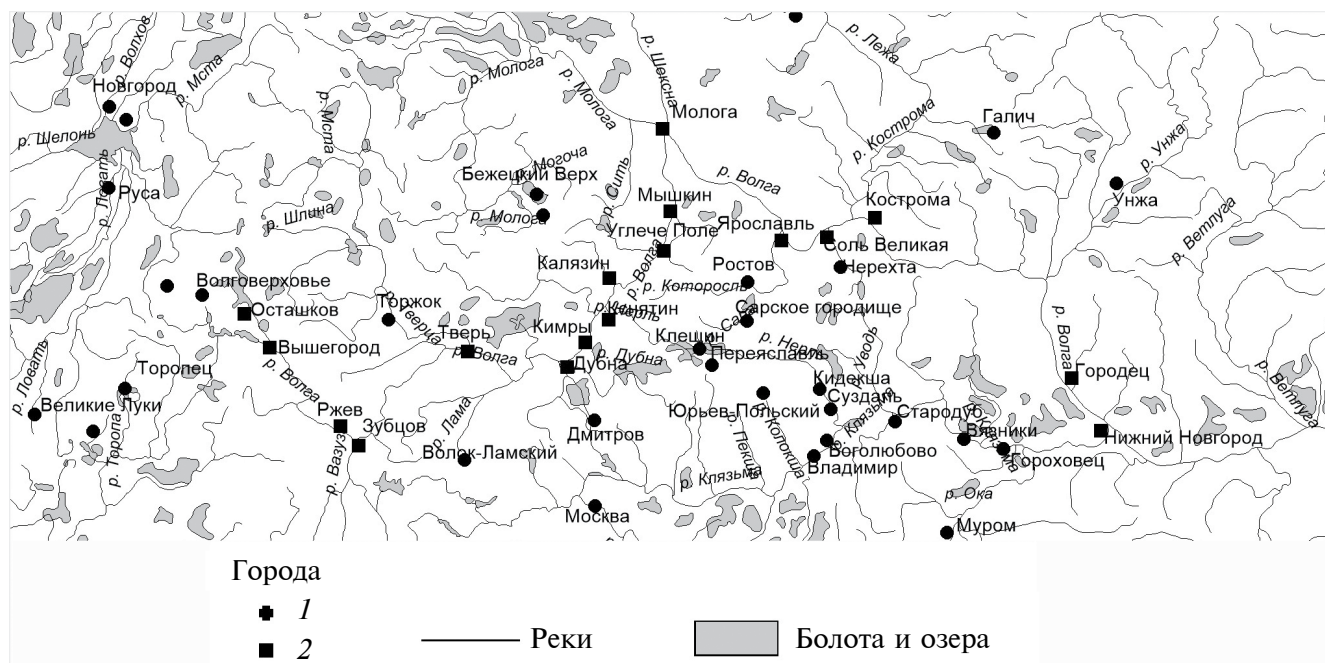


Рис. 2. Древнерусские большие и летописные города XII–XIII вв. [по (Куза, 1989)] на Верхневолжском отрезке Великого Волжского исторического пути: 1 – древнерусские большие и летописные города; 2 – Верхневолжские древнерусские большие и летописные города.

шафтных зон”, “Ландшафтная приуроченность древнерусских городов Верхневолжья (ландшафтно-типологический и провинциальный аспект)”, “Древнерусские летописные города Верхневолжья XII–XIII вв. на карте типов ландшафтов”, “Древнерусские городища XII–XIII вв. на карте типов ландшафтов” и др. (рис. 2 и 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Верхневолжский регион характеризуется полным спектром южно-таежных и смешанных лесных ландшафтов и чрезвычайным разнообразием ландшафтных комплексов локального уровня с обширной палитрой эколого-эдафических характеристик, нередко контрастных по

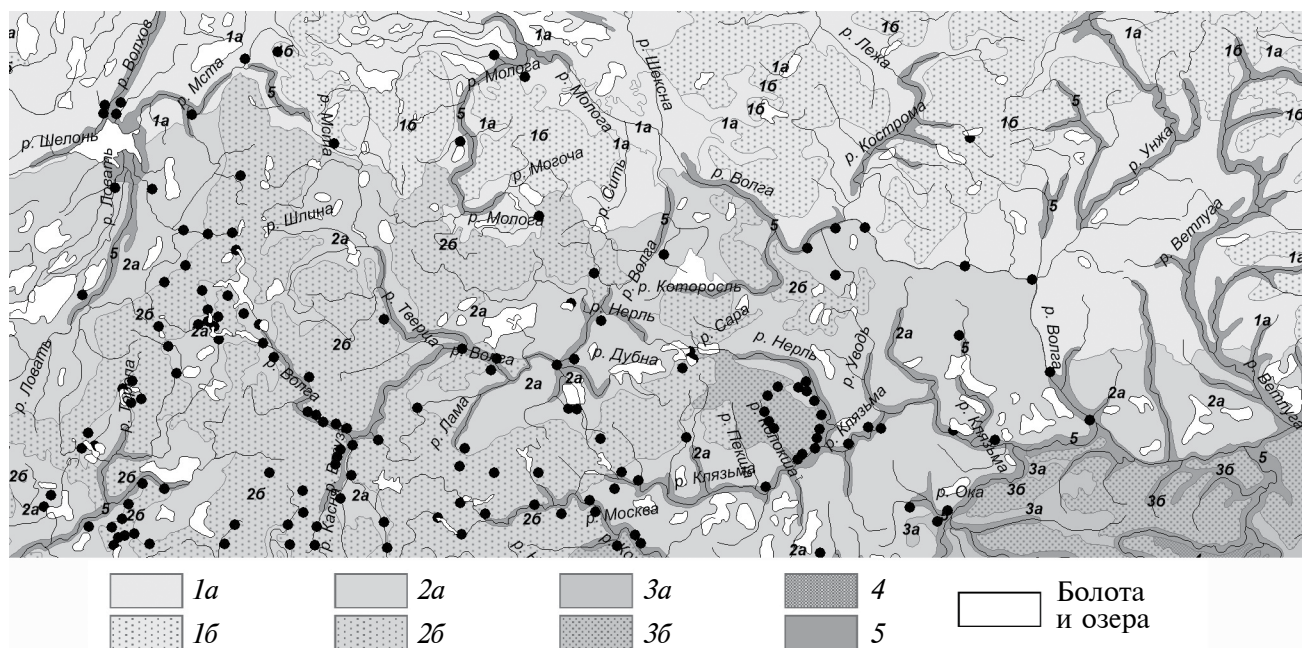


Рис. 3. Древнерусские города и укрепленные поселения XII–XIII вв. [по (Куза, 1989)] на карте типов ландшафтов (Ландшафтная карта СССР: для ВУЗов / гл. ред. А.Г. Исаченко. Масштаб 1 : 4000000. М.: ГУГК, 1988. Фрагмент): 1a, 16 – южная тайга; 2a, 26 – смешанные леса; 3a, 36 – широколиственные леса (семигумидные); 4 – лесостепь; 5 – долинные комплексы; а – низменные равнины; б – возвышенные равнины.

своим свойствам, и, соответственно, с богатейшей ресурсной базой, позволявшей местному населению приспосабливаться к меняющимся климатическим условиям.

Основу ландшафтной структуры Верхневолжья составляют ландшафты ложбин стока талых ледниковых вод с врезанными в них долинами рек (древне-аллювиально-водно-ледниковые) и равнины разного генезиса: водно-ледниковые, озерно-водно-ледниковые, моренные и конечно-моренные. Древне-аллювиально-водно-ледниковые равнины представлены долинными зандрами (высоким и низким — остатками древних ложбин стока талых ледниковых вод двух этапов деградации московского ледника) и долинными комплексами (коренные склоны, надпойменные террасы и поймы) Волги и ее притоков. Очень важно, что разнообразие эдафотопов (типов местообитания, соответствующих основным типам ландшафтных комплексов), характеризующихся относительно высокой трофностью субстрата и хорошей их дренированностью (преобладание почв с легким механическим составом, наклонных поверхностей с близким базисом эрозии, а также расчлененность береговыми эрозионными формами), создало в целом относительно благоприятные условия для ранних этапов сельскохозяйственного освоения. Конечно-моренные равнины, осложненные многочисленными холмами, древнеозерными котловинами и межхолмовыми западинами, с глубоко врезанными ложбинами стока отличаются выраженной пестротой и сложностью ландшафтных комплексов локального уровня. Значительная заозеренность и заболоченность этих ландшафтов длительное время осложняли их освоение. Водно-ледниковые (зандровые) равнины занимают обширные пространства на низких этажах рельефа. Как правило, доминантные урочища характеризуются бедными песчаными и супесчаными подзолистыми и дерново-подзолистыми почвами. Их невыразительно пологоволнистую поверхность слегка оживляют мелкие холмы и заболоченные западины, создавая мелкобугристо-западинный облик. Фоновые урочища озерно-водно-ледниковых равнин представлены плоскими полузамкнутыми понижениями, сформировавшимися на месте древних озерно-ледниковых котловин, которые заняты сейчас, как и в прошлом, многочисленными болотами (Низовцев, Эрман, 2015).

Славянское расселение в бассейне Верхней Волги, заселенным к тому времени угро-финскими, преимущественно мерянскими. Племенами, совпадает с пиком средневекового оптимума, который пришелся на рубеж первого и второго тысячелетий, а его максимум в исследуемом регионе достигался в конце X в. (Слепцов, Клименко, 2005; Сычева, 2011; Хотинский,

1977; и др.). В целом климат был не только теплее, но и суше современного, а максимум летних температур приходится на X и XI вв. (Турманина, 1987). И, что очень важно, помимо повышенных температур в этот период отсутствовали суровые зимы, которые, как считают А.М. Кренке и М.М. Чернавская (1998), являются важной характеристикой изменения жизнеобеспечивающих условий. Такие климатические условия и, в первую очередь, повышенная сухость климата с сокращением летних осадков привели к уменьшению заболоченности междуречий и осушению и большей “доступности” волоков — связующих звеньев между бассейнами рек. Повышенная сухость климата привела и к заметному снижению поёмности и паводков рек, что сделало возможным освоение и даже заселение высоких пойм. Существует целый ряд археологических свидетельств о заселении пойм рек Волжского бассейна, выходящих из условий затопления (Гоняный, Кренке, 1988; и др.). В.В. Клименко с соавторами (2001) считают, что суммы эффективных температур воздуха выше 10°C по сравнению с современными длительное время были выше на 200°C, а порой и на все 500°C. Таким образом, в период малого климатического оптимума сложились максимально благоприятные условия для земледелия и заселения этого отрезка Великого Волжского пути. Славяне, как и местные угрофинские народы, занимались земледелием, скотоводством, охотой, рыболовством и деревообработкой. Основой хозяйства у поселенцев было пашенное земледелие с возделыванием как злаковых, так и зернобобовых и волокнистых культур. У поселенцев начали развиваться первые ремесла: гончарное, кузнечное, ювелирное. На местных болотных рудах получила развитие металлургия (Кириянова, 1992; Седов, 1982). Вблизи поселений, преимущественно по надпойменным террасам и низким долинным зандрам, стала формироваться система постоянных пахотных участков. Под подсечное земледелие отводились более удаленные участки речных долин и междуречий. Широкое распространение липняков по бортам долин способствовало развитию бортничества (Низовцев, 2012).

Как считает И.В. Дубов (1989), именно на это время и приходится расцвет начального этапа функционирования Верхневолжского пути с формированием единой системы водно-волоковых путей, связывающих Великий Волжский торговый путь с истоками Днепра, Западной Двины и северных рек. Локационно-ландшафтный анализ расположения водно-волоковых путей показал, что большая их часть приурочена к межбассейновым переливам — сквозным ложбинам стока ледниковых вод, пересекающим современные главные водоразделы практически

всех речных систем центра Русской равнины. Это стало возможным благодаря повышенной сухости климата. Следует отметить, что в настоящее время подавляющая часть этих ложбин стока характеризуется как сырые или даже заболоченные местообитания. Практически все эти переливы, в свою очередь, соединяют более крупные ложбины стока, в которых в поздней и послеледниковое время заложились верховья рек (Эрман и др., 2018). Возможность существования волоков на водоразделах и достижимость их преодоления в аналогичных ландшафтных условиях обосновываются в комплексной исследовательской работе В.Л. Мартынова с соавторами (2022).

По сути, развитие поселенческой структуры проходило в наиболее благоприятных условиях на протяжении всего средневековья. Анализ летописных источников позволяет говорить о минимальной повторяемости катастрофических природных явлений. Подсчеты Е.П. Борисенкова и В.М. Пасецкого (1988) показывают, что за X в. в русских летописях отмечено 41 экстремальное явление, а за XIII в. уже в два с половиной раза больше — 102.

Основной массив поселений с небольшими постоянными пахотными участками приурочен к низким надпойменным террасам и, отчасти, к высокой пойме Волги и ее притоков. Палеорекострукции исходных ландшафтных условий и ретроспективные реконструкции природопользования на ключевых участках в период славянского заселения показывают, что большая часть, как постоянных пахотных участков, так и пахотных переложных земель, а также подсечного земледелия формируется в пределах надпойменных террас в долинах рек и на хорошо дренированных участках преимущественно приречных зандровых, а порой и моренных междуречных равнинах. Этот регион становится одним из узловых районов славянского расселения и формирования древнерусского государства (Кучкин, 1984). Однако с этого времени в результате повсеместного распространения пашенного земледелия начинается значительная антропогенная трансформация свойств ландшафтов и исходной ландшафтной структуры. По долинам рек начинают господствовать вторичные мелколиственные леса (Низовцев, 2012).

В этот период на основных коммуникационных путях и на их важнейших отрезках начинается складываться сеть опорных пунктов — древних городов (Дубов, 1989; Кирпичников, 2002). Вся жизнедеятельность первых городов была связана с обустройством и функционированием Волжского пути и во многом зависела от ведения собственного натурального хозяйства. Эколого-эдафический анализ ландшафтного размещения первых Верхневолжских городов

показал, что в начальный период их становления места для строительства выбирались, как правило, с учетом их безопасности и ресурсной базы местной округи. Первые города, такие как Дубна, Углич, Мышкин, Ярославль, Рыбинск и др., занимали, как правило, преимущественно слабо наклонные поверхности первой, реже второй, надпойменных террас (ближе к руслу реки) с благоприятными для проживания и ведения приусадебного хозяйства микроклиматическими условиями. Крайне редко, преимущественно из-за недостатка места, поднимались на вышележащие участки низких долинных зандров (третья надпойменная терраса) или на придолинные склоны междуречий. Для таких участков характерна относительно простая исходная структура ландшафтов.

Период XIII—XIV вв. получил в историографии название “периода контрастов” как переходный к малому ледниковому периоду. Он отличался сильной изменчивостью климата по сезонам и значительными колебаниями увлажненности и теплообеспеченности от года к году. Е.П. Борисенков и В.М. Пасецкий (1988) указывают на повсеместное понижение летних температур на 1–2°C и снижение сумм активных температур в лесной зоне на 800–1000°C. В XIII в. выдался один из самых долговременных периодов с экстремальными природными явлениями. Так, в 1211–1233 гг. случилось 15 голодных лет из-за неурожая, связанных с экстремальными климатическими явлениями. С этим было связано и резкое сокращение численности населения. Эти авторы также отмечают, что в последнюю треть XIII в. стали более часто проявляться суровые зимы, засушливые или, наоборот, дождливые летние периоды.

В XII—XIII вв. и позднее города уже закладываются или перемещаются на более высокие местоположения в долинных ландшафтных комплексах. Наряду с обеспечением функционирования Великого Волжского пути на первый план выходит оборонительно-стратегическое значение городов. Крепости закладывают на высоких крутых берегах, а их подножья — вторая и первая надпойменные террасы — занимают посадки. С ростом населения в большей степени осваиваются и соседние участки низких долинных зандров. Такая планировочная структура характерна для большинства Верхневолжских городов: Ржев, Zubцов, Старица, Тверь, Кашин, Калязин, Романов, Плес, Кострома, Юрьевец, Городец, Нижний Новгород (см. рис. 2 и 3). Анализ этих городов на ландшафтно-зональных картах показывает, что практически все города занимают экотонное положение по границам (или рядом с ними) двух или трех и более ландшафтов. Эти участки отличаются необычайно большим набором (от 30 до 40 и более видов)

ландшафтных комплексов локального уровня. Отсюда большое разнообразие природных свойств и богатство ресурсной базы выбранных для градостроительства и обустройства приусадебных участков.

Специфика древнерусского градостроительства заключалась в усадебной застройке посадов, занимавших основные площади городов. Поэтому в первую очередь под застройку выбирались земли, имевшие оптимальные для землепашцев того времени свойства: выровненные, хорошо дренированные поверхности, суглинисто-супесчаные почвы относительно высокой плодородности с благоприятным для земледелия водно-воздушным режимом, теплые местообитания с ранними сроками готовности полей к весенним полевым работам. Неудобья оставались незастроенными и использовались преимущественно под выпас домашнего скота. Слабая дренируемость земель на протяжении практически всего средневековья была главным фактором, ограничивающим их освоение. Таким образом, как и в предыдущий, так и в этот период, выбор места для заложения города зависел от особенностей местных ландшафтных условий (Эрман, Низовцев, 2019).

С XIV в. резко меняются климатические условия жизнедеятельности населения — начинается малый ледниковый период (Клименко и др., 2001; Ле Руа Ладюри, 1971; Монин, Шишков, 1979; и др.). Для XIV в. было характерно довольно резкое похолодание. Понижается средняя годовая температура — на 1.4°C , а летняя температура — на $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$, соответственно, сокращается продолжительность вегетационного периода. Исследуя историю неурожая и погоды в Европе, С.И. Бараш (1989) подчеркивает, что длительность вегетационного периода возделывания зерновых культур сокращается почти на три недели. Усиливаются контрасты увлажнения: периоды с повышенным увлажнением чередуются с засушливыми. Е.П. Борисенков и В.М. Пасецкий (1988) отмечают резкое увеличение неблагоприятных климатических процессов: в XIV в. зафиксировано 30 случаев суровых зим, что на 5 больше, чем в предыдущем, а в XV в. проявилось уже более 150 экстремальных неблагоприятных природных явлений. Отмечена зима 1445 г., когда толщина снега в бассейне Верхней Волги достигала 2 м, тогда в зимнее время стояли «лютые морозы». Отличительными климатическими характеристиками этого периода стали чрезвычайно длительные суровые зимы и затяжные летние дожди. Возвраты холодов в начале лета и раннее наступление морозов в конце лета — начале осени также стали обычными для данного периода. Отсюда постоянная гибель урожая, при-

водившая к массовому голоду населения. Подсчеты этих авторов показывают, что сочетание обильных дождей с великими засухами и суровыми зимами обусловило в XV в. 40 голодных лет. С.И. Бараш (1989) сообщает, что потери урожаев от необычайно холодных зимних периодов фиксируются в летописях в 1408, 1417, 1420, 1443, 1467, 1468, 1481 и 1496 гг.

Период XIV–XVI вв. является переломным в хозяйственном освоении ландшафтов региона: природопользование приобретает ярко выраженный экстенсивный характер с возникновением многочисленных экологических проблем (Милов, 1992, 2001). Это объясняется как интенсивным ростом населения, так и значительным ухудшением и непостоянством климатических условий. Резко возрастает количество поселений, а распространение в земледелии трехпольного севооборота приводит к массовому освоению междуречных ландшафтов. Происходит процесс освоения водораздельных пространств во время внутренней колонизации земель, так называемый взлет на холмы по С.З. Чернову (2003). Селения с нижних этажей рельефа переносятся на более высокие высотные уровни междуречий: с долинных ландшафтных комплексов с застаиванием холодного воздуха на более высокие и, соответственно, более теплые местообитания. Таким образом, при повышении экстремальности климата местные ландшафтные условия становятся решающим фактором как лимитирующим, так и дифференцирующим в формировании природопользования и поселенческой структуры. Начало сельскохозяйственного освоения междуречных ландшафтов с более разнообразными экологическими условиями и богатой ресурсной базой позволило выйти поселенцам из речных долин на междуречья. Однако экстенсификация сельского хозяйства приводит и к беспорядочным рубкам лесов, к упадку бортничества и бобрового промысла и широкому распространению экологических проблем. Уже в это время, как неоднократно отмечается в летописях, коренные широколиственные и хвойные леса становятся редкостью, а мелколиственные леса распространяются на междуречья.

В конце XVI — начале XVII в. на ухудшение климатических условий (повышение влажности климата, падение среднегодовых температур воздуха) наложились политический и экономический кризисы в Русском государстве (опричнина, Ливонские войны Ивана IV, смута), что вызвало массовое запустение земель. Многие сотни деревень превратились в пустоши, десятки сел — в селища (Милов, 2001). Е.Ю. Колбовский (1993), сравнивая данные межевых книг Ярославской земли для середины и 90-х годов XVI в., отмечает прогрессивное заболачивание

междуречных пространств и увеличение доли закустаренных и залесенных земель.

В этот период закладывается основа современной поселенческой структуры и системы землепользования большинства районов Верхневолжья. Повсеместно устанавливается система постоянных полей, которые приурочены к надпойменным террасам и долинным зандрям. Многие из полевых ландшафтов просуществовали и до настоящего времени (Низовцев, 2012). В сельской местности под кормовые угодья осваиваются многие междуречные ландшафтные комплексы — лощинно-балочные верховья малых эрозионных форм и приводосборные понижения. Происходит их залужение, приводившее к возникновению искусственных комплексов суходольных лугов. С увеличением поголовья домашнего скота появилась необходимость для устройства вокруг сел на междуречьях по лесным окраинам прудов-копаней и запрудных прудов. Массовое строительство монастырей с обустройством их хозяйства приводит к возникновению специфических монастырских культурно-ландшафтных комплексов.

Разрастаются старые и интенсивно строятся новые города, занимающие все более возвышенные участки рельефа — долинные зандры и приречные междуречные равнины. Особенности пластики рельефа оказывали существенное влияние на расположение элементов формирующегося городского ландшафта. Собственно местный рельеф и определял направление последующего развития города. Как и прежде, пространственное и планировочное развитие городов в основном шло также по усадебному типу: дом, хозяйственные постройки и прилегающий участок с огородами, садом и т.д. Соответственно это предъявляло повышенные требования к качеству земель для приусадебных участков. Усадьбы (дворы) нередко располагались вдоль малых эрозионных форм (лощинообразных понижений и ложбинок, лощин, балок, мелких ложбин стока ледниковых вод и т.п.) и по гребням местных водоразделов, оставляя незастроенными тальвеги и переувлажненные участки: западины разного генезиса, приводосборные и западинообразные понижения (Эрман, Низовцев, 2019). Практически все города того времени, как указывал Р.Л. Розенфелд (1976) или обрастали сельскохозяйственной округой, или образовывались в густо заселенных землях как центры сельскохозяйственных районов. Такая средневековая поселенческая структура в последующем стала основой для формирования современной системы расселения и просуществовала вплоть до второй половины XX в.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенностью исследования является использование ландшафтно-временного анализа, при котором пространство и время рассматриваются неразрывно. Результаты исследования показали, что территориальная организация хозяйственной деятельности, собственно размещение и характер поселений, во многом обусловлены исходной ландшафтной дифференциацией и климатическими условиями на определенный промежуток времени. Большое влияние на формирование поселенческой структуры, в первую очередь пространственного размещения городов, Верхневолжья оказало становление и функционирование Великого Волжского пути. Ландшафтная детерминированность поселенческих структур и систем природопользования прослеживается во все начальные периоды функционирования этого важнейшего коммуникационного пути в средневековой истории становления Русского государства. Выявлен основной фактор, лимитирующий освоительские процессы того времени, а соответственно, и пространственное развитие городов и их окрестностей — слабая дренированность земель. При выборе места для поселений наряду с учетом оборонительно-стратегического фактора предпочтение отдавалось теплым землям с ранними сроками готовности полей к весенним полевым работам с оптимальными для земледельцев того времени свойствами: выровненные, хорошо дренированные поверхности, с относительно высокой трофностью и с благоприятным для земледелия водно-воздушным режимом почв. То есть у местных поселенцев появлялась возможность вести гибкое комплексное многоотраслевое натуральное хозяйство. В неблагоприятные климатические периоды такая форма хозяйствования гарантировала получения урожаев, пусть и не очень больших.

В условиях крайне напряженного короткого вегетационного режима, особенно в периоды с неустойчивыми климатическими условиями и частыми экстремальными погодными явлениями, это имело решающее значение. Поэтому в морфологической структуре ландшафтов во все времена самыми первыми и наиболее освоенными были долинными урочищами (поймы, надпойменные террасы, покатые склоны долин) и наклонные поверхности низких и высоких долинных зандров теплых экспозиций, с максимально благоприятными условиями для ведения натурального хозяйства. Во все исторические периоды наблюдается четкая детерминированность поселенческой структуры и систем природопользования от конкретных ландшафтных условий, определяемых, в свою очередь, экологическим потенциалом и морфологической структурой ландшафта.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках темы Государственного задания географического факультета МГУ № 121051300176-1.

FUNDING

The work was carried out within the framework of the State Assignment of the Faculty of Geography of Moscow State University no. 121051300176-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас СССР. Карты природы. Физико-географическое районирование. М-6: 1 : 24000 000. М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1983. 120 с.
- Атлас Ярославской области. География. История. М.: ДИК, 1999. 48 с.
- Бараш С.И. История неурожаев и погоды в Европе. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 236 с.
- Боголюбов М.Л. О колебаниях климата Европейской России за историческую эпоху // Землеведение. 1907. Т. XIV. Кн. III–IV. С. 58–162.
- Борисенков Е.П., Пасецкий В.М. Экстремальные природные явления в русских летописях XI–XVII вв. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 240 с.
- Борисенков Е.П., Пасецкий В.М. Тысячелетняя летопись необычайных явлений природы. М.: Мысль, 1988. 522 с.
- Бучинский И.Е. О климате прошлого Русской равнины. Л.: Гидрометеиздат, 1957. 142 с.
- Гоняный М.И., Кренке Н.А. Структура расселения дьяковцев в бассейне р. Пахры // Советская археология. 1988. № 3. С. 54–62.
- Горюнова Е.И. Этническая история Волго-Окского междуречья. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 264 с.
- Дорофеев А.А., Хохлова Е.Р. Ландшафты Тверской области. Тверь: Твер. гос. ун-т, 2016. 120 с.
- Дубов И.В. Великий Волжский путь. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1989. 257 с.
- Золотокрылин А.Н., Кренке А.Н., Ляхов М.Е., Попова В.В., Чернавская М.М. Колебания климата Европейской части СССР в историческом прошлом // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1986. № 1. С. 26–36.
- Кирпичников А.Н. Великий Волжский путь // Родина. 2002. № 11–12. С. 59–64.
- Кирьянова Н.А. Сельскохозяйственные культуры и системы земледелия в лесной зоне Руси XI–XV вв. М.: Институт археологии РАН, 1992. 162 с.
- Клименко В.В., Климанов В.А., Сирин А.А., Слепцов А.М. Изменения климата на западе Европейской части России в позднем голоцене // ДАН. 2001. Т. 376. № 5. С. 679–683.
- Колбовский Е.Ю. История и экология ландшафтов Ярославского Поволжья. Ярославль, 1993. 114 с.
- Кренке А.Н., Чернавская М.М. Пространственные и временные изменения повторяемости экстремальных климатических явлений на Русской равнине // Изв. РАН. Сер. геогр. 1998. № 5. С. 129–141.
- Куза А.В. Малые города древней Руси. М.: Наука, 1989. 168 с.
- Кучкин В.А. Формирование государственной территории Северо-Восточной Руси в X–XIV вв. М.: Наука, 1984. 353 с.
- Ландшафтная карта СССР: для ВУЗов. М-6 1 : 4000 000. М.: Главное управление геодезии и картографии, 1988.
- Ле Руа Ладюри. История климата с 1000 года. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 280 с.
- Ляхов М.Е. Климатические экстремумы в центральной части Европейской территории СССР в XIII–XX вв. // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1984. № 6. С. 68–74.
- Макаров Н.А., Шполянский С.В., Леонтьев А.Е. Сельское расселение в центральной части Суздальской земли в конце I – первой половине II тыс. н.э.: новые материалы / Русь в IX–XIV веках: Взаимодействие Севера и Юга. М.: Наука, 2005. С. 196–215.
- Мартынов В.Л., Субетто Д.А., Брылкин В.В., Греков И.М., Кублицкий Ю.А., Орлов А.В., Сазонова И.Е., Соколова Н.В. К вопросу о существовании “пути из варяг в греки” // Балтийский регион. 2022. Т. 14. № 3. С. 4–27.
- Милов Л.В. Природно-климатический фактор и особенности российского исторического процесса // Вопросы истории. 1992. № 4–5. С. 37–56.
- Милов Л.В. Великорусский пахарь и особенности российского исторического процесса. М.: РОС-СПЭН, 2001. 576 с.
- Монин А.С., Шишков Ю.А. История климата. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 408 с.
- Муравьева Л.В. Антропогенные изменения природных территориальных комплексов в процессе хозяйственного освоения территории. На примере Верхневолжской низины / Изменение природной среды под влиянием хозяйственной деятельности человека. Калинин, 1985. С. 24–31.
- Национальный атлас России в 4-х томах: Т. 4: История и культура. М.: Изд. ФГУП “ПКО “Картография”, 2008.
- Низовцев В.А. Антропогенный ландшафтогенез: предмет и задачи исследования // Вестн. Моск. ун-та. Серия. 5. География. 1999. № 1. С. 26–30.
- Низовцев В.А. История природопользования Центральной России // Записки филиала РГГУ в г. Великий Новгород. 2012. Т. 10. С. 210–216.
- Низовцев В.А., Эрман Н.М. История хозяйственного освоения ландшафтов Верхневолжского отрезка исторического водного пути “Великий Волжский путь” / Ландшафтно-экологическое состояние регионов России. Воронеж: Истоки, 2015. С. 154–158.
- Пашуто В.Т. Голодные годы в Древней Руси // Ежегодник по аграрной истории Восточной Европы 1962. Минск, 1964. С. 61–94.

- Раунер Ю.Л. Динамика экстремумов увлажнения за исторический период // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1981. № 6. С. 5–22.
- Розенфельдт Р.Л. Древнейшие города Подмосковья и процесс их возникновения // Русский город. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1976. С. 5–16.
- Седов В.В. Восточные славяне в XI–XII вв. Археология СССР. М.: Наука, 1982. 328 с.
- Слепцов А.М., Клименко В.В. Обобщение палеоклиматических данных и реконструкция климата восточной Европы за последние 2000 лет // История и современность. 2005. № 1. С. 118–135.
- Сорина Х.Д., Урбан Ю.Н. Из истории Верхневолжья // Период феодализма. Калинин, 1976. Вып. 1. Ч. XL. 149 с.
- Сычева С.А. Малый климатический оптимум голоцена и малый ледниковый период в памяти почв и отложений пойм рек Русской равнины // Изв. РАН. Сер. геогр. 2011. № 1. С. 79–93.
- Турманина В.И. Растения рассказывают. М.: Мысль, 1987. 156 с.
- Хотинский Н.Ф. Голоцен Северной Евразии. М.: Наука, 1977. 200 с.
- Хохлова Е.Р. Воздействие человека на ландшафты Верхневолжья в период первоначального освоения территории / Экологическое состояние природной среды Верхневолжья. Тверь, 1995. С. 3–13.
- Чернов С.З. Взлет на холмы. Раннемосковское общество и внутренняя колонизация // Родина. 2003. № 12. С. 28–33.
- Эрман Н.М., Низовцев В.А. Становление поселенческой структуры Великого Волжского исторического водного пути (на примере бассейна Верхней Волги) // Вестн. Академии Чеченской Республики. 2019. Т. 2. № 45. С. 114–119.
- Эрман Н.М., Низовцев В.А., Александровская О.А. Волоковые кресты – свидетели освоения исторических водно-волоковых путей России // Эколого-географические исследования в речных бассейнах. Воронеж: ВГПУ, 2018. С. 153–159.

Landscape and Climatic Conditions of the Formation of the Medieval Settlement Structure of the Upper Volga Region

V. A. Nizovtsev^{a, *} and N. M. Erman^b

^a*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

^b*IHST RAS, Moscow, Russia*

^{*}*e-mail: nizov2118@mail.ru*

The formation of a settlement structure is a spatial reflection of the life activities (types and methods of farming) of settlers and, accordingly, is completely determined by local landscape and climatic conditions. Therefore, the main goal of the study is to identify the features of the formation of the medieval settlement structure of the Upper Volga region depending on landscape and climatic conditions and the periodization of this process. The most important practical tasks were establishing the landscape resource base and reconstructing the dynamics of environmental management in key areas, as well as fluctuations in climatic conditions of human economic activity. Based on a combined analysis of historical documents and published materials, the following were established: features of climatic conditions and the nature of the manifestation of adverse natural phenomena in the main historical periods. Landscape-historical studies were carried out at the regional (for the entire Upper Volga region) and at the local levels (for key areas). The assessment of the resource base was carried out on the basis of paleo-reconstruction of the landscape structure with subsequent ecological-edaphic analysis. Locational and landscape analysis of archaeological and historical materials in key areas became the basis for a retrospective reconstruction of environmental management and settlement structure of the Upper Volga region. The main periods of medieval settlement in the Upper Volga region are considered. The main attention was paid to the influence of local landscape conditions and climate fluctuations on environmental management and the formation of settlements. During the period of the medieval optimum at the turn of the first and second millennia, with a maximum at the end of the 10th century. The functioning of the Great Volga Route and the intensive Slavic settlement of its Upper Volga section begin. At an early stage, predominantly valley landscape complexes with the most favorable properties for subsistence farming were developed for settlers. During the Little Ice Age, sources increasingly record sharp climate fluctuations with manifestations of extreme negative processes, which leads to the “transfer” of settlements to higher and “warmer” landscape complexes of the interfluvies.

Keywords: Great Volga Route, ancient Russian cities, landscape, climatic conditions, extreme natural phenomena, environmental management, resource base, historical environmental management

REFERENCES

- Atlas SSSR. Karty prirody. Fiziko-geograficheskoe raionirovanie. M 1 : 24000000* [Atlas of the USSR. Nature Maps. Physiographic Zoning. Scale: 1 : 24000000]. Moscow, 1983. 120 p.
- Atlas Yaroslavskoi oblasti. Geografiya. Istoriya* [Atlas of the Yaroslavl Region. Geography. Story]. Moscow: DIK Publ., 1999. 48 p.
- Barash S.I. *Istoriya neurozhaev i pogody v Evrope* [History of Crop Failures and Weather in Europe]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. 236 p.
- Bogolepov M.L. On climate fluctuations in European Russia over the historical era. *Zemleved.*, 1907. vol. 14, no. 3–4, pp. 58–162. (In Russ.).
- Borisenkov E.P., Pasetskii V.M. *Ekstremal'nye prirodnye yavleniya v russkikh letopisyakh XI–XVII vv.* [Extreme Natural Phenomena in Russian Chronicles of the 11th–17th Centuries]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983. 240 p.
- Borisenkov E.P., Pasetskiy V.M. *Tysyacheletnyaya letopis' neobychnykh yavlenii prirody* [Thousand-Year Chronicle of Extraordinary Natural Phenomena]. Moscow: Mysl' Publ., 1988. 522 p.
- Buchinski I.E. *O klimate proshlogo Russkoi ravniny* [About the climate of the past of the Russian Plain]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1957. 142 p.
- Chernov S.Z. Taking off to the hills. Early Moscow society and internal colonization. *Rodina*, 2003, no. 12, pp. 28–33. (In Russ.).
- Dorofeev A.A., Khokhlova E.R. *Landshafty Tverskoi oblasti* [Landscapes of the Tver Region]. Tver: Tver. Gos. Univ., 2016. 120 p.
- Dubov I.V. *Velikii Volzhskii put'* [The Great Volga Waterway]. Leningrad: Izd-vo Leningrad. Univ., 1989. 257 p.
- Erman N.M., Nizovtsev V.A., Aleksandrovskaya O.A. Portage crosses are witnesses of the development of historical waterways of Russia. In *Ekologo-geograficheskie issledovaniya v rechnykh basseynakh* [Ecological and Geographical Studies in River Basins]. Voronezh: VGPU, 2018, pp. 153–159. (In Russ.).
- Erman N.M., Nizovtsev V.A. The development of the settlement structure of the historical Great Volga Waterway (on the example of the Upper Volga basin). *Vestn. Akad. Chechen. Respubl.*, 2019, vol. 2, no. 45, pp. 114–119. (In Russ.).
- Gonyany M.I., Krenke N.A. The settlement structure of the Dyakovtsi in the Pakhra River basin. *Sovet. Arkheol.*, 1988, no. 3, pp. 54–62. (In Russ.).
- Goryunova E.I. *Etnicheskaya istoriya Volgo-Okskogo mezhdurech'ya* [Ethnic History of the Volga-Oka Interfluvium]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1961. 264 p.
- Kirpichnikov A.N. The Great Volga Route. *Rodina*, 2002. no. 11–12, pp. 59–64. (In Russ.).
- Kiryanova N.A. *Sel'skokhozyaistvennye kul'tury i sistemy zemledeliya v lesnoi zone Rusi XI–XV vv.* [Agricultural Crops and Farming Systems in the Forest Zone of Rus' in the 11th–15th Centuries]. Moscow: Inst. Arkheol. RAN, 1992. 162 p.
- Khokhlova E.R. Human impact on the landscapes of the Upper Volga region during the initial development of the territory. In *Ekologicheskoe sostoyanie prirodnoi sredy Verkhnevolzh'ya* [Ecological State of the Natural Environment of the Upper Volga Region]. Tver, 1995, pp. 3–13. (In Russ.).
- Khotinskii N.F. *Golotsen Severnoi Evrazii* [Holocene of Northern Eurasia]. Moscow: Nauka Publ., 1977. 200 p.
- Klimenko V.V., Klimanov V.A., Sirin A.A., Sleptsov A.M. Climate change in western European Russia in the late Holocene. *Dokl. Akad. Nauk*, 2001, vol. 376, no. 5, pp. 679–683. (In Russ.).
- Kolbovskii E.Yu. *Istoriya i ekologiya landshaftov Yaroslavskogo Povolzh'ya* [History and Ecology of Landscapes of the Yaroslavl Volga Region]. Yaroslavl: Yaroslav. Gos. Univ., 1993. 114 p.
- Krenke A.N., Chernavskaya M.M. Spatial and temporal changes of the frequency of extreme climate phenomena in the Russian Plain according to the evidences of the historical documents. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 1998, no. 5, pp. 129–141. (In Russ.).
- Kuchkin V.A. *Formirovanie gosudarstvennoi territorii Severo-Vostochnoi Rusi v X–XIV vv.* [Formation of the State Territory of North-Eastern Rus' in the 10th–14th Centuries]. Moscow: Nauka Publ., 1984. 353 p.
- Kuza A.V. *Malye goroda drevnei Rusi* [Small Towns of Ancient Rus']. Moscow: Nauka Publ., 1989. 168 p.
- Landshaftnaya karta SSSR: Dlya vuzov. M 1 : 4000000* [Landscape Map of the USSR: For Universities. Scale 1:4000000]. Moscow: GUGK Publ., 1988.
- Le Rua Laduri. *Istoriya klimata s 1000 goda* [Climate History Since 1000]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1971. 280 p.
- Lyakhov M.E. Climatic extremes in the central part of the European territory of the USSR in the 13th–20th centuries. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 1984, no. 6, pp. 68–74. (In Russ.).
- Makarov N.A., Shpolyanskii S.V., Leontiev A.E. Rural settlement in the central part of Suzdal land at the end of the 1st – first half of the 2nd millennium AD: new materials. In *Rus' v IX–XIV vekakh: Vzaimodeistvie Severa i Yuga* [Rus' in the 9th–14th Centuries: Interaction of the North and the South]. Moscow: Nauka Publ., 2005, pp. 196–215. (In Russ.).
- Martynov V.L., Subetto D.A., Brylkin V.V., Grekov I.M., Kublicky Y.A., Orlov A. V., Sazonova I.E., Sokolova N.V. The 'Route from the Varangians to the Greeks': truth or fiction. *Baltic Region*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 4–27.
<https://doi.org/10.5922/2079-8555-2022-3-1>
- Milov L.V. Natural-climatic factor and features of the Russian historical process. *Vopr. Istorii*, 1992, no. 4–5, pp. 37–56. (In Russ.).
- Milov L.V. *Velikorusskii pakhar' i osobennosti rossiiskogo istoricheskogo protsessa* [The Great Russian Plowman and the Features of the Russian Historical Process]. Moscow: ROSSPEN Publ., 2001. 576 p.
- Monin A.S., Shishkov Yu.A. *Istoriya klimata* [History of Climate]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979. 408 p.

- Murav'eva L.V. Anthropogenic changes in natural territorial complexes in the process of economic development of the territory. Using the example of the Upper Volga lowland. In *Izmenenie prirodnoi sredy pod vliyaniem khozyaistvennoi deyatel'nosti cheloveka* [Changes in the Natural Environment under the Influence of Human Economic Activity]. Kalinin, 1985, pp. 24–31. (In Russ.).
- Natsional'nyi atlas Rossii v 4-kh tomakh: T.4: Istoriya i kul'tura [National Atlas of Russia in 4 Volumes: Vol. 4: History and Culture]. Moscow: Kartografiya Publ., 2008.
- Nizovtsev V.A. Anthropogenic landscape genesis: the subject and goals of investigations. *Vestn. Mosk. Univ. Ser. 5: Geogr.*, 1999, no. 1, pp. 26–30. (In Russ.).
- Nizovtsev V.A. History of environmental management in Central Russia. *Zapis. Fil. RGGU Gorode Velik. Novgorod*, 2012, vol. 10, pp. 210–216. (In Russ.).
- Nizovtsev V.A., Erman N.M. History of economic development of landscapes of the Upper Volga section of the historical waterway Great Volga Route. In *Landshaftno-ekologicheskoe sostoyanie regionov Rossii* [Landscape-Ecological State of Russian Regions]. Voronezh: Istoki Publ., 2015, pp. 154–158. (In Russ.).
- Pashuto V.T. Famine years in Ancient Rus'. In *Ezhegodnik po agrarnoi istorii Vostochnoi Evropy* [Yearbook on the Agrarian History of Eastern Europe]. Minsk, 1964, pp. 61–94. (In Russ.).
- Rauner Yu.L. Dynamics of moisture extremes over the historical period. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 1981, no. 6, pp. 5–22. (In Russ.).
- Rosenfel'dt R.L. The most ancient cities of the Moscow region and the process of their emergence. In *Russkii gorod* [Russian City]. Moscow: Izv-vo Mosk. Univ., 1976, pp. 5–16. (In Russ.).
- Sedov V.V. *Vostochnye slavyane v XI–XII vv.* [Eastern Slavs in the 11th–12th Centuries]. Moscow: Nauka Publ., 1982. 328 p.
- Sleptsov A.M., Klimenko V.V. Generalization of paleoclimatic data and reconstruction of the climate of Eastern Europe during last the 2000 years. *Istor. Sovrem.*, 2005, no. 1, pp. 118–135. (In Russ.).
- Sorina Kh.D., Urban Yu.N. From the history of the Upper Volga region. In *Period feodalizma. Vyp. 1. Ch. XL* [Period of Feudalism. Vol. 1. Part XL]. Kalinin, 1976. 149 p. (In Russ.).
- Sycheva S.A. Little climatic Holocene optimum and Little Ice Age in the memory of soils and deposits of rivers floodplains of the Russian Plains. *Izv. Akad. Nauk., Ser. Geogr.*, 2011, no. 1, pp. 79–93. (In Russ.).
- Turmanina V.I. *Rasteniya rasskazyvayut* [Plants Tell Stories]. Moscow: Mysl' Publ., 1987. 156 p.
- Zolotokrylin A.N., Krenke A.N., Lyakhov M.E., Popova V.V., Chernavskaya M.M. Climate fluctuations in the European part of the USSR in the historical past. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Geogr.*, 1986, no. 1, pp. 26–36. (In Russ.).

АДАПТАЦИЯ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА: ОПЫТ СТРАН И РЕГИОНОВ

УДК 551.583:502.333:914/919

АДАПТАЦИЯ К КЛИМАТИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ: ОБЩИЕ, СЕКТОРАЛЬНЫЕ И РЕГИОНАЛЬНЫЕ МЕРЫ (НА ПРИМЕРЕ ОПЫТА ИНДИИ)

© 2024 г. Н. Н. Алексеева^{1, *}, А. И. Банчева^{1, **}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: nalex01@mail.ru

**e-mail: ban-sai@mail.ru

Поступила в редакцию 20.07.2023 г.

После доработки 08.12.2023 г.

Принята к публикации 16.05.2024 г.

Адаптация к изменениям климата становится важнейшим направлением современной климатической политики. Особенно она актуальна для развивающихся стран, которые наиболее уязвимы к последствиям изменения климата и обладают ограниченной адаптационной способностью. Цель данной статьи — обзор достижений и проблем в сфере адаптации к изменению климата в соответствии с методологией МГЭИК на примере одной из крупнейших развивающихся стран мира — Индии. Эта страна во все больших масштабах сталкивается с последствиями глобальных изменений климата и в ответ на это предпринимает активные меры реагирования. На основе материалов МГЭИК, разработок других международных организаций, российских исследований рассмотрены основные методологические подходы к оценке адаптации к климатическим изменениям и их эволюция. В качестве основных источников по Индии использованы правительственные документы, национальные сообщения для МГЭИК, программы и планы действий штатов в сфере адаптации, научные публикации, сообщения в средствах массовой информации и статистические данные. На этой основе охарактеризованы: 1) воздействие наблюдаемых и прогнозируемых климатических изменений на население и природно-хозяйственные системы Индии; 2) уязвимость к ним ряда систем жизнеобеспечения и секторов, с акцентом на сельское хозяйство; 3) основные типы адаптации, включая структурную, социальную и институциональную. Показано, что система реагирования на возникающие вызовы в сфере климатических изменений строится “сверху вниз” — в рамках стратегического планирования на национальном уровне и уровне штатов. В стране реализуется один из основополагающих принципов адаптационных мероприятий — подход “сопутствующих выгод”, когда цели социально-экономического развития согласуются с климатической повесткой и тем самым достигается защита наиболее уязвимых слоев населения. Адаптация рассматривается в Индии как приоритет климатической политики с учетом меньшего удельного вклада страны в глобальное потепление, чем экономически развитых стран.

Ключевые слова: уязвимость, климатическая политика, меры адаптации, сельское хозяйство, социально-экономическое развитие, Индия

DOI: 10.31857/S2587556624030127 EDN: SNRITN

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы. Адаптация к происходящим и будущим изменениям климата — ключевая составляющая современной климатической политики. Тематика адаптации к климатическим изменениям вошла в международную повестку с начала 1990-х годов в процессе переговоров по Рамочной конвенции по изменению климата (РКИК) ООН и получила развитие в Киотском протоколе. Внедрение адаптации в практической плоскости ведет начало со времени 7 Кон-

ференции сторон (COP-7) в Марракеше в 2001 г., когда были созданы три фонда, финансирующих меры по адаптации.

Политика стран в сфере адаптации к изменению климата прошла все фазы становления — от алармизма и осознания ее значимости до реализации стратегий и планов действий. Совместные усилия международных организаций, научные доклады Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) и освещение в СМИ способствовали росту числа

адаптационных мер в развитых и развивающихся странах (Climate ..., 2014в). За последнее десятилетие достигнуты значительные успехи, в том числе в рамках создания разнообразных институтов, действующих на местном, национальном, региональном и международном уровнях. Так, в рамках РКИК ООН функционируют Фонды адаптации к изменению климата¹, ПРООН разработала специальный Инструментарий для практической разработки инициатив по адаптации к изменению², реализуются региональные стратегии (например, EU Strategy on Adaptation to Climate Change, 2013), свыше 120 развивающихся стран приняли и начали осуществление национальных планов по адаптации к изменениям климата (Lebling et al., 2020). В рамках Парижского соглашения определяемые на национальном уровне вклады 136 стран содержат конкретные компоненты по адаптации.

Общепризнанно, что развивающиеся страны особенно подвержены негативным последствиям изменения климата (Patt et al., 2010; World ..., 2010) из-за сильной зависимости систем жизнеобеспечения населения и многих секторов экономики от климатических изменений (сельское хозяйство, рыболовство, лесное хозяйство, транспорт, жилищно-коммунальное хозяйство, туризм и др.), а также из-за ограниченной способности адаптироваться к этим воздействиям. Кроме того, для них характерна высокая социально-экологическая уязвимость, так как доступ к средствам существования ограничивается из-за деградированной окружающей среды и возросших климатических рисков (Asia ..., 2022).

Цель статьи – обзор достижений и проблем в сфере адаптации к изменению климата в соответствии с методологией МГЭИК на примере одной из крупнейших развивающихся стран мира – Индии. Выбор этой страны в качестве объекта исследования связан с тем, что она во все больших масштабах сталкивается с последствиями глобальных изменений климата и в ответ на это принимает активные меры реагирования.

В современной Индии сосредоточено около 18% населения мира, 3.3% ВВП (по номиналу, 2023, Всемирный Банк) и свыше 6% потребления энергии (2021, Международное энергетическое агентство). В то же время по национально-

му индексу многомерной бедности доля бедного населения³ в 2019–2021 гг. составила 15%, в сельской местности доля бедняков достигает 19%, в городах – 5.3% (India ..., 2023). В стране не решены острейшие проблемы социального неравенства, преодоления массовой бедности и голода, миграции сельского населения в города, приводящей к разрастанию трущоб. При этом Индия активно реализует климатическую политику как на международной арене, так и внутри страны. Как и в других развивающихся странах, планы действий Индии по борьбе с изменением климата основаны на признании рисков и экономических издержек, которые могут возникнуть в случае бездействия. Осознавая это, Индия инициировала ряд планов и программ по адаптации к изменению климата, которые осуществляются на разных уровнях – от государственного (на уровне правительства страны и штатов) до действий местных сообществ.

Обзор ранее выполненных исследований. Адаптация определяется РКИК ООН как “пригодность общественных и природных систем в ответ на фактические или ожидаемые климатические воздействия или их последствия” (Climate ..., 2001, р. 881). Со второй половины 2000-х годов понимание адаптации сместилось от преодоления уязвимости к климатическим рискам за счет инженерных и технологических мер, к более широкому социальному и экономическому аспектам и способности общества реагировать на возникающие риски. Уязвимость стала рассматриваться как функция воздействия, чувствительности и адаптивной способности. Различные концепции уязвимости интегрированы в Специальном докладе об управлении рисками экстремальных явлений и стихийных бедствий в целях содействия адаптации к изменению климата (Managing ..., 2012). Сейчас концепция уязвимости используется намного шире, в том числе по отношению к природным опасностям (Papathoma-Köhle et al., 2019), состоянию экосистем (Delaney et al., 2022), продовольственной безопасности (Das, 2021) и др.

В Глоссарии 5 Оценочного доклада МГЭИК (2014) адаптация определяется как процесс приспособления к существующему или ожидаемому климату и его воздействиям с целью снижения ущерба или использования благоприятных возможностей в антропогенных системах. Адаптация все более стала пониматься как управление климатическими рисками. Подчеркивалось, что адаптация зависит от места и контекста и не существует единого подхода к снижению рисков,

¹ Адаптационный фонд, Фонд наименее развитых стран и Специальный фонд для борьбы с изменением климата. Помимо этого, действует множество других фондов: Глобальный альянс по борьбе с изменением климата, Глобальный экологический фонд, Зеленый климатический фонд, Программа адаптации для мелких фермеров, Пилотная программа адаптации к изменению климата и др.

² [https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/publications/Toolkit%20FINAL%20\(new%20cover\).pdf](https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/publications/Toolkit%20FINAL%20(new%20cover).pdf) (дата обращения 15.05.2023).

³ Разработан Национальным институтом трансформации Индии (НИТИ Айог) в рамках отчетности по Целям устойчивого развития. Индекс учитывает не только доходы и уровень жизни, но и доступ к здравоохранению и образованию.

универсального для всех регионов (Climate ..., 2014в). Основное внимание уделялось устранению ключевых причин уязвимости в разных областях путем информирования населения, финансирования, развития технологий и т.п. (Climate ..., 2014а), а адаптационные меры стали рассматриваться в контексте устойчивого развития. Адаптация стала увязываться с этическими вопросами, равенством доступа для разных групп населения и социальной справедливости.

В 6 Оценочном докладе определение адаптации не изменилось, она трактуется как деятельность, направленная на преодоление климатических рисков и уязвимости. Адаптация может быть упреждающей или реагирующей (ответной), постепенной и/или трансформационной. Адаптацию стали чаще соотносить с понятием “устойчивость” (resilience), которая предполагает способность систем справляться с опасным событием или тенденцией, трансформируясь таким образом, чтобы сохранять свои основные функции, идентичность и структуру (Climate ..., 2022). Устойчивое к изменению климата развитие стало пониматься как процесс, объединяющий меры по адаптации с мерами по смягчению воздействий для содействия устойчивому развитию для всех. В то же время для эффективного решения проблем адаптации к климатическим изменениям необходим кардинальный пересмотр системы критериев оценки новых рисков, негативных последствий и потенциальных выгод (Мохов, 2022).

Методологические подходы к адаптации разрабатываются также рядом международных организаций. Так, Европейское экологическое агентство (ЕЭА) использует концепцию “цикла управления в сфере адаптации” (adaptation policy cycle) как поэтапного процесса разработки и совершенствования национальной политики адаптации. Цикл включает шесть этапов адаптационной политики. Он начинается с подготовки, оценки рисков и уязвимости, включает определение вариантов адаптации, разработку национальных стратегий и планов действий, секторальных мер и завершается оценкой и мониторингом выполнения адаптационных мероприятий (National ..., 2018).

Для сравнительной оценки потенциала адаптации стран к изменениям климата используют несколько индексов — индекс уязвимости к климатическим изменениям агентства Maplecroft⁴, индекс эффективности действий в сфере климатической политики (Burck et al., 2023); индикаторы уязвимости-устойчивости (Moss et al., 2001) и др. Единственный индекс, по которому страны ранжируются в сфере адаптации — глобальный индекс адаптации Notre Dame Global Adaptation

Initiative (ND-GAIN)⁵ (университет Нотр-Дам, США), публикуемый с 1995 г. Он используется из-за наиболее полного охвата стран и сопоставимости с другими международными индексами (Benzie1 et al., 2019). Индекс рассчитывается по параметрам уязвимости стран к изменениям климата (по 6 секторам жизнеобеспечения) и готовности к адаптации (по 3 категориям — управление, экономика, социальная сфера), всего по 45 индикаторам. В 2021 г. Россия занимала 30-е место в рейтинге из 185 стран (где 1-е место — лучшее), Китай — 39-е, Бразилия — 91-е, Индия — 116-е место, находясь в группе государств с высокой степенью уязвимости и при этом с достаточно высоким уровнем готовности к адаптации.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Статья базируется на материалах МГЭИК — оценочных и специальных докладах, подготовленных Рабочей группой II материалах интерактивного атласа, подготовленного Рабочей группой I в рамках 6 Оценочного доклада⁶, разработках международных организаций (ООН, ОЭСР, ЕЭА), Всемирного банка, которые активно занимаются вопросами адаптации. Использовались результаты отечественных исследований адаптации.

В статье рассматриваются меры адаптации социально-экономических систем. В соответствии с подходами Рабочей группы II 5 Оценочного доклада (2014) анализ деятельности в сфере адаптации Индии включал три этапа — рассмотрение климатических воздействий и рисков, уязвимости для ключевых систем жизнеобеспечения и секторов, затем — политики и вариантов адаптации, которые проиллюстрированы на разных примерах, с акцентом на сельское хозяйство. Эти же этапы относятся к стадиям оценки, используемым в цикле управления в сфере адаптации. Для этого анализировались официальные данные правительства Индии, национальные сообщения для МГЭИК, программы и планы действий штатов в сфере изменений климата, научные статьи, публикации в средствах массовой информации статистические данные международных организаций (ООН, ФАО и др.).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основе анализа докладов МГЭИК систематизированы методологические подходы к оценке факторов адаптации (табл. 1). Подходы

⁴ <https://www.maplecroft.com/risk-indices/> (дата обращения 12.05.2023).

⁵ <https://gain.nd.edu/our-work/country-index/rankings/> (дата обращения 21.06.2023).

⁶ IPCC WGI Interactive Atlas. IPCC Working Group I (WGI): Sixth Assessment Report. <https://interactive-atlas.ipcc.ch/> (дата обращения 20.05.2023).

Таблица 1. Методологические подходы к оценке факторов адаптации к климатическим изменениям

Критерии оценки	Воздействие климатических изменений	Уязвимость к климатическим изменениям	Варианты адаптации для снижения рисков
Тип оценки	“Сверху вниз”: от глобального до регионального и локального уровней	“Снизу вверх”: преимущественно на локальном уровне	Сочетание оценок “сверху вниз” и “снизу вверх”
Подходы	Использование глобальных климатических моделей и сценариев; учет биофизических показателей для оценки необходимости адаптации и/или смягчения последствий	— Оценка социально-экономического положения различных групп под влиянием текущих и будущих изменений климата — Оценки эффективности текущей политики и планов в рамках системы управления рисками	Включение планирования на уровне местных сообществ в национальные планы адаптации
Ограничения	Переход от глобальных климатических моделей на уровень регионов и территорий (даунскейлинг) приводит к неопределенности прогнозов и ограничениям статистической достоверности	Оценивается на основе мнения заинтересованных сторон, в том числе уязвимых групп, с учетом систем их жизнеобеспечения. Приоритет отдается местным сообществам с учетом факторов, связанных с бедностью и недостатками развития	Необходимость оценки осуществимости, эффективности, приемлемости, легитимности и справедливости адаптивных действий. Не выработаны четкие критерии и отличия успешной адаптации от эффективного социально-экономического развития
Сложности	Требуется внешняя научная и техническая экспертиза для определения проблем изменения климата и формулирования местными и/или негосударственными организациями решений по планированию адаптационных действий	Невозможность или затрудненное использование моделей и данных о климатических трендах на местном уровне, что препятствует разработке обоснованных решений по адаптации	Отсутствие четких метрик, затрудняющих выбор показателей для мониторинга и оценки прогресса вариантов адаптации и их вклада в снижение уязвимости, поскольку результаты адаптации требуют времени, и часто зависят от меняющихся условий и целей

“сверху вниз” основаны на анализе воздействий (на основе климатических моделей, сценариев и оценок рисков) и реализуются правительственными органами, обеспечивающими финансированием, стратегиями и планами адаптации местные власти и бизнес, осуществляющими эти меры. Подходы “снизу вверх” базируются на учете местных рисков населением и включают механизмы адаптации на уровне сообществ, опирающиеся на инициативы жителей. Такие меры адаптации требуют эффективных местных структур, достаточного финансирования и услуг по климатическому информированию (Singh and Chudasama, 2021). Там, где сочетаются меры “сверху вниз” и “снизу вверх”, связи между планированием адаптации и ее реализацией дают лучший результат.

Пока неясно, насколько эффективны адаптационные меры в настоящее время и будут ли они эффективны в будущем (Simpson et al., 2023). Их отсроченные результаты к тому же будут оцениваться в условиях изменившихся внешних факторов. Сложности оценки эффективности адаптации заключается в том, что для нее пока не разработаны общепринятые абсолютные показатели, как объемы эмиссий парниковых газов или значения радиационного воздействия для оценки смягчения воздействий на изменения климата. Кроме того, отсутствуют четкие разли-

чия эффективной адаптации от успешного социально-экономического развития.

Рассмотрим факторы, определяющие текущую ситуацию в сфере адаптации к климатическим изменениям на примере в Индии.

1) *Воздействие климатических изменений.* Повышение среднегодовых температур происходило в Индии в период 1986–2015 гг. со скоростью 0.15°C в декаду. Фиксируется увеличение числа экстремально жарких дней и жарких ночей, продолжительных волн жары и как следствие – усиление испарения и снижение влагозапасов в почве. За историю метеорологических наблюдений, ведущихся с 1900 г., самым жарким периодом был март 2022 г., когда температура в столице и соседних штатах держалась на уровне 49°C в течение нескольких недель. К концу XXI в. среднегодовая температура воздуха в Индии повысится от 2.4°C до 4.4°C (по разным сценариям) в сравнении с периодом 1976–2005 гг., а продолжительность периодов экстремальной жары в апреле–июне удвоится (Assessment ..., 2020).

Потепление сочетается со значительными межгодовыми колебаниями осадков с учащением экстремальных явлений – более частых и сильных ливней в сезон муссона (приносящего до 85% годовой суммы осадков) при высокой межгодовой вариабельности муссонных осадков.

Таблица 2. Изменения климатических показателей Южной Азии по сценариям с наименьшими (SSP1–2.6) и наибольшими (SSP5–8.5) выбросами парниковых газов (медианные значения)

Сценарий	Изменение среднегодовой температуры, °C		Изменение среднегодового максимума, °C		Среднегодовые осадки, % изменений	
	SSP1–2.6	SSP5–8.5	SSP1–2.6	SSP5–8.5	SSP1–2.6	SSP5–8.5
2021–2040	1.0	1.1	1.2	1.3	6.4	4.6
2041–2060	1.4	2.3	1.5	2.0	8.4	10.2
2081–2100	1.6	4.7	1.6	4.3	11.0	26.2

Составлено по: IPCC WGI Interactive Atlas. IPCC Working Group I (WGI): Sixth Assessment Report (<https://interactive-atlas.ipcc.ch/>) (дата обращения 20.03.2023)).

Прогнозируется также увеличение частоты засух при сокращении их интенсивности. В течение 1951–2015 гг. в Индии наблюдалось сокращение среднегодовых осадков. При этом география изменений контрастна: в Центральной Индии и на Северо-Востоке количество осадков уменьшилось на 1–5 мм, а на Северо-Западе, в Джайпуре и Кашмире оно несколько выросло. В дальнейшем моделируется их увеличение (табл. 2), наиболее сильное – в засушливых районах Гуджарата, Раджастана, Пенджаба и Харьяны (Assessment ..., 2020). Региональная дифференциация изменения осадков, по данным климатического моделирования больше, чем у температур.

Моделирование в соответствии со сценариями репрезентативных траекторий концентрации (РТК) углекислого газа, свидетельствует о разных диапазонах увеличения температур и осадков в Индии для уровня глобального потепления в 2°C. В табл. 2 представлены результаты моделирования в рамках 6-й фазы Проекта сравнения совместных моделей (CMIP6) Всемирной программы исследований климата, полученные с использованием Интерактивного атласа МГЭИК. Были взяты крайние варианты социально-экономических сценариев 6 Оценочного доклада МГЭИК – SS1 (путь устойчивого развития) и SS5 (развитие на ископаемом топливе) с возможными значениями радиационного воздействия в 2100 г. 2.6 и 8.5 Вт/м² соответственно. Стоит также отметить, что для ряда климатических показателей переход от глобальных климатических моделей на уровень регионов и территорий приводит к неопределенности прогнозов и их расхождению.

В 5 Оценочном докладе МГЭИК прогнозирует глобальное повышение среднего уровня моря на 26–55 см при сценарии с низкими выбросами и на 45–82 см при сценарии с высокими выбросами, что создает значительный риск для густонаселенных прибрежных районов Индии.

2) *Уязвимость к климатическим изменениям.* Оценки уязвимости занимают центральное место при планировании и выборе вариантов адаптации для конкретных регионов и секторов.

В докладах МГЭИК уязвимость оценивают для природных (наземных и морских) экосистем и для человека, последний блок охватывает такие системы жизнеобеспечения как инфраструктура и сервисы, уровень благосостояния, здравоохранение, продовольственная и водная безопасность, мобильность населения и др. (Climate ..., 2022).

В Индии практически все перечисленные выше системы уязвимы к климатическим рискам. Уязвимость городов обусловлена большой долей неформальных поселений (в трущобах проживает 49% городского населения), отсутствием адекватной инфраструктуры и социальных услуг (Singh et al., 2021a). Растущая бедность в городах только усугубляется: в 2010-е годы более 37 млн крестьян и сельскохозяйственных рабочих покинули деревни для трудоустройства в строительстве и промышленности⁷. Особенно уязвимы прибрежные города Мумбаи и Ченнаи, которые являются “горячими точками” миграции и где велики климатические риски (Climate ..., 2014b). Миллионы людей, живущих в приморских районах, в дельтах Сундарбана (4.5 млн человек) и Маханади (6 млн) и их системы жизнеобеспечения подвергаются рискам ежегодных штормовых нагонов и циклонов, повышения уровня моря (Patra, 2016). От наводнений за период с 1980 по 2017 г. пострадало около 750 млн человек, а экономические потери достигли 58.7 млрд долл. США (Bahinipatia and Gupta, 2022). В Гималаях изменение температуры и характера осадков привело к отступанию ледников, что, в свою очередь, повлияло на водообеспеченность в горных речных бассейнах (Sud et al., 2015). Возросли риски гляциальных селей и наводнений, вызванных прорывами ледниковых озер.

Рассмотрим факторы, определяющие уязвимость к изменениям климата на примере сельскохозяйственного сектора – наиболее важного для Индии. По данным ФАО в стране наблю-

⁷ Economic surveys–India, OECD. 2014, November. <https://www.oecd.org/economy/surveys/India-2014-Overview.pdf/> (дата обращения 30.09.2023).

дается массовое недоедание (16.6% населения, 2020–2022 гг.) (The State ..., 2023), которое может усугубиться в условиях роста нестабильности производства продовольствия. Кроме того, средства существования по меньшей мере 65% индийцев (2021) тесно связаны с аграрным сектором⁸. В число наиболее уязвимых групп населения входят малые и маргинальные фермерские хозяйства (около 85% фермеров имеют низкую финансовую устойчивость), зарегистрированные касты и племена, женщины и дети из бедных слоев. Повышение температур и увеличение вариабельности осадков могут усугубить и без того не очень благоприятную агроприродную ситуацию, учитывая, что сейчас около 16% территории страны подвержено влиянию засух, 12% – наводнениям и 8% – тропическим циклонам (India ..., 2012).

Продовольственная безопасность страны зависит от производства пшеницы и риса, на долю которых приходится 75% общего объема производства зерновых⁹. Другие зерновые (джовар, баджра, кукуруза, раги, др. виды проса и ячмень) обеспечивают 15% производства, хотя их роль в продовольственной ситуации в целом недооценена, особенно в районах неорошаемого земледелия.

Пахотные земли занимают 53% территории Индии¹⁰, по площади пашни страна занимает второе место в мире после США и перед Россией. На неорошаемую пашню приходится около 60% посевных площадей. Их продуктивность во многом определяется муссонными осадками летнего сезона (хариф) и температурами, влияющими на эвапотранспирацию. Особенно уязвимы неорошаемые пашни, не затронутые зеленой революцией.

Повышение температур оказывает разнонаправленное влияние на культуры: для пшеницы оно в целом негативно, в то время как для кокосовой пальмы и ряда овощных культур – положительно. В исследованиях уязвимости сельского хозяйства климатические риски оцениваются для сборов ключевых зерновых по-разному. Возможный ущерб для сборов пшеницы вдвое выше, чем для риса (Sharma et al., 2020). Посевы риса и пшеницы страдают от экстремальных осадков и засух, для пшеницы уязвимость связана также увеличением минимальных температур в период вегетации. Температуры уже приближаются к критиче-

ским уровням и для отдельных стадий вегетации риса, например в северной Индии в октябре, в южной – в апреле–августе, в восточных штатах – в марте–июне (Climate ..., 20146).

Изменения урожайности прогнозируются для пшеницы, возделываемой на Индо-Гангских равнинах, где 85% сборов получают при поливе (Kumar et al., 2014). Несмотря на увеличение годового стока, прогнозируемое для бассейнов рек Ганг и Инд (Gosain and Rao, 2018), в зимний вегетационный период ожидается нехватка воды для полива, особенно в Пенджабе.

Использование новых сортов в сочетании с достижениями селекции, которые улучшают устойчивость пшеницы к жаре, затрудняет точное определение критических температурных пределов, выше которых урожайность пшеницы будет сокращаться. В случае сценария с наибольшими выбросами (SSP5–8.5) к 2060 г. прогнозируется увеличение более чем на 2°C средних и максимальных температур относительно современных (см. табл. 2), что превысит оптимальный для пшеницы термический диапазон. По оценкам, из-за изменений климата в 2050 г. Индия будет ежегодно терять 1.8–3.4% своего ВВП в результате снижения сборов риса и пшеницы¹¹. Таким образом, индийское сельское хозяйство и, как следствие, продовольственная безопасность весьма уязвимы по отношению к прямым и косвенным климатическим рискам.

3) *Варианты адаптации.* В Индии представлены все основные типы адаптации – структурная/физическая, социальная и институциональная. Структурная адаптация включает создание инженерных сооружений, внедрение новых технологий, экосистемные решения, развитие необходимых служб (Climate ..., 2014a). Учитывая, что береговая линия достигает 7500 км, большое внимание уделяется созданию приморских защитных сооружений, убежищ от наводнений и т.п. Например, в штате Западная Бенгалия в приморских районах создаются укрытия от циклонов, строятся защитные насыпи, внедряются надежные системы связи и транспорта, совершенствуется сеть медицинских учреждений (Das, 2023). Для адаптации жилищного сектора используются новые технологии для повышения надежности зданий и сооружений, пассивного охлаждения, автономные системы ВИЭ (Singh et al., 20216).

В сфере агротехнологий внедряются новые устойчивые сорта, водосберегающие методы, растет эффективность орошения (например, введено свыше 1 млн га пашни под микрооро-

⁸ https://www.theglobaleconomy.com/India/rural_population_percent/ (дата обращения 04.06.2023).

⁹ India's foodgrain production estimated at 330 million tonnes for 2022–23: Third Advance Estimate. Down to Earth. <https://www.downtoearth.org.in/news/agriculture/india-s-foodgrain-production-estimated-at-330-million-tonnes-for-2022-23-third-advance-estimate-89585> (дата обращения 11.10.2023).

¹⁰ <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>.

¹¹ <https://www.hindustantimes.com/india-news/india-could-lose-1-8-to-3-4-of-gdp-by-2050-due-to-decline-in-rice-and-wheat-yields-101635360100658.html> (дата обращения 17.04.2023).

шением) (Patra, 2016). Фермеры меняют сроки посева и сбора урожая, переходят к скороспелым сортам, диверсифицируют культуры, увеличивают инвестиции в ирригацию и агролесомелиорацию (Climate ..., 2019). Большое внимание уделяется ресурсосберегающему сельскому хозяйству как механизму снижения рисков неурожаев. Например, положительный эффект для агроэкосистем имеет применение шадящей обработки почв в сочетании с севооборотом кукурузы и бобовых в сезон хари́ф с запахиванием остатков зимних посевов масличных и других культур (Pradhan et al., 2018).

Меры по экологическому восстановлению, включая сохранение водно-болотных угодий и мангров, увеличению биоразнообразия, облесению и лесовосстановлению реализуются на разных уровнях — от государственного (“Миссия для зеленой Индии”) до местных программ (например, в штате Уттаркханд) (Dinshaw et al., 2018).

Исследования по оценке климатических рисков и уязвимости секторов экономики ведутся на уровне каждого штата; созданы системы раннего предупреждения и реагирования (в рамках Управлений по борьбе со стихийными бедствиями штатов) (Bahinipatia and Gupta, 2022), сервисы с заблаговременными прогнозами погоды и т.п.

Большое внимание уделяется мерам социальной адаптации, в том числе просвещению, информированию населения и изменению моделей поведения во время чрезвычайных ситуаций. Ключевыми участниками этого процесса являются СМИ и структуры гражданского общества, которые часто опираются на социальные сети. Особое значение приобретает формирование новых навыков и знаний среди фермеров. Например, в рамках Плана действий в области климатических изменений штата Одиша создана сеть центров передового опыта для обучения тысяч специалистов по распространению знаний среди сельского населения (Odisha ..., 2018).

Комплекс институциональных мер включает экономические, законодательные и правительственные механизмы в сфере адаптации. В Индии действуют программы социальной защиты, включая денежные выплаты и программы общественных работ (не только в рамках адаптационных программ), существенно повышающие адаптационные способности населения. Механизмы социальной защиты перестраиваются в пользу наиболее уязвимых слоев на селе и в городах (Sud et al., 2015).

Индия была одной из первых среди крупных стран мира, создавшей политические рамки в сфере адаптации к изменениям климата. В 2008 г. был принят Национальный план дей-

ствий в области климатических изменений¹². Этот стратегический документ состоит из восьми миссий; миссии в области адаптации сфокусированы на устойчивом сельском хозяйстве и водопользовании, управлении ресурсами всеобщего достояния, включая горные и прибрежные районы. В 2014 г. создан Национальный фонд адаптации к изменению климата с первоначальным бюджетом 53 млн долл. США. В 2015 г. государственные расходы на адаптацию к изменениям климата превысили 2.6% ВВП¹³, особое внимание уделялось сельскому хозяйству, водным ресурсам, здравоохранению и санитарии, лесному хозяйству, инфраструктуре прибрежной зоны и защите от экстремальных явлений.

Большое число мер принято на секторальном уровне. В аграрной сфере и продовольственной безопасности это “Национальная инициатива в области устойчивого к климатическим изменениям сельского хозяйства” (NICRA), инициатива “Умное сельское хозяйство”. Так, инициатива NICRA, запущенная в 2011 г., успешно реализуется на уровне фермерских хозяйств, внедряющих устойчивые к изменению климата агротехнологии, улучшенные сорта, диверсификацию культур. Создана Национальная схема сельскохозяйственного страхования (*National Agricultural Insurance Scheme*), охватывающая 25 млн фермеров¹⁴ — крупнейшая в мире система страхования рисков от неурожаев и климатических бедствий.

На уровне штатов и союзных территорий с 2009 г. климатические факторы учитываются в практике управления, программах, нормативных актах и инвестиционных решениях (Kumar et al., 2014). Штаты играют ключевую роль в планировании и осуществлении адаптационных мер, так как наиболее уязвимые сектора находятся в их ведении, включая сельское и водное хозяйство. В 2023 г. 34 штата и союзные территории (из 36-ти) реализуют свои проекты по адаптации к климатическим изменениям.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Один из важных основополагающих принципов адаптационных мероприятий в развивающихся странах заключается в реализации подхода “сопутствующих выгод” адаптации

¹² Climate Change Programme. Department of Science and Technology. <https://dst.gov.in/climate-change-programme> (дата обращения 15.09.2023).

¹³ <http://yojana.gov.in/adaptation-and-mitigation.asp> (дата обращения 25.04.2023).

¹⁴ National agricultural insurance scheme in India. World Bank. <https://documents.worldbank.org/pt/publication/documents-reports/documentdetail/471931468179672837/national-agricultural-insurance-scheme-in-india-making-insurance-markets-work-for-farmers>.

(Ford et al., 2015). В полной мере он проявляется в Индии, где цели социально-экономического развития согласуются с климатической повесткой и тем самым достигается защита наиболее уязвимых слоев населения на основе инклюзивной стратегии. Индия ведет борьбу с изменением климата и его последствиями, одновременно решая комплекс сложнейших социально-экономических задач — преодоления бедности, обеспечения продовольственной безопасности, а также доступа к здравоохранению и образованию, решения энергетической проблемы (Сдасюк, 2021). Такой подход оказался более оправданным, чем адаптация и развитие по отдельности, за счет привлечения разнообразных институциональных структур и возможности привлечения больших финансовых потоков чем те, которые были бы доступны непосредственно для адаптации. Таким образом, на примере Индии подтверждается заключение МГЭИК (Climate ..., 2022) о том, что интегрированные решения, направленные на устранение социального неравенства и ответные меры с учетом климатических рисков, охватывающие разные сектора, повышают адаптационный потенциал населения.

Несмотря на определенные успехи, эксперты оценивают деятельность на уровне штатов противоречиво, полагая, что их планы и программы, хотя и создают потенциал для интеграции механизмов адаптации в развитие, не привели к активным действиям на местах (Bahadur et al., 2017). Сохраняются трудности, обусловленные отсутствием специального механизма финансирования Планов действий на уровне штатов. Эта проблема вытекает из финансовой децентрализации, которая сочеталась в Индии с институциональной децентрализацией из-за ликвидации Плановой комиссии в 2015 г. Функции планирования сейчас частично возложены на Национальный институт преобразования Индии (NITI Aayog)¹⁵, деятельность которого фактически не учитывает климатические риски.

Нередко звучит мнение, что адаптация должна быть приоритетом климатической политики Индии. С учетом роста численности населения (в середине 2023 г. страна вышла первое место в мире по численности населения — 1,428 млрд чел.¹⁶) Индия должна уделять первоочередное внимание повышению адаптивных способно-

стей населения¹⁷. Деятельность же по смягчению воздействий должна уйти на второй план, при этом на сокращении эмиссий должны сконцентрироваться “богатые страны” ОЭСР. Действительно, по мере того как Индия будет адаптироваться к климатическим изменениям и решать социальные задачи экономического роста и преодоления бедности ей потребуется больше электроэнергии и природных ресурсов, что приведет к увеличению выбросов парниковых газов. Приоритетность адаптации вкупе с социально-экономическим развитием обусловлена справедливым распределением бремени за дестабилизацию мировой климатической ситуации: вклад Индии в глобальные выбросы CO₂ составляет менее 7% (2021), по эмиссиям на человека она занимает 128-е место в мире, а потребление на душу населения — треть от среднемирового показателя. В рамках Конференций сторон РКИК ООН Индия регулярно призывает развитые страны к более амбициозным обязательствам по сокращению выбросов парниковых газов, предоставлению финансовой помощи и технологий. Тем не менее климатическая повестка Индии, как и других развивающихся стран, может оказаться в зависимости от успешности мер развитых стран по смягчению воздействий на изменения климата и их экономической помощи (Кокорин и др., 2006).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлено, что в условиях Индии планирование и реализация адаптации строятся в основном “сверху вниз”, чему способствуют традиции стратегического планирования на национальном уровне и уровне штатов. При этом отмечаются трудности реализации мер на местах из-за нехватки государственной и донорской помощи, отсутствия инклюзивных институтов и планирования на локальном уровне.

Сочетание комплекса мер по адаптации с деятельностью по смягчению воздействий свидетельствуют о движении Индии к развитию, устойчивому к изменению климата. При этом делается акцент на первой составляющей — именно адаптации. Одновременно с этим на национальном уровне большое значение придается обеспечению средств существования беднейших слоев населения, поэтому государственные планы действий в сфере изменения климата вполне можно рассматривать как синонимы “планирования устойчивого развития”.

¹⁵ Пятилетние планы в Индии больше не разрабатываются. Комиссия NITI Aayog (National Institution for Transforming India) отвечает за стратегическое планирование, в рамках которого предусмотрены 15-летние перспективные программы, семилетние стратегические планы и трехлетние планы действий.

¹⁶ В ООН заявили, что население Индии превысит население Китая к середине 2023 года. ТАСС. 19.04.2023. <https://tass.ru/obschestvo/17556203> (дата обращения 15.10.2023).

¹⁷ <https://www.outlookindia.com/national/-climate-change-adaptation-should-be-india-s-priority-not-mitigation-news-224602> (дата обращения 23.05.2023).

Адаптационные меры носят преимущественно упреждающий и проактивный характер, о чем свидетельствует разработка или пересмотр секторальных политик и программ, создание системы страхования от климатических рисков, а также органов управления для реагирования на возникающие климатические вызовы. В то же время децентрализация политики в сфере адаптации в пользу штатов дает возможность более динамично решать вопросы по ответному реагированию (особенно в сфере водного хозяйства).

Однако, как показывает пример Индии, даже при значительном внимании государства к вопросам адаптации к климатическим изменениям, достижениям в институционализации климатической политики, разработке стратегий и планов действий на разных уровнях, имеются серьезные трудности в практических механизмах реализации адаптации. Они связаны с непониманием, как интегрировать существующие оценки уязвимости в планы и программы социально-экономического развития и какие адаптационные вмешательства лучше всего подойдут для борьбы с этими воздействиями в конкретных секторах и на местном уровне.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках темы Госзадания № 121040100322-8 географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ имени М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”.

FUNDING

The study was prepared within the framework of the State Assignment no. 121040100322-8 of the Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University and the Program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Lomonosov Moscow State University “The future of the planet and global environmental change.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кокорин А.О., Кураев С.Н., Минин А.А., Стеценко А.В. Проблемы адаптации к климатическим изменениям // Природопользование и устойчивое развитие. Мировые экосистемы и проблемы России. Серия: “Устойчивое развитие: Проблемы и перспективы”. М.: Товарищество научных издателей КМК, 2006. Вып. 3. С. 135–145.
- Мохов И.И. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // Вестн. РАН. 2022. Т. 92. № 1. С. 3–14. <https://doi.org/10.31857/S0869587322010066>
- Сдаюк Г.В. Новая Индия. География развития: достижения, проблемы, перспективы. М.: Канон+РООИ “Реабилитация”, 2021. 520 с.
- Asia / Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge, NY, USA: Cambridge Univ. Press, 2022. P. 1457–1579.
- Assessment of Climate Change over the Indian Region. A Report of the Ministry of Earth Sciences, Government of India. Springer Open. 2020. 227 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-4327-2>
- Bahadur A., Gogoi E., Rumbaitis del Rio C. Mainstreaming Adaptation to Climate Change within Governance Systems in South Asia. ACT. Action on climate today. Oxford Policy Management. October, 2017. 36 p.
- Bahinipatia C.S., Guptab A.K. Methodological challenges in assessing loss and damage from climate-related extreme events and slow onset disasters: Evidence from India // Int. J. of Disaster Risk Reduction. 2022. Vol. 83. Art. 10341821.
- Benzie M., Carter T.R., Carlsen H., Taylor R. Cross-border climate change impacts: implications for the European Union // Reg. Environmental Change. 2019. Vol. 19. P. 763–776.
- Burck J., Uhlich T., Höhne N., Nascimento L., Bals C. The Climate Change Performance Index 2023: Results. Bonn, 2022. 32 p.
- Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Third Assessment Report of the IPCC. Chapter 18: Adaptation to Climate Change in the Context of Sustainable Development and Equity. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001. P. 877–912.
- Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of WG II to the Fifth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2014a. P. 833–868.
- Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects: Asia. Contribution of WG II to the Fifth Assessment Report of the IPCC. Cambridge, NY, USA: Cambridge Univ. Press, 2014b. P. 1327–1370.
- Climate Change 2014. Synthesis Report. Contribution of Working groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of IPCC. Geneva, 2014b. 151 p.
- Climate Change 2022. Impacts, adaptation and Vulnerability. Summary for policymakers. IPCC WGII Sixth Assessment Report. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2022. P. 37–118. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.002>
- Climate Change and Land. IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. 2019. 684 p.
- Das M. Vulnerability to Food Insecurity: A Decomposition Exercise for Rural India using the Expected Utility Approach // Soc. Indic. Res. 2021. Vol. 156. P. 167–199. <https://doi.org/10.1007/s11205-021-02625-7>

- Delaney J.T., Bouska K.L., Eash J.D., Heglund P.J., Allstadt A.J. Mapping climate change vulnerability of aquatic-riparian ecosystems using decision-relevant indicators // *Ecological Indicators*. 2021. Vol. 125. Art. 107581.
https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107581
- Dinshaw A., Ginoya N., Preethan P., Appadurai N., Gutierrez M. Mainstreaming Adaptation in Action: Case Studies from Two States in India. Working Paper. Washington, DC: World Resources Institute, 2018. 26 p.
- Ford J.D., Berrang-Ford L., Bunce A., McKay C., Irwin M., Pearce T. The status of climate change adaptation in Africa and Asia // *Reg. Environ. Change*. 2015. Vol. 15. P. 801–814.
- Gosain A.K., Rao S. Climate Impacts and Vulnerability Assessment of the Water Sector in the State of Punjab. Executive Summary. New Delhi, 2018. 25 p.
- India Multidimensional Poverty Index. A Progress Review. New Delhi: NITY Ayog., 2023. 410 p.
- India Second National Communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Ministry of Environment and Forests, Government of India. New Delhi, 2012. 340 p.
- IPCC. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the IPCC. Cambridge, NY: Cambridge Univ. Press, 2012. 582 p.
- Kumar S.N., Aggarwal P.K., Swaroopa R.D.N., Saxena R., Chauhan N., Jain S. Vulnerability of wheat production to climate change in India // *Clim. Res.* 2014. Vol. 59. № 3. P. 173–187.
https://doi.org/10.3354/cr01212
- Lebling K., Ge M., Levin K., Waite R., Friedrich J., Elliott C., Chan C., Ross K., Stolle F., Harris N. State of Climate action. Assessing Progress toward 2030 and 2050. World Resources Institute. 2020. 128 p.
- Moss R.H., Brenkert A.L., Malone E.L. Vulnerability to Climate Change: A Quantitative Approach. Technical Report by the Pacific Northwest National Laboratory for the Department of Energy, Oak Ridge, and U.S. Department of Commerce. Springfield, 2001. 70 p.
- National climate change vulnerability and risk assessments in Europe. EEA Report. 2018. № 1. 84 p.
- Odisha State Action Plan on Climate Change (for the period 2018–2023). Government of Odisha, Forest and Environment Department. 2018. 217 p.
- Papathoma-Köhle M., Schlögl M., Fuchs S. Vulnerability indicators for natural hazards: an innovative selection and weighting approach // *Sci. Rep.* 2019. Vol. 9. Art. 15026.
https://doi.org/10.1038/s41598-019-50257-2
- Patra J. Review of current and planned adaptation action in India // CARIIA Working Paper 10. Ottawa, London: International Development Research Centre, 2016. 80 p.
- Patt A.G., Tadross M., Nussbaumer P., Brundrit G. Estimating least-developed countries' vulnerability to climate-related extreme events over the next 50 years // *Social Sciences*. 2010. Vol. 107. № 4. P. 1333–1337.
https://doi.org/10.1073/pnas.0910253107
- Pradhan A., Chan C., Roul P.K., Halbrendt J., Sipes B. Potential of conservation agriculture for climate change adaptation and food security under rainfed uplands of India: A transdisciplinary approach // *Agricultural Systems*. 2018. Vol. 163. P. 27–35.
- Sharma T., Vittal H., Karmakar S., Ghosh S. Increasing agricultural risk to hydro-climatic extremes in India // *Environ. Res. Lett.* 2020. Vol. 15. Art. 034010.
- Simpson N.P., Williams P.A., Mach K.J., et al. Adaptation to compound climate risks: A systematic global stocktake // *iScience*. 2023. Vol. 26. № 2. Art. 105926.
- Singh P.K., Chudasama H. Pathways for climate change adaptations in arid and semi-arid regions // *J. of Cleaner Production*. 2021. Vol. 284. Art. 124744.
- Singh C., Madhavan M., Arvind J., Bazaz A. Climate change adaptation in Indian cities: A review of existing actions and spaces for triple wins // *Urban Climate*. 2021a. Vol. 36. Art. 100783.
- Singh C., Rahman A., Srinivas A., Bazaz A. Risks and responses in rural India: Implications for local climate change adaptation action // *Climate Risk Management*. 2021b. Vol. 21. P. 52–68.
- Sud R., Mishra A., Varma N., Bhadwal S. Adaptation policy and practice in densely populated glacier-fed river basins of South Asia: a systematic review // *Reg. Environ. Change*. 2015. Vol. 15. P. 825–836.
- The State of Food Security and Nutrition in the World. 2023 FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. Rome, 2023. 316 p.
- World Development Report 2010: Development in a Changing Climate – Concept Note. Washington: IBRD, WB, 2010. 43 p.

Adaptation to Climate Change: General, Sectoral and Regional Measures (the Case of India)

N. N. Alekseeva^{a,*} and A. I. Bancheva^{a,**}

^aLomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*e-mail: nalex01@mail.ru

**e-mail: ban-sai@mail.ru

Adaptation to climate change is the most important part of modern climate policy. It is particularly relevant for developing countries, which are most vulnerable to the impacts of climate change and have limited capacity to adapt to these impacts. The purpose of this article is to review the achievements and challenges

of adaptation to climate change using the IPCC methodology, taking India, one of the world's largest developing countries, as an example. The country is increasingly confronted with the impacts of global climate change and is responding proactively. Based on material from the IPCC, developments from other international organisations and Russian studies, the main methodological approaches to assessing adaptation to climate change and their evolution are considered. The main sources for India are government documents, national communications to the IPCC, state programmes and action plans on adaptation, scientific publications, media reports and statistics. On this basis, the following issues are characterised: (1) the impacts of observed and projected climate change on India's population and natural and economic systems; (2) the vulnerability of life-supporting systems and sectors, with a focus on agriculture; (3) the main types of adaptation, including structural, social and institutional. It shows that the system for responding to the emerging challenges of climate change is being built from the top down, through strategic planning at the national and state levels. The country is implementing one of the basic principles of adaptation – the 'co-benefits' approach, where socioeconomic development goals are aligned with the climate agenda, thereby protecting the most vulnerable. Adaptation is considered a priority of climate policy in India, given the country's lower per capita contribution to global warming than economically developed countries.

Keywords: vulnerability, climate policy, adaptation measures, agriculture, socioeconomic development, India

REFERENCES

- Adaptation Needs and Options. In Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects.* Contribution of WG II to the Fifth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: CUP, 2014, pp. 833–868.
- Adaptation to Climate Change in the Context of Sustainable Development and Equity. In Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability.* Working Group II Contribution to the Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge: CUP, 2001, pp. 877–912.
- Asia. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects.* Contribution of WG II to the Fifth Assessment Report of the IPCC. Cambridge, New York: CUP, 2014, pp. 1327–1370.
- Asia. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability.* Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge, New York: CUP, 2022, pp. 1457–1579.
- Assessment of Climate Change over the Indian Region.* A Report of the Ministry of Earth Sciences, Government of India. Springer Open, 2020. 227 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-4327-2>
- Bahadur A., Gogoi E., Rumbaitis del Rio C. *Mainstreaming Adaptation to Climate Change within Governance Systems in South Asia.* ACT. Action on climate today. Oxford Policy Management, 2017. 36 p.
- Bahinipatia C.S., Guptab A.K. Methodological challenges in assessing loss and damage from climate-related extreme events and slow onset disasters: Evidence from India. *Int. J. Disaster Risk Sci.*, 2022, vol. 83, art. 10341821.
- Benzie M., Carter T.R., Carlsen H., Taylor R. Cross-border climate change impacts: implications for the European Union. *Reg. Environ. Change*, 2019, vol. 19, pp. 763–776.
- Burck J., Uhlich T., Höhne N., Nascimento L., Bals C. *The Climate Change Performance Index 2023: Results.* Bonn, 2022. 32 p.
- Das M. Vulnerability to food insecurity: A decomposition exercise for rural India using the expected utility approach. *Soc. Indic. Res.*, 2021, vol. 156, pp. 167–199. <https://doi.org/10.1007/s11205-021-02625-7>
- Delaney J.T., Bouska K.L., Eash J.D., Heglund P. J., Allstadt A.J. Mapping climate change vulnerability of aquatic-riparian ecosystems using decision-relevant indicators. *Ecol. Indic.*, 2021, vol. 125, art. 107581. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107581>
- Dinshaw A., Ginoya N., Preethan P., Appadurai N., Gutierrez M. *Mainstreaming Adaptation in Action: Case Studies from Two States in India.* Working Paper. Washington: World Resources Institute, 2018. 26 p.
- Ford J.D., Berrang-Ford L., Bunce A., McKay C., Irwin M., Pearce T. The status of climate change adaptation in Africa and Asia. *Reg. Environ. Change*, 2015, vol. 15, pp. 801–814. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0648-2>
- Gosain A.K., Rao S. *Climate Impacts and Vulnerability Assessment of the Water Sector in the State of Punjab.* Executive Summary. New Delhi, 2018. 25 p.
- India Multidimensional Poverty Index. A Progress Review.* New Delhi: NITY Ayog., 2023. 410 p.
- India Second National Communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change.* Ministry of Environment and Forests, Government of India. New Delhi, 2012. 340 p.
- IPCC. *Climate Change 2014. Synthesis Report.* Contribution of Working groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of IPCC. Geneva, 2014b. 151 p.
- IPCC. *Climate Change and Land.* IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems, 2019. 684 p.

- IPCC. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. A Special Report of Working Groups I and II of the IPCC. Cambridge, New York: CUP, 2012. 582 p.
- Kokorin A.O., Kuraev S.N., Minin A.A., Stetsenko A.V. Challenges in climate change adaptation. In *Prirodopol'zovanie i ustoichivoe razvitiye. Miroye ekosistemy i problemy Rossii* [Nature Management and Sustainable Development. Global Ecosystems and Russia's Challenges]. Moscow: KMK Publ., 2006, pp. 135–145. (In Russ.).
- Kumar S.N., Aggarwal P.K., Swaroopa R.D.N., Saxena R., Chauhan N., Jain S. Vulnerability of wheat production to climate change in India. *Clim. Res.*, 2014, vol. 59, no. 3, pp. 173–187.
<https://doi.org/10.3354/cr01212>
- Lebling K., Ge M., Levin K., Waite R., Friedrich J., Elliott C., Chan C., Ross K., Stolle F., Harris N. *State of Climate action. Assessing Progress toward 2030 and 2050*. World Resources Institute, 2020. 128 p.
- Mokhov I.I. Climate change: Causes, risks, consequences, and problems of adaptation and regulation. *Her. Russ. Acad. Sci.*, 2022, vol. 92, no. 1, pp. 1–11.
<https://doi.org/10.1134/S101933162201004X>
- Moss R.H., Brenkert A.L., Malone E.L. *Vulnerability to Climate Change: A Quantitative Approach*. Technical Report by the Pacific Northwest National Laboratory for the Department of Energy, Oak Ridge, and U.S. Department of Commerce. Springfield, 2001. 70 p.
- National climate change vulnerability and risk assessments in Europe*. EEA Report, no. 1, 2018. 84 p.
- Odisha State Action Plan on Climate Change* (for the period 2018–2023). Government of Odisha, Forest and Environment Department, 2018. 217 p.
- Papathoma-Köhle M., Schlögl M., Fuchs S. Vulnerability indicators for natural hazards: an innovative selection and weighting approach. *Sci. Rep.*, 2019, vol. 9, art. 15026.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-50257-2>
- Patra J. *Review of current and planned adaptation action in India*. CARIIA Working Paper 10. Ottawa, London: International Development Research Centre, 2016. 80 p.
- Patt A.G., Tadross M., Nussbaumer P., Brundrit G. Estimating least-developed countries' vulnerability to climate-related extreme events over the next 50 years. *Soc. Sci.*, 2010, vol. 107, no. 4, pp. 1333–1337.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0910253107>
- Pradhan A., Chan C., Roul P. K., Halbrendt J., Sipes B. Potential of conservation agriculture for climate change adaptation and food security under rainfed uplands of India: A transdisciplinary approach. *Agric. Syst.*, 2018, vol. 163, pp. 27–35.
- Sdasyuk G.V. *Novaya Indiya. Geografiya razvitiya: dostizheniya, problemy, perspektivy* [New India. Development Geography: Achievements, Problems, Perspective]. Moscow: Kanon+ Publ., 2021. 520 p.
- Sharma T., Vittal H., Karmakar S., Ghosh S. Increasing agricultural risk to hydro-climatic extremes in India. *Environ. Res. Lett.*, 2020, vol. 15, art. 034010.
- Simpson N.P., Williams P.A., Mach K.J., et al. Adaptation to compound climate risks: A systematic global stocktake. *iScience*, 2023, vol. 26, no. 2, art. 105926.
- Singh P.K., Chudasama H. Pathways for climate change adaptations in arid and semi-arid regions. *J. Clean. Prod.*, 2021, vol. 284, art. 124744.
- Singh C., Madhavan M., Arvind J., Bazaz A. Climate change adaptation in Indian cities: A review of existing actions and spaces for triple wins. *Urban Clim.*, 2021, vol. 36, art. 100783.
- Singh C., Rahman A., Srinivas A., Bazaz A. Risks and responses in rural India: Implications for local climate change adaptation action. *Clim. Risk Manag.*, 2021, vol. 21, pp. 52–68.
- Sud R., Mishra A., Varma N., Bhadwal S. Adaptation policy and practice in densely populated glacier-fed river basins of South Asia: a systematic review. *Reg. Environ. Change*, 2015, vol. 15, pp. 825–836.
- Summary for policymakers. In *Climate Change 2022. Impacts, adaptation and Vulnerability*. IPCC WGII Sixth Assessment Report. Cambridge: CUP, 2022, pp. 37–118.
<https://doi.org/10.1017/9781009325844.002>
- The State of Food Security and Nutrition in the World. 2023*. Rome: FAO, IFAD, UNICEF, WFP, WHO, 2023. 316 p.
- World Development Report 2010: Development in a Changing Climate – Concept Note*. Washington: IBRD, WB, 2010. 43 p.

АДАПТАЦИЯ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА: ОПЫТ СТРАН И РЕГИОНОВ

УДК 551.583:914/919

ОПЫТ АДАПТАЦИИ ШТАТА КАЛИФОРНИЯ (США) К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА

© 2024 г. М. Р. Торгашина^{1, *}, А. А. Медведков^{1, 2, **}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: masha@torgashin.ru

**e-mail: a-medvedkov@bk.ru

Поступила в редакцию 18.10.2023 г.

После доработки 20.03.2024 г.

Принята к публикации 16.05.2024 г.

В рамках обсуждения региональной стратегии климатической адаптации рассмотрены прогнозируемые климатические изменения и их последствия для природных ресурсов, социальной сферы и климатически зависимых отраслей хозяйства штата Калифорния (США). В данном контексте проанализированы отраслевые адаптационные стратегии (повышение эффективности в лесном и сельском хозяйстве, управление водными ресурсами, сохранение биоразнообразия, развитие системы здравоохранения, повышение устойчивости энергетических и транспортных систем, управление чрезвычайными ситуациями и рисками в прибрежной зоне). Для каждой из указанных сфер рассмотрены важнейшие вызовы, обусловленные потеплением климата, а также обозначены основные цели, достижение которых способно смягчить последствия глобальных изменений климата. В качестве приоритетных видов адаптационных мероприятий определены: укрепление береговой линии и защита береговой инфраструктуры в прибрежной зоне; осуществление рубок ухода, удаление сухостоя и контролируемые пожары в горных районах северной и центральной частей штата; введение ограничений на водопользование и внедрение водосберегающих технологий в сельскохозяйственных и городских районах центральной и южной частей штата; совершенствование инфраструктуры, защищающей от наводнений вблизи крупных рек; развитие зеленых насаждений и совершенствование водной и энергетической инфраструктуры на урбанизированных землях; внедрение свето- и теплоотражающих строительных материалов в городах. По итогам проведенного анализа выявлены преимущества и недостатки климатической политики Калифорнии. К преимуществам отнесены: развитая институциональная система управления рисками, отлаженный характер взаимодействия между ведомствами при разработке адаптационных программ, качественная система сбора климатической информации, организации и проведения мониторинговых исследований, эффективно выстроенное сотрудничество между наукой и практикой. К недостаткам причислены: декларативный характер отраслевых стратегий с ведомственными рекомендациями, существующими в отрыве от местной специфики, недостаточный учет территориальных особенностей (пространственных неоднородностей географической среды) и фактический отказ от использования ландшафтного подхода в форме физико-географического/экосистемного районирования при разработке адаптационных мероприятий.

Ключевые слова: изменения окружающей среды, климатическая политика, адаптационные стратегии, стратегическое планирование, адаптационные мероприятия, климатическая информация, зарубежный опыт, Тихоокеанские штаты США

DOI: 10.31857/S2587556624030136 EDN: SNMGKK

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные изменения климата и их последствия — одна из важнейших проблем, с которыми сталкивается наша цивилизация в настоящий момент. Климатически обусловленные вызовы требуют разработки соответствующей системы адаптационных мероприятий, направленных

на предотвращение, преодоление или выгодное использование текущих и прогнозируемых изменений и их последствий (МГЭИК ..., 2007). В начале XXI в. эта тема превратилась в одну из важнейших проблем не только глобальной экологии, но мировой экономики и политики (Медведков, 2020). Это обусловлено тем, что принимаемые решения в сфере климатической

проблематики имеют ощутимые следствия стратегического характера (изменение энергетического баланса стран и мировых рынков, влияние на глобальные модели торговли, создание новой экономики климатического действия и др.) (Леонард и др., 2021).

Адаптация представляет собой направление в климатической политике, ориентированное на разработку и принятие мероприятий — ответных действий на последствия происходящих изменений. Эффекты этих изменений уже сейчас приводят не только к значительным финансовым убыткам, но и человеческим жертвам (Никуличев, 2016; Climate Vulnerability ..., 2012), осложнению общественно-политической ситуации в мире, в частности и в США (Лыжин, 2021), поэтому вопрос адаптации является чрезвычайно актуальным. Адаптация к изменениям климата представляет собой набор самых разных программ: от улучшения инфраструктуры водоснабжения и защиты от наводнений до новых форм страхования от катастрофических бедствий (Farber, 2011). Адаптационные мероприятия направлены на приспособление природно-хозяйственных систем к вызовам с целью управления угрозами и их смягчения. В этой связи представляется, что способность к адаптации определяется прежде всего не степенью уязвимости территорий к климатическим изменениям, а уровнем социально-экономического развития стран и регионов. Лидерами в этой сфере являются экономически развитые государства, прежде всего — США и страны ЕС.

В США существует Закон об изучении глобальных изменений от 1990 г.,¹ способствующий проведению исследований по проблеме глобального потепления и его последствий. В рамках действия Закона предусмотрено предоставление Конгрессу и Президенту не реже одного раза в четыре года специального доклада о природно-ресурсных, медико-экологических, социальных и эколого-экономических последствиях глобальных изменений.

В сфере климатической политики не только на страновом, но и на мировом уровне выделяется Калифорния — самый населенный и экономически развитый штат страны, к тому же характеризующийся высокой уязвимостью к природно-климатическим изменениям, учитывая его природные особенности (засушливый климат, благоприятствующий появлению тепловых стрессов, возникновению и распространению лесных пожаров, возрастающему дефициту водных ресурсов и др. неблагоприятных

явлений). Повышенная уязвимость территории и населения к изменениям климата в условиях высокой эффективности планирования, обусловленной соответствующим уровнем экономического развития, стимулирует качественную проработку мер адаптации (Порфирьев и др., 2023). Имеется еще одно важное обстоятельство, делающее Калифорнию интересным примером для анализа. Оно заключается в особенностях электорального поведения населения и ведущей роли Демократической партии США в управлении штатом, представители, которой уделяют особое внимание проблеме климатических изменений, активно финансируя реализацию адаптационных мероприятий. В этой связи стоит отметить, что в Калифорнии принят Закон о решениях в области глобального потепления от 2006 г.,² действуют и соответствующие указы, требующие разработки специализированных планов и конкретных программ, направленных на развитие зеленых технологий и политики адаптации к изменениям климата, представляющие интерес для анализа и оценки передового опыта. Этому и посвящена данная статья.

ПРОГНОЗИРУЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА КАК ФАКТОР АДАПТАЦИИ

Моделирование климатических изменений

Проблеме изменения климата в Калифорнии уделяется много внимания со стороны как ученых, так и лиц, принимающих решения. Так, по инициативе Правительства Калифорнии с 2006 г. регулярно проводится оценка изменений климата и их последствий, в рамках которой анализируются актуальные климатические тренды, исследуется уязвимость территории штата к изменениям климата на локальном и региональном уровнях. Полученные результаты позволяют принимать конкретные научно обоснованные меры по адаптации к климатическим вызовам. Одна из последних на данный момент — Четвертая оценка изменений климата (California's Fourth Climate Change Assessment) была опубликована в августе 2018 г. При прогнозировании климатических изменений авторы этого документа опирались на 10 моделей GCM (Global Climate Model), отобранные как наиболее репрезентативные для территории Калифорнии, а также на сценарии RCP4.5 и RCP8.5 (Representative Concentration Pathways), представленные в Пятом докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC)³. Сценарий RCP4.5 является одним

¹ Global Change Research Act of 1990. Pub. L. № 101–606, 104 Stat. 3096–3104, November 16, 1990. <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/STATUTE-104/pdf/STATUTE-104-Pg3096.pdf> (дата обращения 10.09.2023).

² California Global Warming Solutions Act of 2006. http://www.leginfo.ca.gov/pub/05-06/bill/asm/ab_0001-0050/ab_32_bill_20060927_chaptered.pdf (дата обращения 10.09.2023).

³ IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution

из “умеренных”, за основу которого был принят вариант, при котором выбросы парниковых газов будут расти до середины XXI в., а затем — снижаться, в результате чего концентрация CO₂ к 2100 г. составит около 550 ppm. Сценарий RCP8.5 представляет “экстремальный” вариант, при котором выбросы парниковых газов продолжат расти в течение всего XXI столетия и к 2100 г. атмосферная концентрация CO₂ превысит 900 ppm (это в три раза больше уровня доиндустриальной эпохи).

Изменения температуры воздуха и режима выпадения атмосферных осадков

Согласно данным, приведенным в Четвертой оценке изменения климата (California's Fourth Climate Change Assessment), среднегодовая температура на большей части территории штата в период с 1986 по 2016 г. (по сравнению с периодом с 1901 по 1960 г.) выросла более чем на 0.5°C, а местами, преимущественно в Южной Калифорнии, она увеличилась более чем на 1°C. Все климатические модели прогнозируют дальнейшее увеличение температуры воздуха в течение текущего столетия. В табл. 1 приводится прогноз по увеличению среднегодовой суточной температуры до максимальных значений на основании “умеренного” и “экстремального” сценариев.

Для Калифорнии ввиду естественных причин характерна высокая изменчивость годовой суммы атмосферных осадков, основная часть которых приходится на зимний период. Многолетняя изменчивость годовой суммы осадков может способствовать появлению экстремальных засух (как это было в период с 2012 по 2016 г.), а также очень влажных лет, которые могут сопровождаться наводнениями (как это было в 2017 г.). Указанные особенности климатических условий усложняют прогнозирование режима выпадения атмосферных осадков и характера его динамики. Большинство климатических моделей не предсказывают устойчиво-выраженных трендов уменьшения или увеличения годовой суммы осадков на всей территории штата Калифорнии, однако прогнозируется нарастание пространственных различий. Так, ожидается, что в XXI в. климат в северной части штата станет более влажным (причем, изменения более выражены в моделях, созданных на основе сценария RCP8.5 по сравнению с RCP4.5), в то время как на юге Калифорнии режим погоды станет более нестабильным, что будет проявляться как в увеличении, так и в сокращении сумм годовых осадков (Pierce et al., 2018). Прогнозируется (Berg and

Hall, 2015; Pierce et al., 2018; Swain et al., 2018), что выпадение осадков будет иметь более редкий, но в то же время — экстремальный характер. Данное обстоятельство увеличивает вероятность разрушительных наводнений. Еще одним важным аспектом изменения режима атмосферных осадков является уменьшение их количества в твердом виде (Knowles et al., 2006) и, как следствие, снижение мощности накапливающегося к весне в горах Калифорнии снежного покрова (Barnett et al., 2008; Mote et al., 2018; Pierce et al., 2008; Pierce and Cayan, 2013), играющего важную роль в питании калифорнийских рек. Весеннее таяние снежного покрова в горах Сьерра-Невада составляет около 70% используемых водных ресурсов в бассейне р. Колорадо, которая, в свою очередь, обеспечивает 55% водоснабжения Южной Калифорнии (California's ..., 2018). Климатические модели показывают, что количество накопленного к весне снега в горных районах центральной и северной частях Калифорнии значительно сократится (Pierce et al., 2018). При этом в условиях прогнозируемого в зимнее время увеличения осадков в жидком виде ожидается рост числа наводнений (Swain et al., 2018).

Прогноз ресурсно-экологических и социально-экономических изменений

В условиях прогнозируемого роста температуры воздуха увеличивается дефицит насыщения воздуха влагой, вследствие чего растет испарение с поверхности почвы. Эти тенденции будут способствовать аридизации почвенно-экологических условий (в том числе и при увеличении количества осадков). Климатические прогнозы показывают (Pierce et al., 2014; Swain et al., 2018), что летняя засуха в Калифорнии может затянуться из-за более раннего высыхания почвы в весеннее время. Усиление влияния этого фактора приведет к угнетению древесной растительности и увеличению потенциала пожароопасности в связи с ослаблением гомеостатической функции древостоя (Медведков, Котова, 2020).

Выполнено сравнение фактических данных, свидетельствующих о росте дефицита насыщения воздуха влагой, с информацией, полученной на основе анализа климатических моделей по сценарию RCP8.5 (Williams et al., 2019). Результаты выполненного анализа позволяют утверждать, что увеличение в последние десятилетия площади летних лесных пожаров в Северной Калифорнии и в горах Сьерра-Невада напрямую связано с изменениями климата (Williams et al., 2019). По прогнозам ожидается, что эта тенденция сохранится.

Прогнозируется, что многие виды растений и животных в результате изменения температурно-влажностного режима столкнутся с физио-

of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland. 151 p. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf (дата обращения 10.09.2023).

Таблица 1. Прогнозируемые изменения максимальной среднегодовой температуры воздуха в Калифорнии

Сценарий	2006–2039 гг.	2040–2069 гг.	2070–2100 гг.
RCP4.5	+1.4°C (2.5°F)	+2.4°C (4.4°F)	+3.1°C (5.6°F)
RCP8.5	+1.5°C (2.7°F)	+3.2°C (5.8°F)	+4.8°C (8.8°F)

Источник: Statewide Summary Report. California's Fourth Climate Change Assessment, 2018.

логическим стрессом. Это может привести как к сокращению популяций этих видов, так и к изменению ареалов растительных сообществ и отдельных видов растений (Statewide ..., 2018). Так, было проведено исследование (Torne et al., 2017), показавшее, что в рамках сценария RCP4.5 — от 21 до 28%, а в рамках RCP8.5 — от 45 до 56% естественной растительности Калифорнии окажется в климатически переходных условиях (т.е. в обстановках, являющихся граничными для распространения конкретных типов растительности). При этом ожидается, что наиболее уязвимыми окажутся хвойные редколесья в предгорьях Сьерра-Невады, южное побережье штата с характерным чапаралем, пустынные области, а также горные районы, расположенные к северу от залива Сан-Франциско. Наиболее чувствительные к изменениям виды растений и животных могут быть вытеснены более устойчивыми (в том числе чужеродными для местных экосистем). Изменения климата также способствуют распространению патогенов и вредителей (Anderegg et al., 2015), например жука-короеда. Сельскохозяйственной отрасли штата придется столкнуться с убытками, так как многие культивируемые растения, в особенности многолетние (фруктовые деревья и кустарники, миндаль), весьма уязвимы к росту температуры и дефициту влажности воздуха.

Для Калифорнии — штата с крупными прибрежными агломерациями, значительные риски связываются с поднятием уровня моря. Так, уровень моря вдоль побережья центральной и южной Калифорнии за вторую половину XX в. поднялся более чем на 15 см (Statewide ..., 2018). Следует отметить, что в основном это произошло за счет проседания дневной поверхности в результате интенсивного отбора подземных вод. Тем не менее, на этот процесс, имеющий инженерно-геологическое происхождение, накладывается и климатически обусловленное изменение уровня моря. И в этой связи важно, что в XXI в. ожидается дальнейшее повышение уровня Мирового океана (Griggset al., 2017), однако сохраняется неопределенность в предсказании его темпов из-за существующих сложностей в оценке состояния покровных ледников. Прогнозируется, что подъем уровня моря нанесет ущерб прибрежной инфраструктуре городов, усилит береговую эрозию и приведет к интрузии соленых вод в прибрежные водое-

мы и водоносные горизонты гипсометрически низко расположенных территорий (в том числе и сельскохозяйственных). Данные процессы будут способствовать увеличению минерализации поверхностных и грунтовых вод, а также засолению почв (California ..., 2009).

Рост температуры воздуха приведет к увеличению нагрузки на энергетическую инфраструктуру штата, в основном, из-за более частого использования кондиционеров (Statewide ..., 2018). Транспортная инфраструктура будет все больше страдать из-за пожаров и наводнений, а высокие температуры воздуха уже сегодня ухудшают качество дорог. Очевидно, что рост температуры воздуха также приведет к сильной нагрузке на систему здравоохранения, особенно это проявится в периоды с чрезвычайно жаркой погодой, которые могут способствовать появлению инфекционных заболеваний тропического типа (California ..., 2009).

Указанные выше изменения являются ключевыми из прогнозируемых, они не могут не повлиять на жизнь и деятельность населения штата Калифорния, в связи с чем подробно и рассматриваются в стратегиях по климатической адаптации.

Оценка изменений и сбор климатической информации

Информация о текущих климатических изменениях нуждается в постоянном обновлении, поэтому штат разрабатывает планы, в которых представлены приоритеты исследований на ближайшие годы. Примером такого руководящего документа является План исследований в области изменения климата, опубликованный в феврале 2015 г.⁴

Штат также проводит периодические оценки воздействия изменений климата на его территорию и население. На момент публикации данной статьи завершена Четвертая оценка изменения климата (California's Fourth Climate Change Assessment), включающая более 60 докладов (44 доклада о прогнозируемом воздействии на конкретные сектора и потенциальных ответных мерах, 9 региональных докладов и 3 тематиче-

⁴ California Environmental Protection Agency, Climate Change Research Plan for California, 2015. 62 p. <https://research.fit.edu/media/site-specific/researchfit.edu/coast-climate-adaptation-library/united-states/west-coast-amp-hawaix27i/california-statewide/Brown-Rodriquez-2015.-CAT-Research-Plan.pdf> (дата обращения 10.09.2023).

ских доклада по ситуации на территории штата). В рамках данной оценки анализируется уязвимость природно-хозяйственных систем к изменениям климата на локальном и региональном уровнях (в том числе и на уровне всего штата) и обсуждаются возможности для принятия конкретных мер по уменьшению влияния меняющихся условий географической среды. Экспертами проводятся научные исследования по потенциальному воздействию изменений климата на целый ряд секторов: энергетику, водоснабжение, сельское хозяйство, здравоохранение, побережье, транспорт и ресурсы экосистем.

Климатическая информация и данные доступны через веб-сайт Cal-Adapt⁵. Его создание было одной из задач, сформулированных в Калифорнийской стратегии климатической адаптации. На федеральном уровне также ведется каталог исследований в области изменений климата, который ежегодно обновляется. Калифорнийское агентство защиты окружающей среды разработало и отслеживает 36 показателей для оценки тенденций климатических изменений и их воздействия на экосистемы и население штата. В мае 2018 г. был опубликован обновленный отчет по индикаторам изменения климата, в котором сообщается о его последствиях для штата, опираясь на динамику почти четырех десятков анализируемых показателей (Indicators ..., 2018).

СТРАТЕГИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ

На пути к созданию стратегии климатической адаптации

Первым шагом в сфере адаптации к климатическим изменениям стал указ, подписанный губернатором Калифорнии в 2008 г., поручавший правительству штата “разработать стратегию по климатической адаптации”. Роль стратегии заключалась в обобщении наиболее известных научных данных о влиянии изменений климата на территорию и население штата, анализе уязвимости Калифорнии к выявленным воздействиям и выработке решений, которые могут быть реализованы для повышения устойчивости природно-хозяйственных систем к климатическим изменениям. Уже через год, в 2009 г. Калифорнийское агентство природных ресурсов опубликовало Калифорнийскую стратегию климатической адаптации (California Climate Adaptation Strategy), разработанную в сотрудничестве с группой по климатическим действиям (Climate Action Team), в состав которой также входят

представители Департамента продовольствия и сельского хозяйства, Комиссии по энергетике и др. ведомств. Этот документ (California ..., 2009) представляет собой обзор текущей климатической ситуации в штате, анализ прогнозируемых климатических изменений и их воздействий на систему здравоохранения, биоразнообразие и среду обитания, океан и прибрежные ресурсы, водные ресурсы, сельское хозяйство, лесное хозяйство, транспортную и энергетическую инфраструктуру. Для каждой из этих областей стратегия рассматривает угрозы, связанные с ростом температуры воздуха, изменением режима и количества осадков, а также повышением уровня моря. В стратегии обозначен список целей, достижение которых поможет штату адаптироваться к меняющимся климатическим условиям. Калифорнийская стратегия климатической адаптации является базовым документом для дальнейшей работы отраслевых ведомств штата, которые на его основе разрабатывают подробные и узконаправленные планы действий, учитывающие адаптационные цели и задачи конкретных секторов. На данный момент этот документ уже получил два обновления в 2014 и 2018 гг., в каждом из которых отражен прогресс, достигнутый штатом в реализации целей и планов из предыдущей версии, и предложены обновленные цели и задачи в области адаптации. В последней на данный момент версии этого документа от 2018 г. адаптационные меры рассматриваются по 11 направлениям, представляющим отрасли хозяйства, проблемы ресурсопользования и социальную политику (Safeguarding ..., 2018).

Калифорнийское агентство природных ресурсов стремится достичь наибольшей интеграции между работой отраслевых ведомств, поэтому всячески поощряет многонаправленность стратегий и их взаимодополняемость. Отдельная глава в последней версии стратегии посвящена “климатической справедливости”, отражающей современные тенденции в американской социальной политике. Достижение климатической справедливости предполагает поиск наиболее уязвимых сообществ с целью справедливого распределения возможностей и трудностей, связанных с изменениями климата между группами с разной социальной защищенностью.

Планирование адаптации к изменениям климата

Планы по адаптации, разрабатываемые на уровне штата, подчеркивают необходимость планирования на региональном и локальном уровнях с учетом местных природно-хозяйственных особенностей. Калифорнийским агентством по чрезвычайным ситуациям и Калифорнийским агентством природных ресурсов для местных

⁵ Сайт с необходимыми данными для планирования адаптации к изменениям климата. <https://cal-adapt.org> (дата обращения 10.09.2023).

сообществ в 2012 г. было разработано руководство по планированию адаптации, состоящее из четырех частей (рис. 1). Руководство 2012 г. ориентировано на разработку планирования для адаптирующихся сообществ, определение ожидаемых последствий климатических изменений для отдельных отраслей и территорий (на уровне выделенных районов) и подготовку потенциальных адаптационных стратегий, которые местные сообщества могут использовать в соответствии со своими потребностями (California ..., 2012). Таким образом, разработанное руководство представляет собой основу для адаптационного планирования к климатическим изменениям на локальном и региональном уровнях.

В 2020 г. была опубликована обновленная версия руководства по адаптационному планированию (рис. 2), учитывающая произошедшие изменения в калифорнийском законодательстве, а также накопленные к этому времени новые научные сведения. Обновленное руководство (California ..., 2020) также состоит из четырех частей, которые соответствуют разным этапам адаптации. В соответствии с обновленной в 2018 г. версией стратегии климатической адаптации (Safeguarding ..., 2018), принятой на уровне штата, руководство 2020 г. рассматривает адаптацию, применительно к 11 ключевым секторам, включающим: управление чрезвычайными ситуациями, энергетику, землепользование и развитие сообществ, общественное здравоохранение, транспорт, сельское хозяйство, биоразнообразие и среду обитания, лесные земли, океан и побережье, водные объекты и ресурсы, парково-рекреационные зоны и культурные объекты. Также в документе представлен алгоритм адаптации сообществ к климатическим изменениям (рис. 3), необходимость которой законодательно закреплена правительством штата⁶. Разработан пошаговый план адаптации, включающий: информирование населения и определение основных участников процесса, оценку уязвимости⁷ и адаптационного потенциала местных сообществ, подготовку адаптационных стратегий и их приоритезацию, а также дальнейшую реализацию выбранных мероприятий и последующий мониторинг их эффективности с целью их дальнейшей корректировки.

Территориально обусловленные типы адаптационных мероприятий

⁶ California Government Code § 65302(g)(4). https://leginfo.ca.gov/faces/codes_displaySection.xhtml?sectionNum=65302&lawCode=GOV (дата обращения 11.09.2023).

⁷ Уязвимость в рассматриваемом контексте — степень восприимчивости систем к ущербу, вызванному климатическими изменениями.

Штат Калифорния — чрезвычайно дифференцированный регион в природно-хозяйственном отношении (рис. 4), что обусловлено геоморфологической, климатической и ландшафтно-экологической неоднородностью его территории (см. табл. 1). Поэтому вполне логичным представляется выбор природного районирования в качестве основы для систематизации адаптационных мероприятий на территории штата Калифорния.

Из проблем, которые обусловлены изменениями климата, для территории штата наиболее существенны участвовавшие засухи, приводящие к сильным лесным пожарам, а также проблемы водоснабжения, особенно проявляющиеся в южных районах штата. Разнообразие природных условий обуславливает и разные типы климатических рисков, что находит отражение в многообразии адаптационных мероприятий (табл. 2). Так, горные районы с лесной и кустарниковой растительностью (хвойно-широколиственными лесами и горным чапарралем) на севере штата оказываются наиболее уязвимыми к природным пожарам, а южные районы с прибрежными долинами и невысокими горами в условиях высокой урбанизации оказываются наиболее чувствительными к изменению береговой линии, режима и стока рек, а также городского климата. Уязвимость сельскохозяйственных территорий, представленных плоскими низменными равнинами, занятыми агроландшафтами, в основном обусловлена изменениями водного режима рек, а также возрастающей частотой экстремально высоких температур воздуха. Не менее восприимчивы плотно населенные урбанизированные районы прибрежных агломераций Сан-Франциско, Лос-Анджелеса и южного побережья штата Калифорния (Сан-Диего), которым угрожает повышение уровня моря, водный стресс и волны жары. В ответ на важнейшие климатические риски преобладающими адаптационными тенденциями являются (см. рис. 4, табл. 2): укрепление береговой линии и защита инфраструктуры в прибрежных районах; рубки ухода и удаление сухостоя на севере штата и в пределах горного хребта Серра-Невада; контролируемые пожары в горных областях северной и центральной частей штата; введение ограничений на водопользование и внедрение водосберегающих технологий в центральной и южной частях штата; усовершенствование инфраструктуры вблизи крупных рек, защищающей от наводнений; развитие в городах зеленой инфраструктуры, а также совершенствование водной и энергетической инфраструктуры на техногенно-преобразованных территориях, внедрение свето- и теплоотражающих материалов при строительстве зданий и дорог.

Реализация адаптационных мероприятий далее рассматривается по отдельным секторам, учитывая, что в стратегии климатической адап-

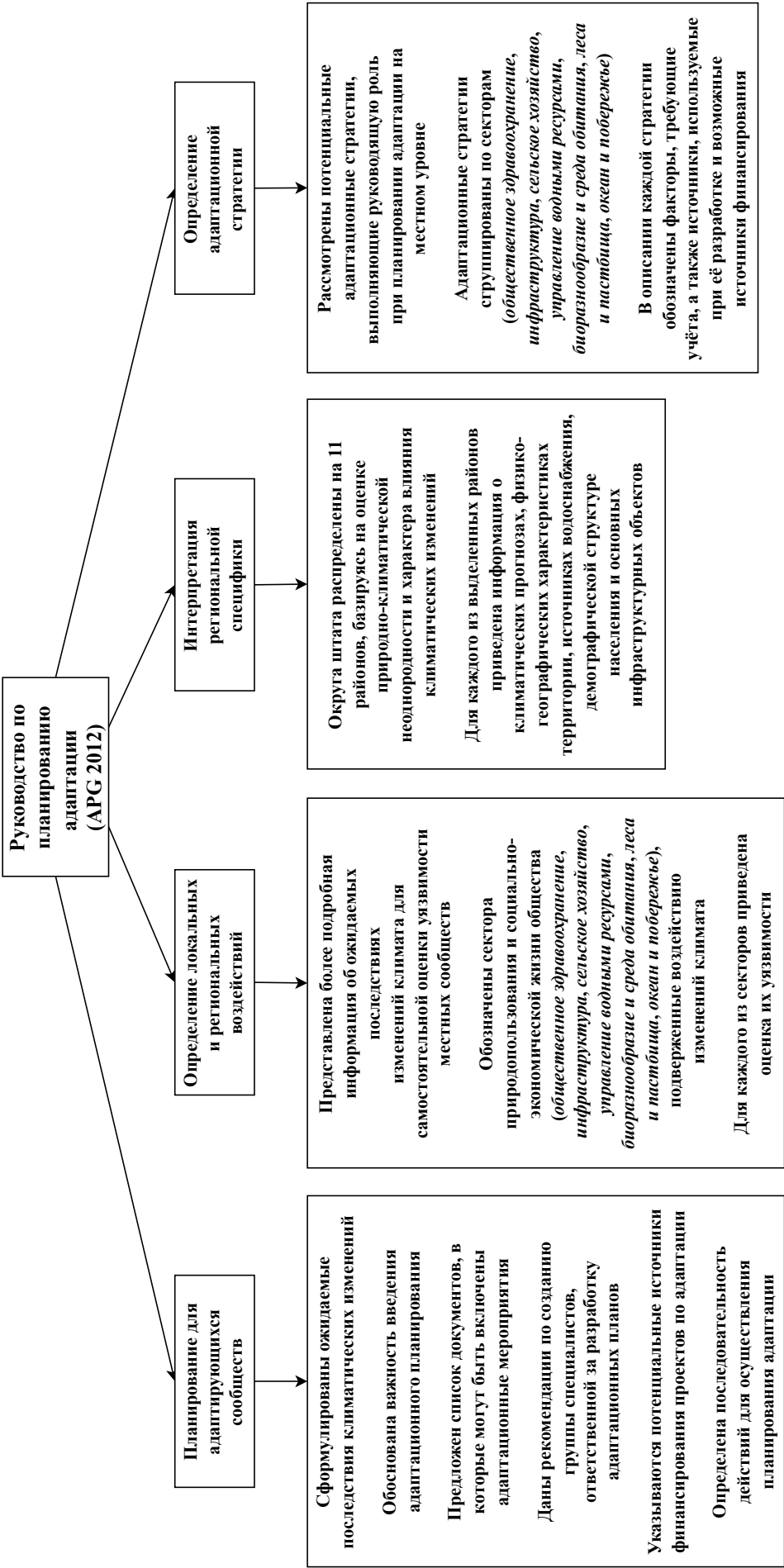


Рис. 1. Концептуальная основа планирования адаптации (2012 г.).
Источник: California Adaptation Planning Guide, 2012.

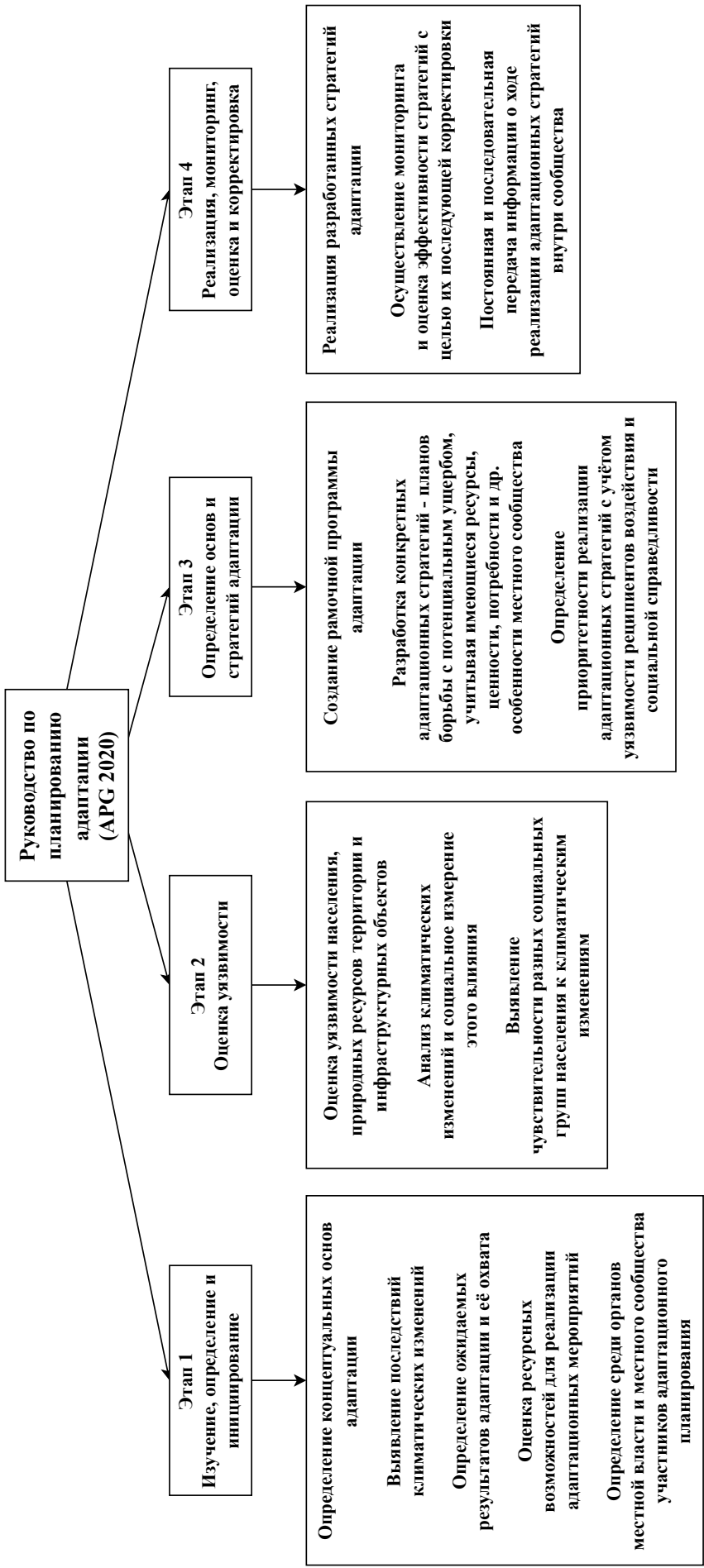


Рис. 2. Концептуальная основа планирования адаптации (2020 г.).
Источник: California Adaptation Planning Guide, 2020.

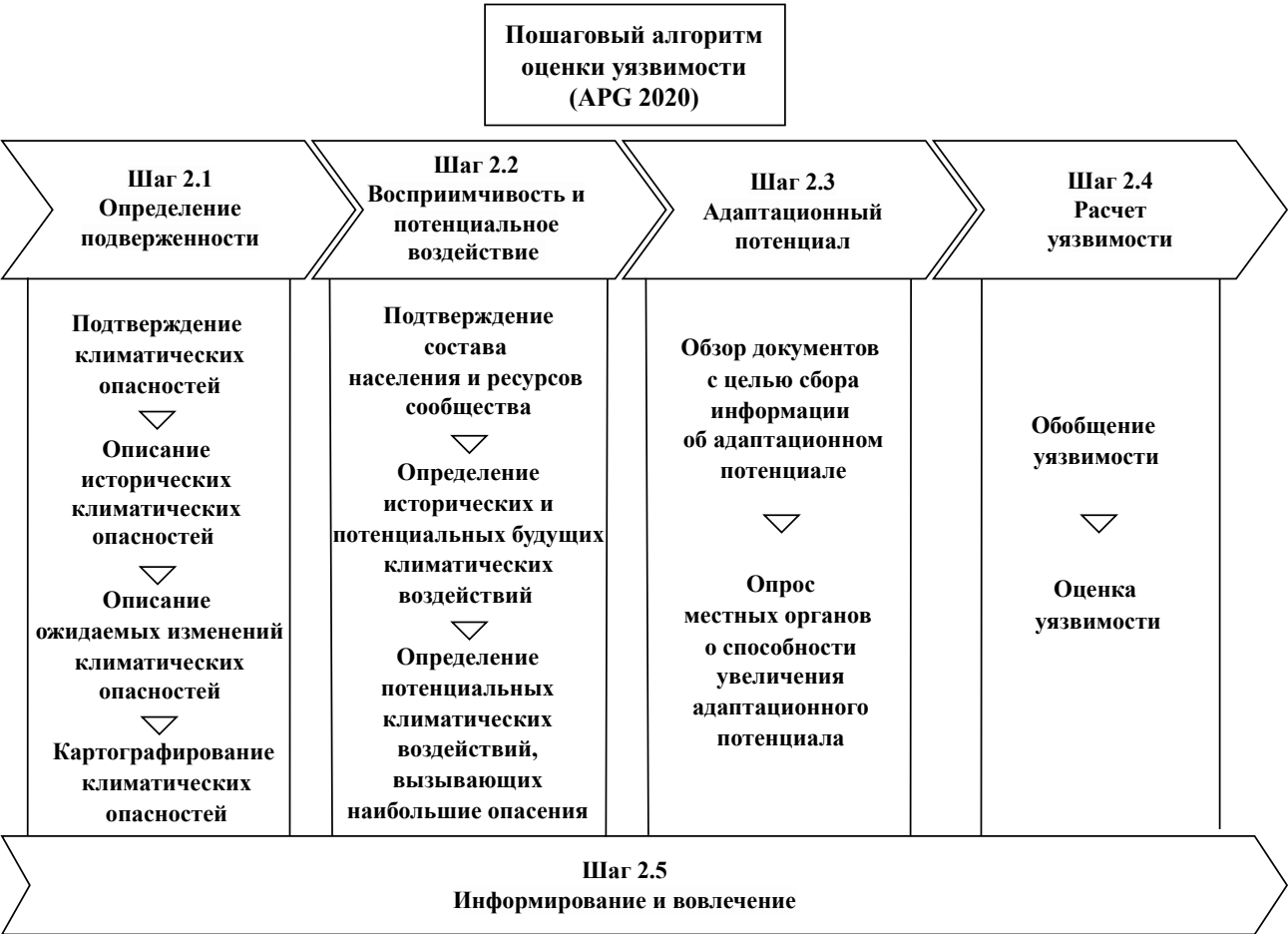


Рис. 3. Поэтапный план адаптации в обновленном руководстве по планированию адаптационных мероприятий, 2020 г.
Источник: California Adaptation Planning Guide, 2020.

тации, принятой на уровне штата, она обсуждается в ведомственном контексте.

Отраслевые адаптационные стратегии

Калифорнийская стратегия климатической адаптации является основой для проведения политики штата в этой сфере, разработки ведомственными органами отраслевых планов по адаптации и устойчивому развитию, внедрения адаптационного планирования в стратегические инициативы, подготовки законодательной базы и финансовых инструментов для их осуществления. Обобщение такой информации позволяет судить о доминирующих установках в адаптационной политике штата.

Адаптационные стратегии в лесном хозяйстве включают для правительства штата следующие рекомендации (California ..., 2009; Safeguarding ..., 2014; Safeguarding ..., 2018):

- внедрить адаптивное управление и инвестировать в мероприятия по управлению древесными насаждениями для повышения их устойчивости;
- разработать передовые методы по использованию биомассы и производству из нее энер-

гии, поощрять инвестиции в эту сферу деятельности;

- усовершенствовать планирование землепользования и строительные кодексы для снижения опасности лесных пожаров;
- увеличить масштабы выявления вредителей и болезней леса;
- поощрять разработку планов по борьбе с разными видами пожаров;
- поддерживать увеличение запасов семян в семенных банках и питомниках для обеспечения сохранности генетических материалов древесных растений;
- поддерживать городское лесное хозяйство;
- ликвидировать пробелы в исследованиях, касающихся здоровья древостоя и их климато-регулирующей роли, а также развития лесной биоэнергетики.

Штат координирует деятельность по адаптации через различные рабочие и целевые группы. Так, межведомственная рабочая группа по лесам руководит работой по адаптации лесных территорий к изменениям климата, рабочая группа по лесной биомассе изучает возможности ее использования, а деятельность целевой группы

по вопросам здоровья древостоя направлена на повышение устойчивости леса в условиях засух.

Ведомства штата включили мероприятия по адаптации во многие принятые стратегии и разработали планы по повышению устойчивости государственных и частных лесов штата. Представляется важным и то обстоятельство, что штат управляет грантовыми программами, направленными на поддержку инициатив с целью повышения устойчивости лесов (восстановление, сохранение и исследования лесных насаждений; снижение количества горючей биомассы; борьба с вредителями; инвестиции в городское лесное хозяйство; улучшение семенных банков для сохранения генетического материала аборигенных видов растений). Департамент лесного хозяйства и противопожарной защиты Калифорнии разработал Калифорнийскую программу оценки пожароопасности⁸, которая анализирует условия, при которых возникают лесные и луговые пожары, определяет зоны риска и предоставляет рекомендации по альтернативным путям управления этими землями. Штат также вводит нормативные постановления, направленные на снижение риска лесных пожаров. Например, в мае 2015 г. Совет по лесному хозяйству и противопожарной защите выпустил чрезвычайный регламент, разрешающий вырубку деревьев в пределах 300 футов (91.4 м) от жилых зданий. В 2018 г. губернатор подписал указ⁹, направленный на устранение растущей угрозы лесных пожаров в форме проведения соответствующих мероприятий (увеличение рубок ухода за лесом, проведение предписанных пожаров и др.). В 2018 г. властями штата также был опубликован Калифорнийский лесной углеродный план, в котором были определены меры по повышению устойчивости лесных земель штата, а также меры, направленные на обеспечение их функционирования в качестве долгосрочных поглотителей углерода (California ..., 2018).

Адаптационные стратегии для сохранения биоразнообразия включают для правительства штата следующие рекомендации (California ..., 2009; Safeguarding ..., 2014; Safeguarding ..., 2018):

- разработать передовые методы управления экосистемами для смягчения климатических рисков;

- расширить мониторинговые исследования за состоянием экосистем для выявления воздействия климатических изменений на биоразнообразие;

- расширить возможности для просвещения населения в вопросах охраны биоразнообразия и сохранения важнейших местообитаний.

Для поощрения межведомственного сотрудничества, направленного на решение проблем, связанных с воздействием изменений климата на биоту, штат создал рабочую группу по вопросам охраны биоразнообразия в рамках инициативной группы по климату. Также была создана группа заинтересованных участников из числа неправительственных организаций, научно-исследовательских институтов, партнеров из федеральных и частных учреждений для обсуждения вопросов влияния изменений климата на биологическое разнообразие. В обновленный в 2015 г. План действий по охране дикой природы включен фактор изменения климата, что проявилось в определении видов и местообитаний, подверженных риску, предложены пути решения проблем, связанных с последствиями природно-климатических изменений (California ..., 2015). Департаментом дикой природы созданы интерактивные онлайн-карты территорий, нуждающихся в охране, полученные на основе оценки относительной ценности биологических ресурсов штата. Эти карты предоставляют информацию о видовом разнообразии и уязвимости местообитаний. Управляемые правительством штата программы грантового финансирования обеспечивают поддержку адаптационных инициатив для сохранения биоразнообразия и местообитаний.

Департамент дикой природы совершенствует методы управления местообитаниями и землями с целью их адаптации к изменениям климата. Например, в этой связи изменены методы управления рыболовческими фермами, включающие изменения температуры воды, параметров ее качества, гидрологического режима и др. характеристик. Департамент также подготовил тематические исследования, направленные на оценку успешности внедрения адаптационных мероприятий. Кроме того, администрацией штата внесены изменения в регламент по приобретению новых земель за счет включения в него мероприятий по борьбе с фрагментацией экосистем. В этой сфере имеются примеры успешного сотрудничества между разными ведомствами. Так, Департамент дикой природы и Департамент транспорта взаимодействовали по вопросам реализации проекта, ориентированного на приобретение земель у частных землевладельцев для создания экологических коридоров.

Адаптационные стратегии для управления рисками в прибрежной зоне включают следующие рекомендации (California ..., 2009; Safeguarding ..., 2014; Safeguarding ..., 2018):

⁸ Fire and Resource Assessment Program (сайт программы об оценке пожароопасности в штате Калифорния). <https://www.fire.ca.gov/what-we-do/fire-resource-assessment-program> (дата обращения 11.09.2023).

⁹ CA Executive Order № B-52—18 (May 10, 2018). <https://www.ca.gov/archive/gov39/wp-content/uploads/2018/05/5.10.18-Forest-EO.pdf> (дата обращения 11.09.2023).

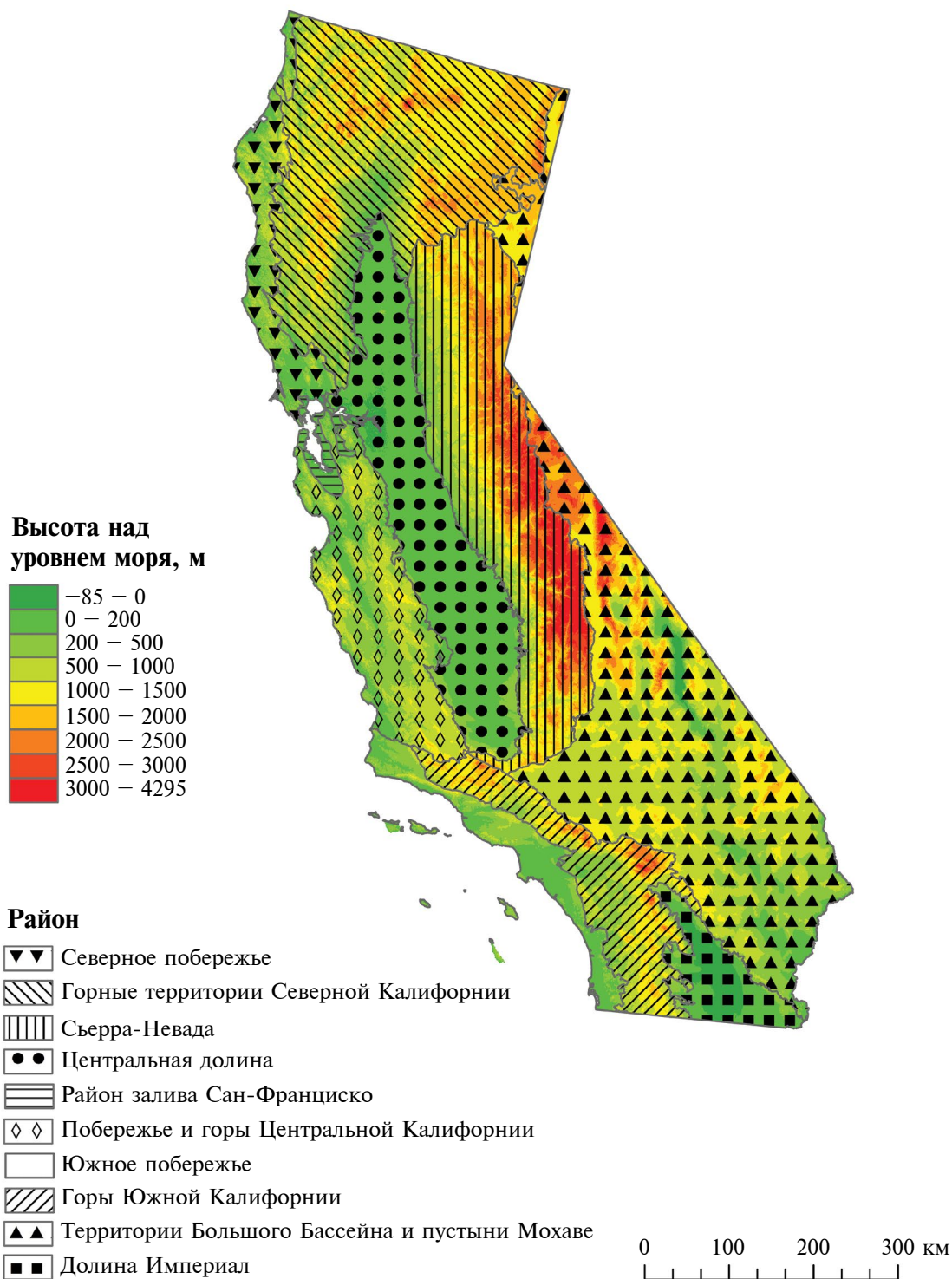


Рис. 4. Природное районирование территории штата Калифорния [по (Bailey and Hogg, 1986)].

— определить приоритетные участки для сохранения и восстановления прибрежных водно-болотных угодий;

— разработать критерии по финансированию проектов в прибрежной зоне с целью закрепления на этих территориях мероприятий, направленных на снижение уязвимости населения и экосистем к последствиям климатических изменений;

— разработать руководство по принятию решений на уровне штата, чтобы помочь региональным ведомствам и местным органам власти в разработке планов по адаптации к климатическим вызовам;

— оказать поддержку инновационным пилотным проектам, направленным на смягчение рисков, связанных с повышением уровня моря;

— разработать и внедрить подходы по управлению строительством в районах, подверженных риску подтопления и абразии в прибрежной зоне;

— продолжать научные исследования и совершенствовать процесс сбора данных для разработки сценариев повышения уровня моря и оценки связанных с этим рисков.

Для координации деятельности по адаптации к изменениям рабочая группа по ресурсам прибрежной зоны и океана объединяет различные ведомства штата, участвующие в управлении или надзоре за океаническими и прибрежными ресурсами, включая, в частности, Калифорнийскую комиссию по прибрежным районам, Комиссию штата по охране прибрежных районов, Земельную комиссию штата, Совет по охране океана и Комиссию по сохранению и освоению заливов. Ведомства штата занимаются разработкой различных руководств, направленных на обеспечение того, чтобы принятые решения в области планирования и инвестирования учитывали в будущем повышение уровня моря.

В 2018 г. Калифорнийский совет по защите океана опубликовал документ, содержащий обновленные данные в области исследования проблемы повышения уровня Мирового океана (Griggs et al., 2017), который используется региональными ведомствами и органами местного самоуправления при оценке уязвимости инфраструктуры и планировании мероприятий по повышению ее устойчивости. Этот документ включает пошаговые инструкции по оценке рисков на основе прогнозных данных о повышении уровня моря и учету этой информации при планировании проектов и принятии решений, а также рекомендации по адаптационному планированию. Для защиты береговой линии от усиливающейся абразии штат разработал специализированный мастер-план¹⁰, призванный обеспечить устойчивое функционирование государственных пляжей. В 2013 г. законодательный орган штата принял постановление¹¹, требующее рассмотрения последствий повышения уровня моря для земель (пляжей), находящихся в общественной собственности.

Ведомства, распоряжающиеся грантами, также обновили свои руководства по финансированию, чтобы включить требования к проектам по разработке сценарного отклика на изменения климата. Так, в 2015 г. Ведомство по

охране природы побережья подготовило серию докладов (Judge et al., 2017) и исследований по финансируемым проектам, ориентированных на использование зеленой инфраструктуры для адаптации прибрежных районов к повышению уровня моря. Эти доклады должны помочь управленцам при выборе стратегий планирования зеленой инфраструктуры прибрежных районов, например, таких как “живая береговая линия”. Администрация штата также оказывает поддержку исследованиям, посвященным изучению влияния изменений климата на прибрежные и океанические ресурсы. Так, штат поддержал исследование по закислению и гипоксии океана¹², результаты которого призваны дать оценку угрозе закисления океана для американского тихоокеанского побережья и определить управленческие решения, которые могут быть приняты в качестве адаптационных. Правительство штата также инвестировало средства в мониторинг охраняемых районов моря для оценки воздействия изменений климата на ресурсы океана с целью повышения эффективности адаптационных мероприятий.

Адаптационные стратегии по управлению водными ресурсами включают рекомендации, связанные в основном, с сектором водоснабжения (California ..., 2009; Safeguarding ..., 2014; Safeguarding ..., 2018):

- сократить водопотребление;
- увеличить запасы поверхностных и подземных вод;
- приложить усилия по улучшению системы водоснабжения, качества вод и состоянию экосистем;
- обеспечить устойчивые источники финансирования для комплексного регионального управления водными ресурсами;
- усовершенствовать практику управления пойменными землями;
- внедрить требования к планированию управления подземными водами;
- оптимизировать процессы по разрешению строительства инфраструктуры опреснения и повторного использования воды;
- способствовать сохранению и улучшению состояния пресноводных экосистем.

В дополнение к рекомендациям, содержащимся в адаптационных планах штата, губернатор Калифорнии также подписал исполнительные указы, направленные на охрану водных ресурсов. Так, с целью сокращения водопотребления, были введены постоянные ограничения на водопользование (до этого они вводились на время засух), устанавливающие верхний пре-

¹⁰ California Coastal Sediment Master Plan (сайт, посвященный мастер-планированию по проблеме устойчивого функционирования пляжных комплексов). https://dbw.parks.ca.gov/?page_id=29330#californiaCSMP (дата обращения 11.09.2023).

¹¹ California Assembly Bill № 691 (October 05, 2013). https://leginfo.ca.gov/faces/billNavClient.xhtml?bill_id=201320140AB691 (дата обращения 11.09.2023).

¹² West Coast Ocean Acidification and Hypoxia Science Panel (сайт, посвященный исследованию угрозы закисления океана). <http://westcoastoah.org/westcoastpanel> (дата обращения 11.09.2023).

Таблица 2. Приоритетные адаптационные мероприятия в природных районах Калифорнии

Название района	Краткая характеристика природно-экологических условий района	Адаптационные мероприятия в рассматриваемых районах
Северное побережье	Прибрежные равнины с кустарниковыми сообществами и параллельные горные хребты (до 900–1000 м) с хвойными и смешанными хвойно-широколиственными лесами	<i>Побережье и акватория:</i> укрепление береговой линии; адаптация прибрежной инфраструктуры и перенос уязвимой инфраструктуры дальше от берега; контроль за качеством прибрежных вод и состоянием прибрежных экосистем; <i>Лесное хозяйство:</i> рубки ухода; сбор сухой и легко загорающей биомассы; контролируемые пожары; борьба с инвазивными видами и вредителями; лесовосстановительные мероприятия с высаживанием огнеустойчивых видов; внедрение принципов устойчивого лесопользования в практику лесозаготовки; <i>Водные ресурсы:</i> учет изменения гидрологического режима рек и подготовка водной инфраструктуры к этим изменениям
Горные территории Северной Калифорнии	Расчлененные низко- и среднегорья (до 2300–2500 м) и плато высотной (от 1000 до 2000 м) со смешанными хвойно-широколиственными лесами, горным чапаралем и полынными кустарниковыми сообществами	<i>Лесное хозяйство:</i> рубки ухода; сбор сухой и легко загорающей биомассы; контролируемые пожары; борьба с инвазивными видами и вредителями; лесовосстановительные мероприятия с высаживанием огнеустойчивых видов; внедрение принципов устойчивого лесного хозяйства в лесозаготовительную практику; мониторинг состояния растительности; <i>Водные ресурсы:</i> учет изменения гидрологического режима рек и подготовка водной инфраструктуры к этим изменениям; укрепление речных долин – высаживание лесополос вдоль берегов
Сьерра-Невада	Горный хребет (в среднем – около 2500 м) и отдельными высокими вершинами (более 4000 м) с хвойными лесами, субальпийским хвойным редколесьем и альпийскими лугами	<i>Лесное хозяйство:</i> рубки ухода; сбор сухой и легко загорающей биомассы; контролируемые пожары; борьба с инвазивными видами и вредителями; лесовосстановительные мероприятия с высаживанием огнеустойчивых видов; внедрение принципов устойчивого лесного хозяйства в лесозаготовительную практику; <i>Водные ресурсы:</i> учет изменения гидрологического режима рек и подготовка водной инфраструктуры к этим изменениям; укрепление речных долин – высаживание лесополос вдоль берегов; <i>Охрана биоразнообразия:</i> мониторинг уязвимых видов, создание охраняемых природных территорий
Центральная долина Калифорнии	Плоская низменная равнина с полевыми агроландшафтами	<i>Сельское хозяйство:</i> совершенствование ирригационных систем и техник полива с целью уменьшения потерь воды при поливе; внедрение сортов и культур, устойчивых к более высоким температурам и более засушливым условиям; расширение мелиоративных мероприятий; <i>Водные ресурсы:</i> укрепление дамб в районе дельты для защиты от вторжений морской воды; контроль за состоянием водоотводящих каналов; развитие инфраструктуры, защищающей от наводнений; <i>Охрана биоразнообразия:</i> сохранение видов и местообитаний района в районе Калифорнийской дельты (Сакраменто–Сан-Хоакин)
Район залива Сан-Франциско	Высокоурбанизированное побережье залива Сан-Франциско	<i>Побережье и акватория:</i> укрепление береговой линии и защита прибрежной инфраструктуры; учет подъема уровня моря при градостроительстве; <i>Городская инфраструктура:</i> использование светоотражающих материалов на крышах зданий и дорожных покрытиях; повышение эффективности систем водоснабжения и электроснабжения; развитие зеленой инфраструктуры для уменьшения эффекта городского “острова тепла”; <i>Здравоохранение:</i> подготовка системы здравоохранения к волнам жары; информирование рядовых работников и управленцев о рисках, связанных с работой на улице и в не кондиционируемых помещениях и т.д.
Побережье и горы Центральной Калифорнии	Прибрежные равнины и невысокие (до 1000 м) параллельные горные хребты с широколиственными лесами и горным чапаралем	<i>Побережье и акватория:</i> защита от морской трансгрессии прибрежной инфраструктуры местных городов и важнейших транспортных магистралей, идущих вдоль побережья; <i>Сельское хозяйство:</i> совершенствование ирригационных систем и техник полива с целью снижения потерь воды при поливе; внедрение сортов и культур, устойчивых к более высоким температурам и более засушливым условиям; расширение мелиоративных мероприятий; <i>Охрана биоразнообразия:</i> мониторинг уязвимых видов; создание охраняемых природных территорий

Таблица 2. (Окончание)

Название района	Краткая характеристика природно-экологических условий района	Адаптационные мероприятия в рассматриваемых районах
Южное побережье	Прибрежные долины и невысокие (не более 500 м) горы с высокоурбанизированными территориями, чапаралем и полынными кустарниковыми сообществами	<i>Побережье и акватория:</i> укрепление береговой линии и защита прибрежной инфраструктуры; учет подъема уровня моря при градостроительстве; <i>Водные ресурсы:</i> контроль и поддержка состояния водной инфраструктуры акведуков; введение ограничений на водопользование; ужесточение критериев качества воды; управление водоносными горизонтами – контроль их состояния, защита и восстановление; <i>Городская инфраструктура:</i> развитие зеленой инфраструктуры для уменьшения эффекта городского “острова тепла”; <i>Защита:</i> подготовка системы здравоохранения к волнам жары; информирование рядовых работников и управленцев о рисках, связанных с работой на улице и в не кондиционируемых помещениях и т.д.
Горы Южной Калифорнии	Горные хребты (до 2500 м) с горным чапаралем	<i>Лесное хозяйство:</i> сбор сухой и легко загорающей биомассы; контролируемые пожары; мониторинг состояния растительности; <i>Охрана биоразнообразия:</i> мониторинг уязвимых видов; создание охраняемых природных территорий
Территории Большого Басейна и пустыни Мохава	Равнины, перемежающиеся с котловинами высохших озер, короткими горными хребтами и долинами с пустынными кустарниковыми сообществами	<i>Водные ресурсы:</i> ограничение водозабора из р. Колорадо; <i>Охрана биоразнообразия:</i> мониторинг уязвимых видов; создание охраняемых природных территорий
Долина Империя	Низменная равнина с орошаемыми агроландшафтами и пустынными кустарниковыми сообществами	<i>Сельское хозяйство:</i> совершенствование ирригационных систем и техник полива с целью снижения потерь воды при поливе; внедрение сортов и культур, устойчивых к более высоким температурам и более засушливым условиям; расширение мелиоративных мероприятий

дел для домашнего водопользования, а также прямые указания по установлению в отдельных местах постоянных лимитов на использование воды вне зданий (имеется в виду использование воды на частных земельных участках для полива, бассейнов и т.п.). Также был принят закон¹³, регулирующий водозабор из дельтовых областей рр. Сакраменто и Сан-Хоакин, так как этот регион является одним из крупнейших источников водоснабжения всего штата и нуждается в защите местных экосистем. В 2017 г. Калифорнийский совет по контролю за качеством воды принял положение по чрезвычайным ситуациям¹⁴, связанным с засухой, куда были включены требования по водосбережению в городах по всему штату. Политика по рециркуляции воды, принятая в 2009 г. и обновленная в 2013 г., поощряет повторное использование воды. В 2013 г. Совет Калифорнии по контролю за качеством воды одобрил и выдал разрешение на разработку проектов, направленных на восстановление водоносных горизонтов. Совет также принял рекомендации по финансированию проектов, направленных на управление ливневыми стоками и сбор дождевой воды, ее повторное использование и пополнение ею запасов грунтовых вод. В 2013 г. Департамент водных ресурсов выпустил очередное обновление пятилетнего Водного плана, в котором особое внимание уделено анализу влияния климатических изменений на водоснабжение штата при самых разных сценариях потепления. В этом документе подробно описываются различные стратегии по адаптации к происходящим климатическим изменениям, включая снижение потребления воды, увеличение объемов водообеспечения, улучшение качества воды и повышение эффективности управления окружающей средой (California ..., 2013). В обновленной версии Водного плана, вышедшего в 2018 г., основной акцент делается на достижении климатической устойчивости в водоснабжении и водопользовании (California ..., 2018), а в его актуализированной версии 2023 г., кроме продолжения тренда на климатическую устойчивость, большое внимание уделяется также и проблеме “водного равенства” – справедливого распределения водных ресурсов между разными социальными группами (California ..., 2023). В 2016 г. был обнародован план действий в чрезвычайных ситуациях, порожденных засухами, в котором определены мероприятия, направленные на подготовку к будущим засухам и другим неблагоприятным явлениям, свя-

¹³ CA Senate Bill X7–7 (October 29, 2009). http://www.leginfo.ca.gov/pub/09–10/bill/sen/sb_0001–0050/sbx7_7_bill_20091029_amended_sen_v98.html (дата обращения 11.09.2023).

¹⁴ State Water Resources Control Board Resolution № 2017. https://www.waterboards.ca.gov/board_info/agendas/2017/mar/030717_7.pdf (дата обращения 11.09.2023).

занным с дефицитом воды. Еще одна проблема связана с увеличением риска наводнений в районах, которые защищаются устаревающими дамбами, требующими модернизации. В 2014 г. с целью совершенствования управления ресурсами подземных вод был принят соответствующий закон¹⁵, ориентированный на реализацию мероприятий по планированию и мониторингу забора подземных вод. В 2018 г. Департамент водных ресурсов принял чрезвычайные положения, устанавливающие требования по планированию, мониторингу и отчетности в области управления подземными водами. Местным органам власти рекомендовано ориентироваться на прогнозы о климатических изменениях и повышении уровня моря, принимая их во внимание при анализе ресурсов подземных вод и оценке их состояния.

Адаптационные мероприятия в сельском хозяйстве предусматривают (California ..., 2009; Safeguarding ..., 2014; Safeguarding ..., 2018):

- сохранение и защиту сельскохозяйственных угодий;

- приобретение у частных землевладельцев участков пойменных земель и водно-болотных угодий и переход их в собственность штата для обеспечения функционирования систем переброски воды при наводнениях;

- разработку и внедрение лучших практик, направленных на смягчение климатических рисков для сельскохозяйственного сектора и сокращение выбросов парниковых газов;

- выявление инвазивных видов и вредителей, и борьбу с ними, поддержку инициатив, направленных на водосбережение в сельском хозяйстве;

- расширение сотрудничества с другими ведомствами, курирующими водоснабжение, энергетику, биоразнообразие и экосистемы, транспорт.

После принятия адаптационной стратегии в 2009 г. для координации усилий по адаптации между ведомствами штата, работающими в сельскохозяйственном секторе, была создана рабочая группа по разработке адаптационных мероприятий в сельском хозяйстве. Штат руководит несколькими программами по поддержке адаптационных проектов на фермах и ранчо. Фермерам и владельцам ранчо предоставляется финансовая помощь для внедрения передовых сельскохозяйственных практик, которые обеспечивают устойчивое развитие отрасли и продовольственную безопасность в условиях меняющегося климата, улучшают плодородие почвы и способствуют связыванию углерода почвой. В рамках реализации государственной програм-

мы по повышению эффективности использования водных ресурсов выделяются гранты, направленные на внедрение технологий, снижающих потребление воды и энергии в сельскохозяйственном секторе.

В 2013 г. Департаментом продовольствия и сельского хозяйства был подготовлен доклад, в котором рассматриваются стратегии адаптации к прогнозируемым для сельскохозяйственного сектора Калифорнии последствиям климатических изменений, к числу которых относятся: экстремальная жара, засуха, наводнения, интрузия соленых вод из-за подъема уровня моря, а также распространение инвазивных видов и вредителей (Climate ..., 2013). Представленные стратегии адаптации включают переход на сельскохозяйственные культуры, более адаптированные к тепловым стрессам; установку зате-няющих конструкций; изменение графиков посадки и сбора урожая; улучшение регионального планирования водопользования; пополнение запасов подземных вод; инвестирование в оборотное использование воды; сохранение мест обитания опылителей. В докладе также кратко излагаются потребности в исследованиях и потенциальных пилотных проектах, направленных на повышение устойчивости сельскохозяйственного сектора. Департамент водных ресурсов отслеживает принятие планов по программе повышения эффективности сельскохозяйственного водопользования.

Для борьбы с инвазивными видами, влияние которых на сельское хозяйство, согласно прогнозам, будет увеличиваться, правительство штата предприняло ряд инициатив по мониторингу распространения инвазивных видов. Был создан Совет по инвазивным видам, подготовивший специальный доклад, в котором рассматриваются рекомендации по борьбе с инвазивными видами. Правительство штата финансирует исследования по разработке методов обнаружения вторжений инвазивных видов, а также разработало CalWeedMapper – онлайн-ресурс, аккумулирующий и предоставляющий пространственные данные о распространении инвазивных видов в штате Калифорния.

Адаптационные мероприятия в инфраструктурном развитии направлены на повышение устойчивости энергетических и транспортных систем и сформулированы в следующих рекомендациях (California ..., 2009; Safeguarding ..., 2014; Safeguarding ..., 2018):

- оценить воздействие изменений климата на инфраструктурные системы;

- защитить объекты и пользователей;

- диверсифицировать поставки энергии и повысить их энергоэффективность;

¹⁵ CA Senate Bill 1168 (September 16, 2014). <https://legiscan.com/CA/text/SB1168/id/1014302> (дата обращения 11.09.2023).

- разработать карту “горячих точек” энергопотребления и определить сообщества, наиболее уязвимые к перебоям в электроснабжении;

- обеспечить подготовку работников транспорта по вопросам учета климатических изменений при планировании, проектировании, строительстве, эксплуатации и обслуживании транспорта;

- защитить основные маршруты эвакуации населения.

Для согласования решений между заинтересованными ведомствами штата, созданы две экспертные группы, рассматривающие воздействие меняющегося климата на инфраструктуру: рабочая группа по землепользованию и инфраструктуре и рабочая группа по водно-энергетическим ресурсам.

В 2015–2016 гг. правительством штата был принят ряд постановлений^{16,17}, предписывающих учитывать природно-климатические изменения при планировании, проектировании и инвестировании государственных инфраструктурных проектов. Для выполнения этих предписаний консультативной группой был подготовлен документ “Планирование и инвестирование для устойчивой Калифорнии: руководство для ведомств штата”¹⁷, в котором рассмотрен пошаговый алгоритм учета климатических изменений при планировании инфраструктуры, проектировании и технико-экономических обоснованиях. Рабочей группой по климатически безопасной инфраструктуре в этом же контексте был подготовлен доклад “Оплачивая вперед: путь к климатически безопасной инфраструктуре в Калифорнии” с определением рекомендаций по интеграции климатических данных с информацией по проектированию и обслуживанию инфраструктуры.

Транспортная инфраструктура. Департамент транспорта проводит оценку уязвимости транспортных систем штата, анализируя возможное воздействие наиболее вероятных климатических рисков (наводнения, активизация оползневых процессов, повышение уровня моря, экстремальная жара и лесные пожары). В 2013 г. Департамент выпустил отчет (Caltrans ..., 2013) о своей деятельности в сфере смягчения последствий климатических изменений.

Оценка устойчивости к изменениям климата включена не только в пятилетние планы по развитию инфраструктуры, но учитывается и в долгосрочном планировании на 2040 г. (California ..., 2016). Все эти документы пред-

писывают учитывать климатическую устойчивость инфраструктуры для определения приоритетности финансирования стратегических проектов. Кроме того, Департамент транспорта приступил к разработке стратегий и подготовке руководств для адаптации к конкретным климатическим воздействиям на транспортные системы. Например, созданы рекомендации по учету повышения уровня моря при планировании и разработке проектов в области транспортной инфраструктуры. Еще один пример – разработка стандартных инструкций по использованию “холодного” (более светлого) дорожного покрытия для уменьшения эффекта городского “острова тепла”.

Энергетические системы. В области энергетики Калифорнийская комиссия по коммунальным услугам сотрудничает с коммунальными службами с целью оценки уязвимости и повышения устойчивости электросети к внешним воздействиям. Названная комиссия поручила коммунальным службам принять меры по защите энергосистем от климатических рисков, модернизируя сетевую инфраструктуру с целью обеспечить охлаждение трансформаторов и надежное электроснабжение. Калифорнийские коммунальные службы также начали вкладывать средства в адаптацию энергетической инфраструктуры к климатическим изменениям. Администрация штата также принимает меры по достижению более эффективного использования энергии в жилых, коммерческих и общественных зданиях. Штат финансирует проекты по повышению устойчивости энергетических систем. Так, Калифорнийская энергетическая комиссия профинансировала демонстрационные проекты микросетей, например, по очистке сточных вод. Микросети повышают устойчивость населения к перебоям в подаче электроэнергии, поскольку они питаются от возобновляемых источников и поэтому могут отключаться от более крупной сети во время перебоев в подаче электроэнергии и поддерживать электроснабжение отдельного объекта или группы объектов.

Адаптационные мероприятия в контексте развития общественного здравоохранения включают следующие рекомендации (California ..., 2009; Safeguarding ..., 2014; Safeguarding ..., 2018):

- расширить подготовку кадров и увеличить потенциал местных систем здравоохранения;

- включить информацию об изменениях климата и охране здоровья населения в просветительские и образовательные мероприятия;

- обеспечить доступ к полезным для здоровья продуктам питания и содействовать развитию местных продовольственных систем;

- разработать стратегию финансирования адаптационных мероприятий в системе общественного здравоохранения;

¹⁶ CA Executive Order № B-30–15 (April 29, 2015). <https://www.library.ca.gov/wp-content/uploads/GovernmentPublications/executive-order-proclamation/39-B-30-15.pdf> (дата обращения 15.09.2023).

¹⁷ CA Assembly Bill № 2800 (September 24, 2016). https://leginfo.ca.gov/faces/billNavClient.xhtml?bill_id=201520160AB2800 (дата обращения 15.09.2023).

- содействовать расширению доступа к медицинским услугам;
- разработать руководство по оценке влияния климатических изменений на здоровье населения;
- увеличить площадь городских лесов с целью сокращения эффекта городского “острова тепла”;
- расширить возможности мониторинга заболеваний и рисков для здоровья, связанных с изменениями климата;
- проводить информационно-просветительскую работу с уязвимыми группами населения.

Ведомства штата координируют деятельность по адаптации в секторе общественного здравоохранения благодаря активности инициативных групп, обобщающих исследования в сфере влияния изменений климата на здоровье населения и систему здравоохранения штата. На уровне штата расширена программа мониторинга за состоянием здоровья населения, в которую включены и показатели, рекомендованные Национальным советом эпидемиологов. Штат также разработал руководство и рекомендации по подготовке к экстремальной жаре (Preparing ..., 2013), а Департамент здравоохранения осуществляет сбор данных о связанных с жарой случаях госпитализации и смертности. Штат финансирует исследования о влиянии изменений климата на общественное здравоохранение. По результатам этих исследований составлены специализированные карты, отображающие районы с наибольшей уязвимостью населения к изменениям климата, включая жару, качество воздуха, инфекционные заболевания, лесные пожары и наводнения. Разработан план, ориентированный на снижение уязвимости населения, учитывающий риск распространения трансмиссивных заболеваний и оценку последствий климатических изменений для здоровья населения.

Адаптационные мероприятия в управлении чрезвычайными ситуациями включают следующие цели и рекомендации (California ..., 2009; Safeguarding ..., 2014; Safeguarding ..., 2018):

- консолидировать потенциал реагирования на климатические вызовы;
- улучшить коммуникацию и качество образования в области климатических рисков;
- оценить уязвимость критически важных для населения объектов.

Федеральное агентство по управлению чрезвычайными ситуациями, которому поручено рассмотрение и утверждение планов по снижению опасности разного рода рисков, предоставляет Калифорнии, как и другим штатам, право на получение дополнительных федеральных средств в случае объявления президентом США чрезвычайной ситуации. Штатом создана целевая группа пожарной службы для повышения

готовности территории и населения к возрастающим рискам климатической природы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги проведенного обзора калифорнийского опыта в сфере климатической адаптации, можно выделить как его сильные, так и слабые стороны. К первым следует отнести — наличие развитой исследовательской базы, разветвленной системы сбора климатической информации и постоянно обновляющихся баз данных, развитой системы мониторинга окружающей среды и оценки климатических рисков. Представляется, что Правительство Калифорнии проделало значительную работу по созданию институциональной структуры прогнозирования и оценки рисков, своевременного реагирования на них, разработки и финансирования необходимых адаптационных мероприятий. Важно отметить, что между отраслевыми ведомствами отсутствуют существенные противоречия при реализации адаптационных программ и стратегий, всячески поощряется кооперация и сотрудничество между ними. Представляется положительным тренд, проявившийся в новейших документах по адаптации к изменениям климата, направленный на реализацию социальной справедливости при разработке адаптационных мероприятий.

Несмотря на очевидно положительные аспекты, в сфере климатической адаптации имеются и некоторые проблемы. Так, к вызовам можно отнести следующие обстоятельства: присутствие сегрегированности в основе руководящих документов, недостаточный учет территориальной и ландшафтной специфики при разработке адаптационных планов. К числу не менее проблемных аспектов также следует отнести преимущественно руководящий характер адаптационных планов, из-за чего они более похожи на декларации, чем на стратегические документы. Неоднозначным представляется и то обстоятельство, что большинство целей и задач формулируется ведомствами для ведомств, а рекомендации местным органам власти даются в отрыве от территории. В результате разработка конкретных стратегий и мероприятий остается на усмотрение органов местного самоуправления, что, с одной стороны, позволяет им разрабатывать адаптационные стратегии и мероприятия с учетом специфики конкретной территории, а с другой стороны, местные власти не обязаны прибегать к рассмотрению и разработке адаптационных программ. По-видимому, это и является основной причиной того, что адаптационных стратегий и планов местного уровня на настоящий момент разработано крайне мало. Тем не менее, проведенный анализ показывает,

что имеющийся у рассматриваемого штата опыт адаптации к изменениям климата в части взаимодействия науки и практики, сбора актуальных данных и их использования представляется успешным и может служить примером для других регионов и стран мира.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Аналитический обзор прогнозируемых изменений климатически обусловленных природных ресурсов на территории штата Калифорния (США) выполнен в рамках темы Государственного задания Института географии РАН № FMWS-2024-0007. Обобщающий анализ региональной стратегии климатической адаптации штата Калифорния (США) выполнен по теме Государственного задания географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова № 121040100322-8.

FUNDING

An analytical review of projected changes in climate-related natural resources in the state of California (USA) was carried out within the framework of the State Assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences no. FMWS-2024-0007. A general analysis of the regional climate adaptation strategy of the state of California (USA) was carried out on the topic of the State assignment of the Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University no. 121040100322-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Леонард М., Пизани-Ферри Ж., Шапиро Д., Тальяни-тра С., Вульф Г. Геополитика “Зеленой сделки” Европейского союза // Вестн. международных организаций. 2021. Т. 16. № 2. С. 204–235.
<https://doi.org/10.17323/1996-7845-2021-02-10>
- Лыжин Д.Н. Климатическая политика США: проблемы и перспективы глобального лидерства // Проблемы национальной стратегии. 2021. № 3 (66). С. 221–245.
- МГЭИК, Изменение климата, 2014 г.: Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный докл. Межправительственной группы экспертов по изменению климата / под ред. Р.К. Пачаури и Л.А. Мейер. Женева: МГЭИК, 2014. 163 с.
- МГЭИК, Изменение климата, 2007 г.: Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Четвертый оценочный докл. Межправительственной группы экспертов по изменению климата / под ред. Р.К. Пачаури, А. Райзенберг и осн. группы авторов. Женева: МГЭИК, 2007. 104 с.
- Медведков А.А. Адаптация к климатическим изменениям: глобальный эколого-экономический тренд и его значение для России // Вестн. Моск. гос. обл. ун-та. Серия: Естественные науки. 2018. № 4. С. 11–19.
<https://doi.org/10.18384/2310-7189-2018-4-11-19>
- Медведков А.А., Котова М.В. Противопожарный потенциал лесов водоохранной зоны озера Байкал (на примере территории Байкало-Ленского заповедника) // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020. Т. 84. № 5. С. 764–775.
<https://doi.org/10.31857/S2587556620050118>
- Никуличев Ю.В. Глобальные климатические изменения. Новые вызовы и география изменений: специализированная информация. М.: ИНИОН РАН, 2016. 45 с.
- Порфирьев Б.Н., Терентьев Н.Е., Зинченко Ю.В. Планирование адаптации к изменениям климата: мировой опыт и возможности для устойчивого социально-экономического развития России // Проблемы прогнозирования. 2023. № 2. С. 154–168.
<https://doi.org/10.47711/0868-6351-197-154-168>
- Anderegg W.R.L., Hicke J.A., Fisher R.A., et al. Tree mortality from drought, insects, and their interactions in a changing climate // New Phytologist. 2015. Vol. 208. № 3. P. 674–683.
<https://doi.org/10.1111/nph.13477>
- Bailey R.G., Hogg H.C. A world ecoregions map for resource reporting // Environmental Conservation. 1986. Vol. 13. № 3. P. 195–202.
- Barnett T.P., Pierce D.W., Hidalgo H.G., Bonfils C., Santer B.D., Das T., Dettinger M.D. Human-induced changes in the hydrology of the western United States // Science. 2008. Vol. 319. № 5866. P. 1080–1083.
<https://doi.org/10.1126/science.1152538>
- Bedsworth L., Cayan D., Fisher L., Ziaja S., et al. Statewide Summary Report. California’s Fourth Climate Change Assessment. 2018. SUMCCCA4-2018-013. 116 p.
- Berg N., Hall A. Increased interannual precipitation extremes over California under climate change // J. of Climate. 2015. Vol. 28. № 16. P. 6324–6334.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00624.1>
- California Adaptation Planning Guide 2020 Update. The California Governor’s Office of Emergency Services, 2020. 280 p.
- California Adaptation Planning Guide. California Emergency Management Agency, California Natural Resources Agency, 2012. 192 p.
- California Climate Adaptation Strategy. California Natural Resources Agency, 2009. 92 p.
- California Forest Carbon Plan, California Department of Forestry and Fire Protection, California Environmental Protection Agency, California Natural Resources Agency, 2018. 178 p.
- California State Wildlife Action Plan. California Department of Fish and Wildlife, 2015. 803 p.
- California Transportation Plan 2040. California Department of Transportation, 2016. 131 p.
- California Water Plan 2013 Update. California Department of Water Resources, 2013. Vol. 1. 407 p.

- California Water Plan 2018 Update. California Department of Water Resources, California Natural Resources Agency, 2018. 98 p.
- California Water Plan 2023 Update. California Department of Water Resources, California Natural Resources Agency, 2023. 330 p.
- Caltrans Activities to Address Climate Change: Reducing Greenhouse Gas Emissions and Adapting to Impacts. California Department of Transportation, 2013. 102 p.
- Climate Change Consortium for Specialty Crops: Impacts and Strategies for Resilience. California Department of Food and Agriculture, 2013. 76 p.
- Climate Vulnerability Monitor: A Guide to the Cold Calculus of A Hot Planet / DARA and the Climate Vulnerable Forum Climate Vulnerability Monitor. Madrid–Geneva, 2012. P. 17–19.
- Farber D.A. The Challenge of Climate Change Adaptation: Learning from National Planning Efforts in Britain, China, and the USA // *J. of Environmental Law*. 2011. Vol. 23. № 3. P. 359–382.
- Griggs G., Árvai J., Cayan D., et al. Rising Seas in California: An Update on Sea-Level Rise Science. California Ocean Science Trust, 2017. 102 p.
- Indicators of Climate Change in California. Office of Environmental Health Hazard Assessment, California Environmental Protection Agency, 2018. 104 p.
- Judge J., Newkirk S., Leo K., et al. Case Studies of Natural Shoreline Infrastructure in Coastal California: A Component of Identification of Natural Infrastructure Options for Adapting to Sea Level Rise (California's Fourth Climate Change Assessment). The Nature Conservancy, Arlington, VA, 2017. 38 p.
- Knowles N., Dettinger M.D., Cayan D.R. Trends in snowfall versus rainfall in the western United States // *J. of Climate*. 2018. Vol. 19. № 18. P. 4545–4559. <https://doi.org/10.1175/JCLI3850.1>
- Mote P.W., Li S., Lettenmaier D.P., Xiao M., Engel R. Dramatic declines in snowpack in the western US // *Climate and Atmospheric Science*. 2018. Vol. 1. № 2. <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0012-1>
- Pierce D.W., Cayan D.R., Kalansky J.F. Climate, Drought, and Sea Level Rise Scenarios for the Fourth California Climate Assessment. California's Fourth Climate Change Assessment, California Energy Commission, 2018. 86 p.
- Pierce D.W., Barnett T.P., Hidalgo H.G., Da T., Bonfils C., Santer B.D., Nozawa T. Attribution of declining western U.S. snowpack to human effects // *J. of Climate*. 2018. Vol. 21. № 23. P. 6425–6444. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2405.1>
- Pierce D.W., Cayan D.R. The uneven response of different snow measures to human-induced climate warming // *J. of Climate*. 2013. Vol. 26. № 12. P. 4148–4167. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00534.1>
- Pierce D.W., Cayan D.R., Thrasher B.L. Statistical downscaling using localized constructed analogs (LOCA) // *J. of Hydrometeorology*. 2014. Vol. 15. № 6. P. 2558–2585. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0082.1>
- Preparing California for Extreme Heat: Guidance and Recommendations. California's Climate Action Team, 2013. 24 p.
- Safeguarding California Plan: 2018 Update. California Natural Resources Agency, 2018. 98 p.
- Safeguarding California: Reducing Climate Risk An update to the 2009 California Climate Adaptation Strategy. California Natural Resources Agency, 2014. 112 p.
- Statewide Summary Report. California's Fourth Climate Change Assessment, 2018. 132 p.
- Swain D.L., Langenbrunner B., Neelin J.D., Hall A. Increasing precipitation volatility in twenty-first-century California // *Nature Climate Change*. 2018. Vol. 8. № 5. P. 427–433. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0140-y>
- California Adaptation Planning Guide 2020 Update: The California Governor's Office of Emergency Services, 2020. 110 p.
- Thorne J., Choe H., Boynton R., Bjorkman J., Albright W., Nydick K., Flint A., Flint L., Schwartz M. The impact of climate change uncertainty on California's vegetation and adaptation management // *Ecosphere*. 2017. Vol. 8. № 12. Art. e02021. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2021>
- Williams A., Abatzoglou J., Gershunov A., Guzman-Morales J., Bishop D., Balch J., Lettenmaier D. Observed Impacts of Anthropogenic Climate Change on Wildfire in California // *Earth's Future*. 2019. Vol. 7. <https://doi.org/10.1029/2019EF001210>

Experience of Climate Change Adaptation in the State of California (USA)

M. R. Torgashina^{a,*} and A. A. Medvedkov^{a,b,**}

^aLomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^bInstitute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: masha@torgashin.ru

**e-mail: a-medvedkov@bk.ru

As part of the discussion of the regional climate adaptation strategy, projected climate changes and their consequences for natural resources, the social sphere and climate-dependent sectors of the economy of the state of California (USA) are considered. In this context, sectoral adaptation strategies were analyzed (increasing efficiency in forestry and agriculture, water resources management, biodiversity conservation,

development of the healthcare system, increasing the sustainability of energy and transport systems, emergency and risk management in the coastal zone). For each of these areas, the most important challenges caused by climate warming are considered, and the main goals are identified, the achievement of which can mitigate the consequences of global climate change. The following are identified as priority types of adaptation measures: strengthening the coastline and protecting coastal infrastructure in the coastal zone; implementing thinning, deadwood removal, and controlled fires in mountainous areas of the northern and central parts of the state; imposing restrictions on water use and introducing water-saving technologies in agricultural and urban areas of the central and southern parts of the state; improving flood protection infrastructure near major rivers; development of green spaces and improvement of water and energy infrastructure on urbanized lands; introduction of light- and heat-reflecting building materials in cities. The analysis identifies advantages and disadvantages of California's climate policy. The advantages include: a developed institutional risk management system, well-established interaction between departments in the development of adaptation programs, a high-quality system for collecting climate information, organizing and conducting monitoring studies, effectively built cooperation between science and practice. The disadvantages include: the declarative nature of sectoral strategies with departmental recommendations that do not take into account local specifics, insufficient consideration of territorial features (spatial heterogeneity of the geographical environment) and the actual refusal to use the landscape approach in the form of physiographic/ecosystem zoning in the development of adaptation measures.

Keywords: environmental changes, climate policy, adaptation strategies, strategic planning, adaptation measures, climate information, foreign experience, US Pacific states

REFERENCES

- Anderegg W.R.L., Hicke J.A., Fisher R.A., et al. Tree mortality from drought, insects, and their interactions in a changing climate. *New Phytol.*, 2015, vol. 208, no. 3, pp. 674–683.
<https://doi.org/10.1111/nph.13477>
- Bailey R.G., Hogg H.C. A world ecoregions map for resource reporting. *Environ. Conserv.*, 1986, vol. 13, no. 3, pp. 195–202.
- Barnett T.P., Pierce D.W., Hidalgo H.G., Bonfils C., Santer B.D., Das T., Dettinger M.D. Human-induced changes in the hydrology of the western United States. *Science*, 2008, vol. 319, no. 5866, pp. 1080–1083.
<https://doi.org/10.1126/science.1152538>
- Bedsworth L., Cayan D., Fisher L., Ziaja S., et al. *Statewide Summary Report. California's Fourth Climate Change Assessment*. 2018. 116 p.
- Berg N., Hall A. Increased interannual precipitation extremes over California under climate change. *J. Clim.*, 2015, vol. 28, no. 16, pp. 6324–6334.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00624.1>
- California Adaptation Planning Guide 2020 Update*. The California Governor's Office of Emergency Services, 2020. 110 p.
- California Adaptation Planning Guide 2020 Update*. The California Governor's Office of Emergency Services, 2020. 280 p.
- California Adaptation Planning Guide*. Mather: The California Governor's Office of Emergency Services, 2012. 192 p.
- California Climate Adaptation Strategy*. California Natural Resources Agency, 2009. 92 p.
- California Forest Carbon Plan*. California Department of Forestry and Fire Protection, California Environmental Protection Agency, California Natural Resources Agency, 2018. 178 p.
- California State Wildlife Action Plan*. California Department of Fish and Wildlife, 2015. 803 p.
- California Transportation Plan 2040*. California Department of Transportation, 2016. 131 p.
- California Water Plan 2013 Update*. California Department of Water Resources. Vol. 1, 2013. 407 p.
- California Water Plan 2018 Update*. California Department of Water Resources, California Natural Resources Agency, 2018. 98 p.
- California Water Plan 2023 Update*. California Department of Water Resources, California Natural Resources Agency, 2023. 407 p.
- Caltrans Activities to Address Climate Change: Reducing Greenhouse Gas Emissions and Adapting to Impacts*. California Department of Transportation, 2013. 102 p.
- Climate Change Consortium for Specialty Crops: Impacts and Strategies for Resilience*. California Department of Food and Agriculture, 2013. 76 p.
- Climate vulnerability monitor: A guide to the cold calculus of a hot planet. In *DARA and the Climate Vulnerable Forum Climate Vulnerability Monitor*. Madrid-Geneva, 2012, pp. 17–19.
- Farber D.A. The challenge of climate change adaptation: Learning from national planning efforts in Britain, China, and the USA. *J. Environ. Law*, 2011, vol. 23, no. 3, pp. 359–382.
- Griggs G., Árvai J., Cayan D., et al. *Rising Seas in California: An Update on Sea-Level Rise Science*. California Ocean Science Trust, 2017. 102 p.
- Indicators of Climate Change in California*. Office of Environmental Health Hazard Assessment, California Environmental Protection Agency, 2018. 104 p.
- IPCC. *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pachauri, R.K., Reisinger A., Eds. Geneva: IPCC, 2007. 104 p.

- IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. R.K. Pachauri and L.A. Meyer, Eds. Geneva: IPCC, 2014. 163 p.
- Judge J., Newkirk S., Leo K., et al. *Case Studies of Natural Shoreline Infrastructure in Coastal California: A Component of Identification of Natural Infrastructure Options for Adapting to Sea Level Rise (California's Fourth Climate Change Assessment)*. Arlington: The Nature Conservancy, 2017. 38 p.
- Knowles N., Dettinger M.D., Cayan D.R. Trends in snowfall versus rainfall in the western United States. *J. Clim.*, 2018, vol. 19, no. 18, pp. 4545–4559. <https://doi.org/10.1175/JCLI3850.1>
- Leonard M., Pisani-Ferry J., Shapiro J., Tagliapietra S., Wolf G. The geopolitics of the European Green Deal. *Vestn. Mezhdun. Organ.*, vol. 16, no. 2, pp. 204–235. (In Russ.). <https://doi.org/10.17323/1996-7845-2021-02-10>
- Lyzhin D.N. U.S. Climate policy: issues and prospects for global leadership. *Probl. Nats. Strategii*, 2021, no. 3, pp. 221–245. (In Russ.). https://doi.org/10.52311/20793359_2021_3_221
- Medvedkov A.A. Adaptation to climate changes: global ecological and economic trend and its significance for Russia. *Vestn. Mosk. Univ., Ser.: Estest. Nauki*, 2018, no. 4, pp. 11–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.18384/2310-7189-2018-4-11-19>
- Medvedkov A.A., Kotova M.V. Fire-fighting capability of forests in water protection zone of lake Baikal (case study of Baikal-Lena Nature Reserve). *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2020, vol. 84, no. 5, pp. 764–775. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2587556620050118>
- Mote P.W., Li S., Lettenmaier D.P., Xiao M., Engel R. Dramatic declines in snowpack in the western US. *Npj Clim. Atmos. Sci.*, 2018, vol. 1, no. 2. <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0012-1>
- Nikulichev Yu.V. *Global'nye klimaticheskie izmeneniya. Novye vyzovy i geografiya izmenenii: spetsializirovannaya informatsiya* [Global Climate Change. New Challenges and Geography of Changes: Specialized Information]. Moscow: INION RAN, 2016. 45 p.
- Pierce D.W., Barnett T.P., Hidalgo H.G., Das T., Bonfils C., Santer B.D., Nozawa T. Attribution of declining western U.S. snowpack to human effects. *J. Clim.*, 2018, vol. 21, no. 23, pp. 6425–6444. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2405.1>
- Pierce D.W., Cayan D.R. The uneven response of different snow measures to human-induced climate warming. *J. Clim.*, 2013, vol. 26, no. 12, pp. 4148–4167. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00534.1>
- Pierce D.W., Cayan D.R., Kalansky J.F. *Climate, Drought, and Sea Level Rise Scenarios for the Fourth California Climate Assessment*. California's Fourth Climate Change Assessment, California Energy Commission, 2018. 86 p.
- Pierce D.W., Cayan D.R., Thrasher B.L. Statistical downscaling using localized constructed analogs (LOCA). *J. Hydrometeorol.*, 2014, vol. 15, no. 6, pp. 2558–2585. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0082.1>
- Porfiriev B.N., Terent'ev N.E., Zinchenko Yu.V. Planning for adaptation to climate change: World experience and opportunities for sustainable social and economic development in Russia. *Probl. Prognozir.*, 2023, vol. 34, no. 2, pp. 263–273. (In Russ.). <https://doi.org/10.47711/0868-6351-197-154-168>
- Preparing California for Extreme Heat: Guidance and Recommendations*. California's Climate Action Team, 2013. 24 p.
- Safeguarding California Plan: 2018 Update*. California Natural Resources Agency, 2018. 98 p.
- Safeguarding California: Reducing Climate Risk An update to the 2009 California Climate Adaptation Strategy*. California Natural Resources Agency, 2014. 112 p.
- Statewide Summary Report*. California's Fourth Climate Change Assessment, 2018. 132 p.
- Swain D.L., Langenbrunner B., Neelin J.D., Hall A. Increasing precipitation volatility in twenty-first-century California. *Nat. Clim. Change*, 2018, vol. 8, no. 5, pp. 427–433. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0140-y>
- Thorne J., Choe H., Boynton R., Bjorkman J., Albright W., Nydick K., Flint A., Flint L., Schwartz M. The impact of climate change uncertainty on California's vegetation and adaptation management. *Ecosphere*, 2017, vol. 8, no. 12, art. e02021. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2021>
- Williams A., Abatzoglou J., Gershunov A., Guzman-Morales J., Bishop D., Balch J., Lettenmaier D. Observed Impacts of Anthropogenic Climate Change on Wildfire in California. *Earth's Future*, 2019, vol. 7. <https://doi.org/10.1029/2019EF001210>

АДАПТАЦИЯ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА:
ОПЫТ СТРАН И РЕГИОНОВ

УДК 502.35;504.052

ДОСТИЖЕНИЕ НЕЙТРАЛЬНОГО БАЛАНСА ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ
КАК ИНДИКАТОР АДАПТАЦИИ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ
К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА В ПРИКАСПИЙСКОМ РЕГИОНЕ

© 2024 г. Г. С. Куст^{1, *}, В. А. Лобковский¹, О. В. Андреева¹, Д. С. Шкляева¹

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: kust@igras.ru

Поступила в редакцию 06.12.2023 г.

После доработки 08.04.2024 г.

Принята к публикации 16.05.2024 г.

В данной работе рассматривается возможность использования показателей нейтрального баланса деградации земель (НБДЗ) как интегрального индикатора оценки адаптации наземных экосистем к изменениям климата. В качестве объекта исследования рассматриваются примыкающие к Каспию административно-территориальные единицы стран Прикаспийского региона, в пределах которых проводился анализ достижения НБДЗ. Отмечается, что ведущую роль в общей оценке НБДЗ для территории Прикаспия играет динамика продуктивности земель. По результатам расчетов выявлено, что состояние земель на значительной части территории Прикаспия улучшилось за период 2016–2020 гг. по сравнению с базовым периодом оценки 2001–2015 гг. Это позволяет сделать вывод, что в целом продуктивность земель за этот период является сравнительно высокой, что подтверждает высокий потенциал адаптации к изменениям климата последних лет. Интенсификация эксплуатации пастбищных систем, природных пустынь и пахотных земель приводит к их усиленной деградации несмотря на то, что значительная часть остается стабильной в отношении изменений природной среды и климата. Некоторая часть природных пустынь и пастбищ (вероятно, при снижении антропогенной нагрузки), а также пахотных земель (очевидно, в случае применения приемов устойчивого землепользования) испытывает тенденцию к улучшению, однако их доля в регионе невелика. Лесопокрываемые земли занимают значительную часть среди улучшенных земель, поэтому можно утверждать, что успешные практики лесопользования здесь имеют приоритет и высокую эффективность в области адаптации. Отмеченные тенденции в динамике земель и их продуктивности хорошо согласуются с фиксируемыми и прогнозируемыми изменениями климата в Прикаспийском регионе. Это позволяет в целом положительно оценить опыт использования в Прикаспийском регионе концепции НБДЗ для оценки адаптации к изменению климата.

Ключевые слова: адаптация к изменению климата, устойчивое землепользование, аридные и семи-аридные области, Каспийский регион, деградация земель, нейтральный баланс деградации земель

DOI: 10.31857/S2587556624030149 EDN: SNGUYC

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

После подписания Парижского соглашения по климату¹ вопросы адаптации к изменениям климата (ИК) вышли в число первостепенных в национальных и региональных повестках дня. Согласно этому документу, “адаптация представляет собой глобальный вызов, стоящий перед всеми в местном, субнациональном, ре-

гиональном и международном измерениях”, и является “ключевым компонентом долгосрочного глобального реагирования на изменение климата в целях защиты людей, средств к существованию и экосистем”. Цели устойчивого развития ООН, изложенные в Повестке дня на период до 2030 г.,² предусматривают: 1) включить меры реагирования на изменение

¹ Парижское соглашение в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата. https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian_.pdf (дата обращения 01.11.2023).

² Система глобальных показателей достижения целей в области устойчивого развития и выполнения задач Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 г. https://unstats.un.org/sdgs/indicators/Global%20Indicator%20Framework%20after%20refinement_Rus.pdf (дата обращения 01.11.2023).

климата в политику, стратегии и планирование на национальном уровне, включая национальный *адаптационный план* (показатель ЦУР 13.2.1); 2) включить вопросы смягчения остроты и ослабления последствий изменения климата, *адаптации к ним* и раннего предупреждения в учебные программы (ЦУР 13.3.1); 3) укрепить возможности для осуществления мер *в области адаптации к климатическим изменениям*, смягчения их последствий и передачи и развития технологии (показатель ЦУР 13.3.2). Решение 15 Конференции Сторон Конвенции ООН по борьбе с опустыниванием (КБО ООН) рекомендует развивать сотрудничество с соответствующими органами, учрежденными в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата, а также с соответствующими научными и техническими партнерами для подготовки дополнения к национальному плану адаптации, разработке технических руководящих принципов по содействию усилиям по борьбе с опустыниванием/деградацией земель и засухой, достижению нейтрального баланса деградации земель и процессом разработки и реализации национальных планов адаптации в соответствии с Рамочной конвенцией ООН об изменении климата и Парижским соглашением³. Совместное заявление президентов Рамочной конвенции ООН по изменению климата, Конвенции о биологическом разнообразии и КБО ООН, сделанное в октябре 2023 г.,⁴ подтверждает необходимость совместных действий по адаптации.

Согласно Национальному стандарту Российской Федерации ГОСТ Р 54139—2010⁵, под адаптацией к ИК понимаются “стратегии, направления политики и меры, осуществляемые с целью уменьшения потенциальных неблагоприятных воздействий на здоровье человека, связанных с изменением климата”. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р ИСО 14090—2019⁶ предлагает под адаптацией к изменениям климата понимать: “процесс корректировки под реально существующий климат или прогнозируемое состояние климата и его воздействия”. Национальный план мероприятий

второго этапа адаптации к изменениям климата на период до 2025 г. утвержден Распоряжением Правительства РФ от 11 марта 2023 г. № 559-р⁷. Однако, ни в одном из этих документов, несмотря на серьезные рекомендации по действиям в области адаптации, не приводится понимание того, как следует оценивать эффективность адаптационных мероприятий. Нет индикаторов адаптации к изменениям климата, основанных на прокси-предложениях ЦУР, и в системе Росстата. По состоянию на начало ноября 2023 г.⁸ ни один из восьми показателей ЦУР по климатической цели 13 в России не разрабатывается.

Несмотря на то, что большое число научных работ отечественных и зарубежных ученых посвящено проблеме адаптации к ИК, пока нет прямого ответа на вопрос: как оценить — адаптировался ли тот или иной сектор экономики, территория, хозяйство, конкретное лицо или группа к ИК или нет?

Вместе с тем определенные подходы к ответу на этот вопрос есть. Так, в (Природопользование ..., 2006) рассматривается возможность использования с этой целью средообразующих экосистемных услуг; ряд идей по оценке достижения состояния адаптации на основе экологических подходов (ecosystem-based adaptation) можно найти в международных изданиях⁹. Европейская платформа адаптации к климату Climate-ADAPT¹⁰ рассматривает набор из нескольких десятков возможных индикаторов, лежащий в основе “Стратегии ЕС по адаптации к изменению климата” (2013)¹¹, в которой представлены основные проблемы и предложения для их решения. Однако эти индикаторы скорее являются показателями собственно изменений климата, а не адаптации к ним. Многие международные организации развития (UNDP, World Bank, FAO) рассматривают проблему адаптации и соответствующих индикаторов через призму сообществ (community-based adaptation), оценивая изменения в их социально-экономиче-

³ UNCCD Decision 20/COP.15 para 4. <https://www.unccd.int/official-documents/cop-15-abadjan-cote-divoire-2022/documents/20cop15> (дата обращения 01.11.2023).

⁴ UNFCCC documents: Joint Statement of the Presidents. Publication date 09 Nov 2023. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/joint_statement_unccd_cop15_cbd_cop15_unfccc_cop27.pdf.

⁵ ГОСТ Р 54139—2010 Национальный стандарт РФ. Экологический менеджмент. Руководство по применению организационных мер безопасности и рисков. Изменение климата. <https://base.garant.ru/70350532/> (дата обращения 01.11.2023).

⁶ ГОСТ Р ИСО 14090—2019 Национальный стандарт РФ. Адаптация к изменениям климата. Принципы, требования и руководящие указания (утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 сентября 2019 г. № 674-ст). <https://base.garant.ru/400227239/> (дата обращения 01.11.2023).

⁷ Распоряжение Правительства РФ от 11.03.2023 № 559-р “Об утверждении национального плана мероприятий второго этапа адаптации к изменениям климата на период до 2025 года”. <http://static.government.ru/media/files/DzVPGH7JgT7QYRoogphpW69KKQREGTB.pdf> (дата обращения 01.11.2023).

⁸ Статус разработки показателей ЦУР. Федеральная служба государственной статистики. <https://rosstat.gov.ru/sdg/reporting-status> (дата обращения 01.11.2023).

⁹ Рекомендация, принятая вспомогательным органом по научным, техническим и технологическим консультациям. 22/7. Биоразнообразие и изменение климата: подходы с позиций экосистем к адаптации к изменению климата и уменьшению опасности стихийных бедствий. <https://www.cbd.int/doc/recommendations/sbstta-22/sbstta-22-rec-07-ru.pdf> (дата обращения 01.11.2023).

¹⁰ Indicators in Climate-ADAPT. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/knowledge/c-a-indicators> (дата обращения 01.11.2023).

¹¹ EU Adaptation Strategy. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/adaptation-climate-change/eu-adaptation-strategy_en (дата обращения 01.11.2023).

ской уязвимости к серии воздействий и адаптационную емкость¹². Определенные косвенные указания на использование серии индикаторов состояния почвенных систем для целей адаптации к ИК отражены в Национальных докладах (Национальный ..., 2018; Национальный ..., 2019). Ряд возможных подходов описаны также во втором и третьем оценочных докладах об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации¹³. В качестве оценки эффективности антропогенной адаптации экосистем предлагалось использовать значение изменения общего запаса углерода, который не должен быть отрицательным в расчете на единицу площади (Романовская, 2018). Однако и этот индикатор, при его безусловной важности, в значительной степени отражает не столько адаптационные аспекты, сколько митигационные, указывая на сохранение баланса в запасах углерода. Ближе всех к пониманию проблемы индикаторов адаптации к изменениям климата, на наш взгляд, подошли (Pearce-Higgins et al., 2022), предлагая для отслеживания прогресса в адаптации к изменению климата рассматривать структуру с тремя типами экологических индикаторов, основанных на процессах: показатели исходных условий (inputs), действий и процессов (activities) и непосредственных результатов (outputs), и двумя типами индикаторов, основанных на результатах оценки отдаленных результатов (outcomes) и воздействий (impacts). Авторы подчеркивают важность динамической оценки, когда устанавливаются новые цели адаптации и/или когда внешние воздействия контролируются и оцениваются. Эти подходы позволили предложить достаточно стройную систему для оценки адаптации к ИК охраняемых природных территорий, состоящую из двух бло-

ков: (а) индикаторы для оценки защиты и улучшения охраняемых территорий и других местообитаний, и (б) индикаторы для отслеживания восстановления деградированных экосистем, а также расширения местообитаний.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

В данной работе мы поставили целью для поиска и подбора интегрального индикатора адаптации к изменениям климата наземных экосистем рассмотреть возможность использования подходов концепции нейтрального баланса деградации земель (НБДЗ. Land Degradation Neutrality, LDN). Развитием этой концепции авторы занимаются с момента разработки определения НБДЗ, которое было утверждено на 12 Конференции сторон КБО ООН¹⁴ — это такое “состояние, при котором объем и количество земельных ресурсов, необходимых для поддержания экосистемных функций и услуг, и усиления продовольственной безопасности, остаются стабильными или же увеличиваются в конкретно определенных временных и пространственных масштабах и экосистемах”. Общая идея, заложенная в концепцию НБДЗ, заключается в том, чтобы не допустить увеличения количества ухудшенных земель по сравнению с выбранным базовым периодом в пределах конкретных территорий. Нетрудно заметить, что понятие НБДЗ включает в себя практически все из рекомендованных многими авторами подходов и требований к индикаторам адаптации к ИК: отражать не только фактическое состояние, но и динамику происходящих изменений, быть “основанным на экосистемах”, учитывать экосистемные услуги, социально-экономические требования и обстоятельства, и одновременно — интегрировать серию возможных индикаторов, как глобально-го уровня, так и специфических для конкретных территорий, отражающих их природные и социально-экономические особенности. Напомним, что так называемые глобальные прокси-индикаторы НБДЗ включают в себя: динамику наземного покрова, динамику продуктивности земель, динамику запасов почвенного органического углерода. Интегральный учет этих индикаторов проводится по принципу всеобщего охвата (one-out-all-out) и реализуется в итоге в индикаторе ЦУР 15.3.1 — доля деградированных земель от общей площади территории. На региональном, национальном и местном уровнях допускается использовать дополнительные индикаторы или

¹² Climate Change Adaptation in Africa. UNDP Synthesis of Experiences and Recommendations Africa. 2018. <https://www.thegef.org/sites/default/files/publications/CCA-Africa-Final.pdf> (дата обращения 01.11.2023); Climate change adaptation and economic transformation in Sub-Saharan Africa. 2021. <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/34f98cfe-b27b-58ad-a0cb-99568577e730/content> (дата обращения 01.11.2023); Strategy on climate change 2022–2031. FAO, 2022. <https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2023/07/cc2274en.pdf> (дата обращения 01.11.2023); Шмелева И.А. Международный опыт в вопросах управления адаптацией к изменениям климата. <https://climatescience.ru/articles/5e9ef5ddc810400019470e50> (дата обращения 01.11.2023); Шмелева И.А. Международный опыт в вопросах управления адаптацией к изменениям климата. <https://climatescience.ru/articles/5e9ef5ddc810400019470e50> (дата обращения 01.11.2023).

¹³ Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. https://cc.voeikovmgo.ru/ru/?option=com_content&view=article&id=121 (дата обращения 01.11.2023); Третий оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. <https://cc.voeikovmgo.ru/ru/publikatsii/doklady/14-dokumenty/1992-tretij-otsenochnyj-doklad-rosgidrometa-ob-izmeneniyakh-klimata-i-ikh-posledstviyakh-na-territorii-rossijskoj-federatsii-2022-g> (дата обращения 01.11.2023).

¹⁴ UNCCD, 2015. Integration of the Sustainable Development Goals and targets into the implementation of the United Nations Convention to Combat Desertification and the report of the Intergovernmental Working Group on Land Degradation Neutrality. ICCD/COP(12)/4. https://www.unccd.int/sites/default/files/sessions/documents/ICCD_COP12_4/eng.pdf (дата обращения 01.11.2023).

индикаторы-аналоги, с учетом особенностей конкретной территории (Kust et al., 2017; Orr et al., 2017; UNCCD, 2015¹⁵).

Несмотря на то, что в применении концепции НБДЗ для оценки деградации земель и опустынивания в Российской Федерации и сопредельных странах есть ряд проблем (Беляева и др., 2020; Kust et al., 2018), в серии недавних работ (Andreeva et al., 2021, 2022) мы показали, что при определенных ограничениях состояние НБДЗ может быть успешно использовано как критерий отнесения систем землепользования к “устойчивым”. Были выделены классы и типы землепользования, определено понятие “моделей устойчивого землепользования” и способы визуализации этих семантических моделей УЗП. В другом исследовании (Sanz et al., 2017) мы показали, что практики УЗП, будучи правильно подобранными, играют решающую роль не только в достижении НБДЗ, но и в адаптационных процессах. С учетом успешности результатов этих исследований, выразившихся в описании иерархии моделей и практик землепользования для определенных территорий и отраслей, схожести содержательного соответствия понятий устойчивого землепользования и адаптации к изменениям климата, а также подходов к их оценке, близости мероприятий по адаптации и/или повышению и поддержанию устойчивости землепользования в основных секторах экономики, мы решили сформулировать *рабочую гипотезу о том, что достижение состояния НБДЗ может служить надежным критерием адаптации наземных экосистем к изменениям климата*. Проверка этой гипотезы на примере Прикаспийского региона определила главные задачи работы: 1) исследовать динамику достижения НБДЗ в ключевых областях прикаспийских государств; 2) в предварительном порядке выявить возможные ограничения на использование НБДЗ и его индикаторов для оценки адаптации к ИК в Прикаспийском регионе; 3) сравнить прогнозируемые последствия изменений климата в исследуемом регионе с наблюдаемой динамикой глобальных индикаторов деградации земель.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Проводилось обследование административно-территориальных единиц стран, имеющих выход к Каспийскому морю — в Российской Федерации: Республики Дагестан и Калмыкия, Астраханская и Волгоградская области; в Ре-

спублике Казахстан: Западно-Казахстанская, Атырауская и Мангистауская области; в Туркменистане: Балканский велаят; в Исламской Республике Иран: провинции Гилян, Мазендеран и Голестан; в Азербайджанской Республике: экономические районы Ленкорань-Астаринский, Бакинский, Губа-Хачмазский, Абшерон-Хызынский, Ширван-Сальянский.

Прикаспийский регион неоднороден по своим климатическим и ландшафтным характеристикам, поэтому адаптационный потенциал территорий различается: мягкий, теплый и влажный климат характерен для иранской части, более сухие условия отмечаются на побережье Каспия и в предгорьях Кавказа на территории Азербайджана и российского Дагестана, экстрааридные пустынные условия характерны для Балканского велаята Туркменистана, относительно холодные зимы в сочетании с полупустынными условиями отмечаются в Северной части Прикаспия в России и Казахстане, за исключением территорий дельт Волги и других рек. Каспийское море играет важную роль в атмосферных процессах, региональном водном балансе и микроклимате региона. Климатические явления здесь связаны с Североатлантической осцилляцией (колебаниями атмосферного давления воздуха), влияющей на температуру, влажность и зимние ураганы (Семенов, Черенкова, 2018; Черенкова и др., 2020).

Оценку деградации земель и достижения НБДЗ проводили с помощью методологических подходов, описанных ранее (Andreeva and Kust, 2020; Kust et al., 2018; Orr et al., 2017; Sims et al., 2021). Для расчетов и картографических построений использовали рекомендованный со стороны КБО ООН ГИС-модуль Trends.Earth (версия плагина 1.0.10), реализованный в приложении Quantum-GIS (версия Firenze 3.28.11)¹⁶. В соответствии с этой методологией, глобальный индикатор деградации земель ЦУР 15.3.1 оценивается на основе сравнения трендов за рассматриваемый период (градации “ухудшение”, “стабильность”, “улучшение”) по значениям трех субиндикаторов — динамики наземного покрова, продуктивности земель и запасов почвенного органического углерода. При любом уровне оценки важным является использование принципа “полного охвата” (one out—all out), т.е. негативное значение динамики любого из принятых индикаторов указывает на деградацию земель за рассматриваемый временной период. Такой подход позволяет получать информацию о деградации земель практически для любого участка земной поверхности в динамике, в срав-

¹⁵ UNCCD, 2015. Integration of the Sustainable Development Goals and targets into the implementation of the United Nations Convention to Combat Desertification and the report of the Intergovernmental Working Group on Land Degradation Neutrality. ICCD/COP(12)/4. https://www.unccd.int/sites/default/files/sessions/documents/ICCD_COP12_4/4eng.pdf (дата обращения 01.11.2023).

¹⁶ Trends.Earth. A new tool to assess the health of the land that supports us. <https://www.conservation.org/about/trends-earth> (дата обращения 01.11.2023).

нении с принятым исходным состоянием — базовой линией. Trends.Earth на основании ряда встроенных алгоритмов позволяет в полуавтоматическом режиме рассчитывать эти субиндикаторы на основе использования международных баз данных ESA-CCI—LC210¹⁷, SoilGrids¹⁸ и материалов дистанционного зондирования Земли из космоса. Подробное описание подбора необходимых данных, составления временных рядов для оценки и способов обработки информации содержится в (Sims et al., 2021) и описании модуля Trends.Earth¹⁹.

Для целей нашего исследования особый интерес представляет вычислительный продукт (набор методов и алгоритмов) Объединенного исследовательского центра (JRC) Европейской комиссии, известный под названием “Динамика продуктивности земель” (LPD, Land Productivity Dynamics) как часть Trends.Earth. Одним из самых надежных способов оценки продуктивности земель считаются вегетационные индексы, получаемые на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса²⁰. Одним из таких индексов является нормализованный относительный индекс растительности (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), использующийся в расчетном модуле Trends.Earth. NDVI представляет собой частное от деления разности отраженного инфракрасного излучения и излучения красного диапазона видимого спектра на их сумму (Phillips et al., 2008). LPD на глобальном уровне классифицирует наблюдения за продуктивностью растений, указывая на их уровень и тенденции изменений времени. Trends.Earth позволяет рассчитывать эти классы на основе наборов временных данных, включая индексы растительности, представляемые на базе MODIS²¹ (MOD31Q1, MYD13Q1, 250 м в пикселе, 16-дневный период интеграции с 2000 г.) и Copernicus Global Land Service NDVI²² (1 км годовые глобальные композиты, с 1998 г.). MOD13Q1 интегрирует наблюдения NDVI (и EVI1) с разрешением 250 м в пикселе за 16-дневные периоды

и строит годовые композиты по периодам с наибольшими значениями NDVI, наименьшим углом обзора и самой низкой облачностью в пределах каждого пиксела для выбранного периода времени. LPD²³ предполагает, что такой период для расчета чистой первичной продуктивности (Net Primary Productivity, NPP) наилучшим способом описывается подмножеством наблюдений, сделанных в период ежегодной максимальной вегетации каждый год. С этой целью рассчитывается интеграл продуктивности в течение вегетационного периода. Для тропических регионов или районов со слабым растительным покровом (пустыни, горы, пустоши) сезоны для оценки в каждый конкретный год определяются на основе ожидаемого периода наибольшей биомассы, периода наименьшей облачности или произвольного периода, выбранного так, чтобы он подтверждался полевыми данными. Обычно такой период приходится на каждый год для конкретных мест примерно в одно и то же время.

В целях отработки рабочей гипотезы важное значение имел выбор специфических подходов к анализу продуктивности. В нашей работе для анализа динамики продуктивности Прикаспийского региона мы впервые применили дифференцированную оценку продуктивности, реализованную в Trends.Earth и основанную на совокупном учете трех показателей (субиндикаторов) продуктивности: тенденции, уровня (состояния) и эффективности (проявления) продуктивности (productivity trend, productivity state и productivity performance). Алгоритм совместного использования этих показателей представлен в табл. 1. Однако индивидуальные картосхемы, полученные для отдельных показателей, также представляют важную информацию для оценки адаптационной способности земель исследуемого региона. Дело в том, что если по индикатору NDVI можно рассчитать площадь территорий, где происходит увеличение или снижение продуктивности, а также площадь земель, на которых не было выявлено изменений продуктивности за исследуемый период, то при анализе деградации земель в засушливых областях расчеты на основе NDVI могут содержать определенные неточности в силу того, что растительность в аридных областях обладает разреженным характером. Более того, по данному индикатору невозможно получение данных о состоянии земель на территориях, где растительность отсутствует полностью, особенно при использовании данных ДЗЗ с низким пространственным разрешением (Hu et al., 2020).

Для определения “тенденции” в модуле Trends.Earth используется метод линейной ре-

¹⁷ European Space Agency climate change initiative land cover — Проект о наземном покрове Инициативы по изменению климата Европейского космического агентства. <https://esa-landcover-cci.org/> (дата обращения 01.11.2023).

¹⁸ SoilGrids — система глобального цифрового картографирования почв. <https://soilgrids.org/> (дата обращения 01.11.2023).

¹⁹ Trends.Earth. A new tool to assess the health of the land that supports us. <https://www.conservation.org/about/trends-earth> (дата обращения 01.11.2023).

²⁰ SDG indicator metadata for indicator SDG 15.3.1. Harmonized metadata template — format version 1.1. 2022. <https://landportal.org/library/resources/metadata-sdgs-indicator-1531> (дата обращения 01.11.2023).

²¹ MODIS Vegetation Index Products. <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod13.php> (дата обращения 01.11.2023).

²² Copernicus Global Land Service NDVI. <https://land.copernicus.eu/global/products/ndvi> (дата обращения 01.11.2023).

²³ WAD — World Atlas of Desertification. <https://wad.jrc.ec.europa.eu/landproductivity> (дата обращения 01.11.2023).

Таблица 1. Классы динамики продуктивности на основании интегральной оценки трех субиндикаторов в приложении Trends.Earth

Показатели продуктивности земель			Индикатор динамики продуктивности земель (5 классов)	Итоговый индикатор динамики продуктивности земель (3 класса)
Тенденция	Уровень	Эффективность		
Улучшение	Улучшение	Стабильность	Улучшение	Улучшение
		Ухудшение		
	Стабильность	Стабильность		
		Ухудшение		
	Ухудшение	Стабильность	Умеренное ухудшение	Ухудшение
		Ухудшение		
Стабильность	Улучшение	Стабильность	Стабильность	Стабильность
		Ухудшение		
	Стабильность	Стабильность	Угнетение (риск)	
		Ухудшение		
	Ухудшение	Стабильность	Умеренное ухудшение	
		Ухудшение		
Ухудшение	Улучшение	Стабильность	Ухудшение	Ухудшение
		Ухудшение		
	Стабильность	Стабильность		
		Ухудшение		
	Ухудшение	Стабильность		
		Ухудшение		

грессии на уровне каждого пиксела. Идентификация трендов происходит на основе среднегодовых значений NDVI, полученных путем усреднения данных NDVI с интервалом в 16 дней. Если в пикселе в заданный временной промежуток значения NDVI возрастают, то в пределах данного пиксела состояние земель улучшается. Напротив, если можно заключить, что в конкретном пикселе в течение определенного промежутка времени среднегодовые значения NDVI снижаются, считается, что в границах этого пиксела происходит ухудшение состояния земель²⁴. Иными словами, показатель тенденции продуктивности предполагает анализ временных рядов NDVI с помощью линейной регрессии.

Показатель “эффективности” продуктивности предполагает анализ NDVI не во временном, а в пространственном масштабе. При определении данного показателя продуктивность на заданной территории сравнивается с продуктивностью территорий, схожих по растительному, наземному покровам, и биоклиматическим характеристикам. Для этого в модуле Trends.Earth

используются данные SoilGrids²⁵ о характере почвенного покрова и карты наземного покрова ESA CCI LC²⁶. Усредненные значения NDVI в пределах каждого пиксела за анализируемый промежуток времени сравнивается с продуктивностью схожих по природным характеристикам участков, для которых рассчитывается максимальное значение NDVI – 90-й процентиль частотного распределения значений NDVI в пределах участка, выбранного для сравнения (или значение NDVI, выше которого находятся 10% от всех значений NDVI в пределах участка). По отношению NDVI анализируемого пиксела и максимального значения NDVI (90-го перцентиля) в пределах выбранного участка судят о продуктивности: если полученное соотношение меньше 0.5, то земли в пределах рассматриваемого пиксела считаются ухудшенными.

Наконец, с помощью субиндикатора “уровня” продуктивности возможно выявление недавних изменений в значениях NDVI по сравнению с базовым периодом. На основе гистограммы распределения частот встречаемости среднегодовых значений NDVI базового

²⁴ Trends.Earth. A new tool to assess the health of the land that supports us. <https://www.conservation.org/about/trends-earth> (дата обращения 01.11.2023).

²⁵ SoilGrids. <https://soilgrids.org/> (дата обращения 01.11.2023).
²⁶ European Space Agency climate change initiative land cover – Проект о наземном покрове Инициативы по изменению климата Европейского космического агентства (<https://esa-landcover-cci.org/>) (дата обращения 01.11.2023).

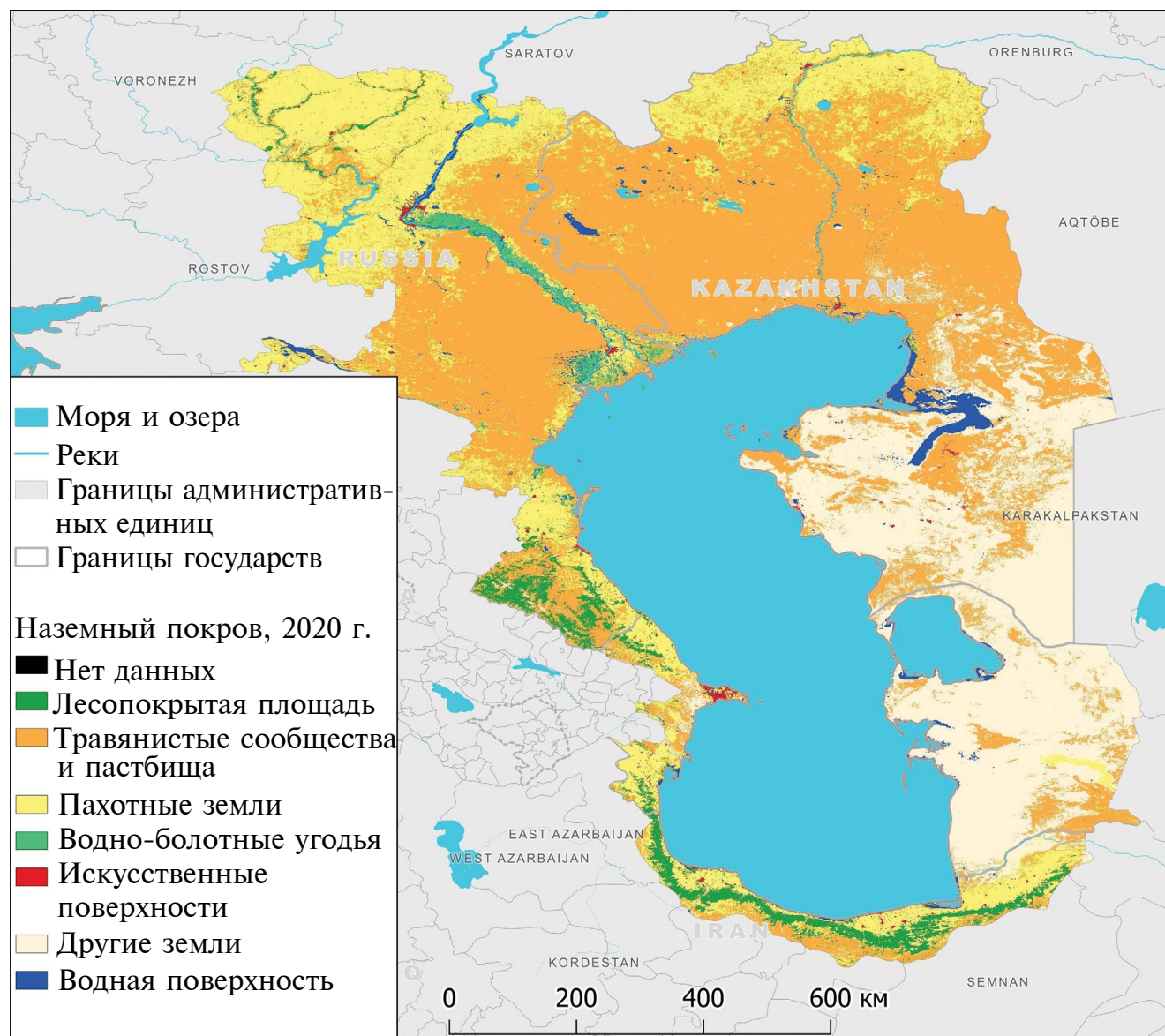


Рис. 1. Наземный покров исследуемого региона по состоянию на 2020 г.

периода и мониторингового периода для каждого пикселя определяется дециль (от 1 до 10), к которому это среднее значение относится. Разность между номером класса, присвоенного мониторинговому периоду, и номером класса, присвоенного базовому периоду, позволяет судить об “уровне” продуктивности: если разность между номерами классов превышает две единицы, то состояние земель в пределах данного пикселя считается улучшенным. Если разность между классами меньше двух, то, скорее всего, в границах пикселя состояние земель ухудшилось. Разность от -1 до 1 означает отсутствие изменений в состоянии земель. Иначе говоря, чем меньше среднее значение NDVI периода 2016–2020 гг. по сравнению со значениями NDVI базового периода (2001–2015 гг.), тем больше вероятность деградации, и наоборот.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика достижения НБДЗ в Прикаспийском регионе

Наземный покров исследуемой территории (рис. 1) почти наполовину представлен лугами и пастбищами, около 20% занимают пахотные земли, расположенные в основном в российской и казахстанской частях. Пустынные области (в основном классифицируемые как “другие земли”) занимают более четверти площади региона (рис. 2). Лесные земли занимают в основном предгорья Кавказа на западе и склоны Эльбурса – на юге региона.

Общая оценка деградации земель и достижения НБДЗ в исследуемом регионе Прикаспия приведена нами в работе (Kust et al., 2021). Кратко напомним, что при сравнении современно-

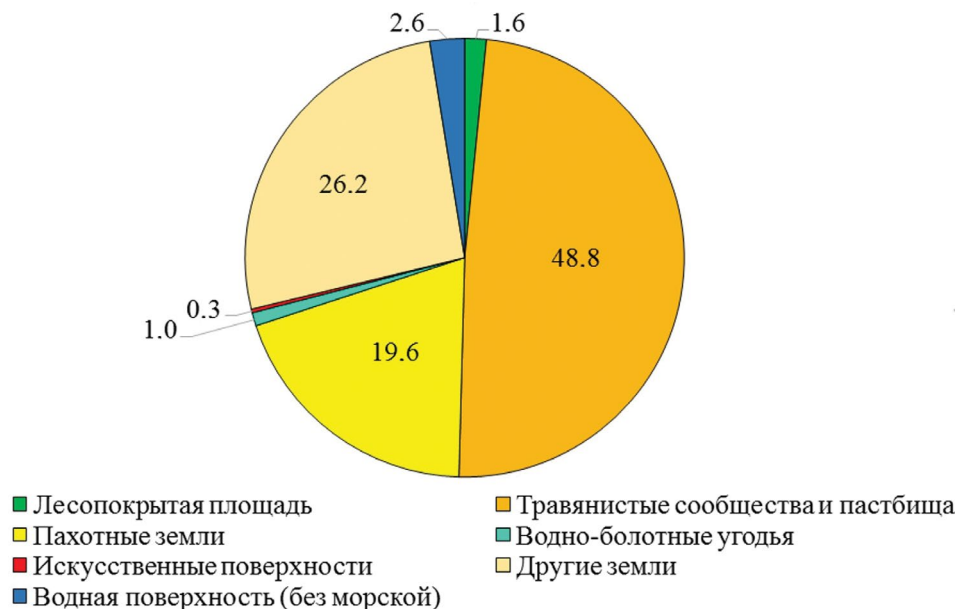


Рис. 2. Типы наземного покрова исследуемой территории, % от общей площади.

го состояния земель (усредненные данные за 2016–2020 гг.) с базовым периодом (усредненные данные за 2001–2015 гг.), минимальные доли деградированных земель отмечены в рассматриваемых провинциях Ирана (5.9% от площади всех земель), максимальные – в исследуемых областях Казахстана (до 52.7%). Для земель Туркменистана, России и Азербайджана этот показатель имеет значения 9.5, 23.7 и 33.2% соответственно. Индекс НБДЗ (разница между долями улучшенных и ухудшенных земель) (Andreeva, Kust, 2020) с разбивкой по административно-территориальным единицам за рассматриваемый период на рис. 3 показывает, что в наибольшей степени деградации земель подвержена территория Казахстана, а также предгорные районы Большого Кавказа и Кура-Араксинской низменности, что в основном соответствует Северному и Северо-Восточному Прикаспию (индекс НБДЗ от –59.7 до –44.7%). Деградации земель в умеренной степени подвержены равнинные и низинные территории России, Восточный Кавказ и Апшеронский полуостров, что соответствует Северо-Западному и Западнему Прикаспию (индекс НБДЗ составляет от –30.4 до –16.8%). Наиболее благоприятное состояние земель наблюдается на восточных склонах Талышских гор, в предгорных районах и на северных склонах Эльбурса, а также в Балканском веляте или в Южном и Юго-Восточном Прикаспии (индекс НБДЗ от –5.6 до 11.9%).

Динамика продуктивности земель в Прикаспийском регионе

Расчеты “тенденции” продуктивности земель, полученные методами линейной регрес-

сии для каждого пиксела, показывают (рис. 4), что в северной и центральной частях Прикаспия на равнинных пастбищных и пахотных угодьях доминируют отрицательные (указывающие на деградацию земель) тенденции продуктивности, за исключением затопляемых маршевых ландшафтов в районе залива Мертвый Култук. В южной части преобладают положительные тренды, преимущественно связанные с возрастанием лесистости горных склонов и улучшением земледельческих практик и управления землепользованием в иранской и азербайджанской части региона. В туркменской части наблюдаемые положительные тренды NDVI связаны с одной стороны – с закреплением песков и солончаков в районе залива Туркменбаши, а с другой – с отступанием береговой линии мелководного залива, зарастанием новой суши влаголюбивыми галофитами.

Результаты расчета субиндикатора “эффективности” продуктивности (рис. 5), наоборот, демонстрируют негативное состояние продуктивности, несмотря на относительное “позеленение” ряда ландшафтов, отмечаемое на рис. 4. Среди таких участков в основном отмечают приуроченные к обсыхающим засоленным понижениям морских маршей и коллекторно-сбросных озер, а также некоторые участки деградированных предгорных пастбищ, зарастающих сорной растительностью, ряд пустынных пастбищ, испытывающих дополнительную техногенную нагрузку.

На карте-схеме, отражающей состояние “уровня” продуктивности (рис. 6), хорошо прослеживаются недавние изменения в значениях NDVI по сравнению с базовым периодом. По

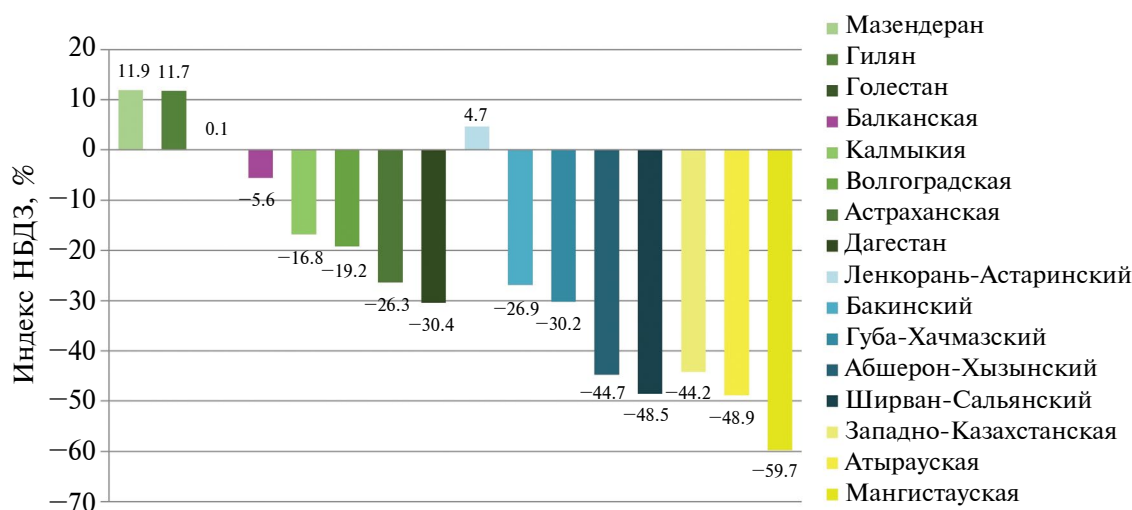


Рис. 3. Ранжирование административно-территориальных единиц первого порядка в странах Прикаспийского региона по индексу НБДЗ, рассчитанному за период 2016–2020 гг. (базовый период 2001–2015 гг.).

этому показателю значительную часть территории Прикаспия следует характеризовать положительно. Широкое распространение земель, состояние которых улучшилось за 2016–2020 гг. по сравнению с базовой линией, позволяет сделать следующий вывод: несмотря на наметившиеся тренды снижения продуктивности земель за тот же период, показанные на рис. 4, продуктивность в целом в регионе была сравнительно высокой, что подтверждает высокий потенциал адаптации к изменениям климата последних лет, в том числе и в областях, где “эффективность” продуктивности отличается ухудшением.

Интегральная картина, основанная на совокупном учете трех индикаторов продуктивности (согласно алгоритму, приведенному в табл. 1),

позволяет охарактеризовать потенциал адаптации земель к изменениям природной среды и климата более детально, с учетом имеющихся рисков, характерных для определенного расчетного периода, и продемонстрировать картографическое распределение соответствующих классов динамики продуктивности (рис. 7).

На основании картографического анализа интегральной карты-схемы, представленной на рис. 7, на фоне общей относительной стабильности региона к изменениям природной среды и климата (61.7% анализируемой территории), деградационные тренды преобладают и охватывают в общей сложности 29.2% площади региона, умеренно ухудшенные и угнетенные – по 3.4%. Незначительные участки улучшения, расположенные в основном в южной части Прикаспия, занимают всего около 1.9%. Для 0.4% анализируемой территории недостаточно данных для достоверного анализа трендов. Вместе с тем, более детальный анализ переходов земель в пределах выделенных интегральных классов динамики продуктивности показывает, что поддержание и изменение адаптационного потенциала и рисков деградационных изменений в пределах этих классов происходит неравномерно. Так, даже в пределах относительно стабильных по продуктивности экосистем наиболее яркие тенденции проявляются в виде перехода травянистых систем в пахотные земли (более 1.2% земель этого класса продуктивности), пустынных систем – в пастбищные угодья (более 0.3%). Для деградированных земель наиболее характерны переходы травянистых систем в пашню (более 10% земель этого класса), и пустынных систем – в деградированные пастбища (около 8.5%). Те же тенденции характерны для умеренно-ухудшенных земель – 6% земель, перешедших из травянистых систем в пахотные.

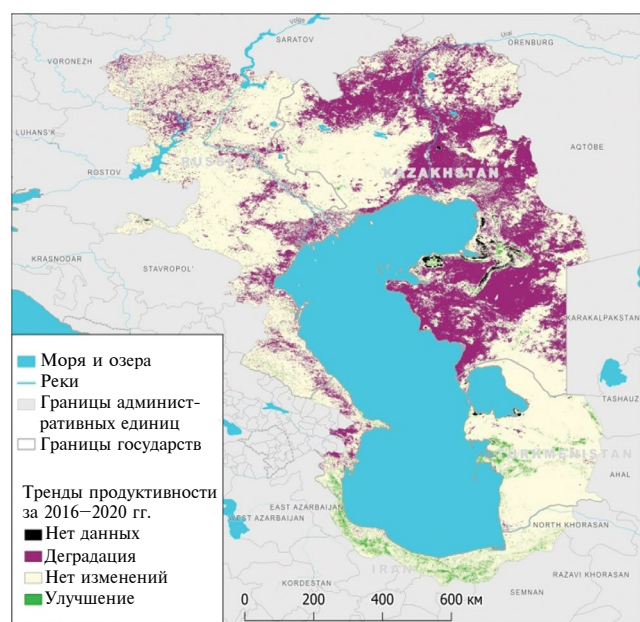


Рис. 4. “Тенденции” продуктивности земель: усредненные данные за период 2016–2020 гг.



Рис. 5. “Эффективность” продуктивности земель: сравнение усредненных значений NDVI по состоянию за период 2016–2020 гг. со значениями NDVI территорий, аналогичных по природным характеристикам.

Среди угнетенных и улучшенных земель не отмечается значимых долей переходов земель из одного типа в другой.

Интересную информацию представляет также и анализ состава земель разных классов продуктивности (табл. 2). В составе улучшенных земель преобладают природные пустыни, лесные, пахотные земли и травянистые сообщества. Категория стабильных земель представлена в основном пастбищами, природными пустынями и пахотными землями. В составе угнетенных земель абсолютно доминируют природные пустыни, а также пастбищные земли. Умеренно ухудшенные и ухудшенные более чем наполовину, представлены пастбищами. Однако категории, занимающие в них второе по доле место, различаются: среди умеренно ухудшенных — это пахотные земли, а среди ухудшенных — природные пустыни.

Предварительные результаты сравнения динамики продуктивности земель и ожидаемых последствий изменений климата

Анализ фиксируемых и прогнозируемых последствий изменений климата в странах Прикаспийского региона²⁷, достаточно хорошо изученных и представленных в научной литературе (Черенкова, Сидорова, 2022; Javari, 2016; Kuzucuoglu and Leroy, 2023; Limareva et al., 2017; Molavi-Arbshahi et al., 2015; Rabbaniha, 2013;

²⁷ Climate Risk Country Profiles. <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country-profiles> (дата обращения 01.11.2023).

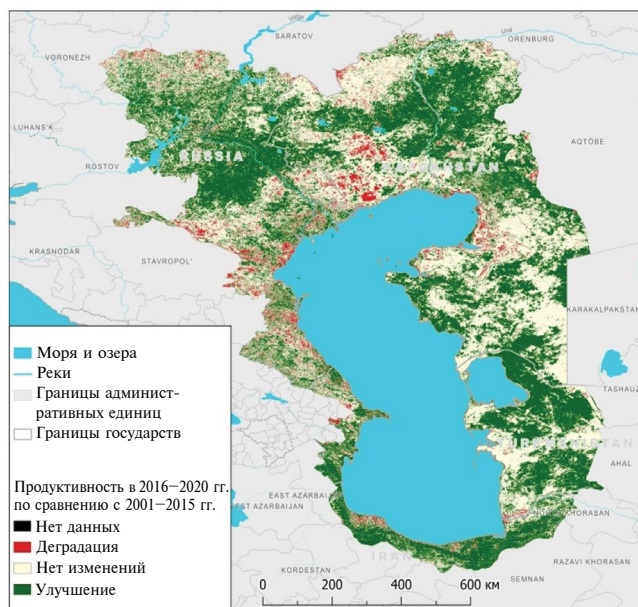


Рис. 6. “Уровень” продуктивности земель: усредненные данные за период 2016–2020 гг. по сравнению с базовым периодом (2001–2015 гг.).

Samant and Prange, 2023; Schiemann et al., 2008; Vahdati et al., 2019; Zhang et al., 2019), показывает следующие основные тенденции:

а) при зафиксированном росте температур приземного слоя атмосферы в регионе от 0.3 до 1.5°C за последние 50 лет, согласно существующим моделям (Akbari et al., 2020; Behzadi et al., 2022), он происходит быстрее, чем во мно-



Рис. 7. Интегральная оценка динамики продуктивности земель за период 2016–2020 гг. по сравнению с базовым периодом (2001–2015 гг.).

Таблица 2. Состав земель по классам продуктивности (без учета пикселей, для которых нет достоверных данных по NDVI). Верхняя строка — км², нижняя — % от общей площади соответствующей категории по динамике продуктивности

Тип наземного покрова	Класс земель по динамике продуктивности					
	Улучшенные	Стабильные	Угнетенные	Умеренно ухудшенные	Ухудшенные	Всего
Лесопокрытая площадь	3774.79	22853.43	253.21	882.47	2509.44	30273.34
	22.26	4.14	0.83	2.90	0.96	3.39
Травянистые сообщества и продуктивные пастбища	3234.24	253869.27	8331.72	16665.75	147845.85	429946.83
	19.07	45.95	27.33	54.75	56.50	48.20
Пахотные земли	3814.62	131988.36	641.85	10914.39	42267.20	189626.42
	22.50	23.89	2.11	35.85	16.15	21.26
Водно-болотные угодья	62.78	4687.36	49.37	425.83	2371.30	7596.64
	0.37	0.85	0.16	1.40	0.91	0.85
Искусственные поверхности	161.41	2056.83	133.98	260.65	616.02	3228.89
	0.95	0.37	0.44	0.86	0.24	0.36
Другие земли (в основном пустыни и солончаки)	5702.51	134722.17	20593.31	1155.81	65315.01	227488.81
	33.63	24.39	67.54	3.80	24.96	25.50
Водные объекты	205.46	2301.14	487.32	136.58	771.82	3902.32
	1.21	0.42	1.60	0.45	0.29	0.44
Итого	16955.80	552478.57	30490.77	30441.49	261696.65	892063.28
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

гих других регионах мира, с потенциальным повышением до 5°С и выше к 90-м годам XXI в.;

б) тренды в изменении количества осадков не столь явные, и в отдельных случаях даже отмечается их незначительное возрастание (северо-западная и западная часть) или наоборот, снижение (юго-западная часть). Но это происходит на фоне сокращения общего количества дней с осадками и увеличения засушливого пе-

риода практически во всем регионе Прикаспия. Однако такие оценки носят самый общий характер, и для более локальных объектов есть наблюдения иного, часто прямо противоположного характера (Сапанов, 2010; Титкова и др., 2022);

в) ожидается учащение серьезных и продолжительных засух, усиливающих опустынивание, пыльные и песчаные бури. Более детальные исследования показывают, что при отсутствии



Рис. 8. Основные последствия изменений климата в Прикаспийском регионе.
Составлено по: European Space Agency climate change initiative land cover – Проект о наземном покрове Инициативы по изменению климата Европейского космического агентства. <https://esa-landcover-cci.org/> (дата обращения 01.11.2023).

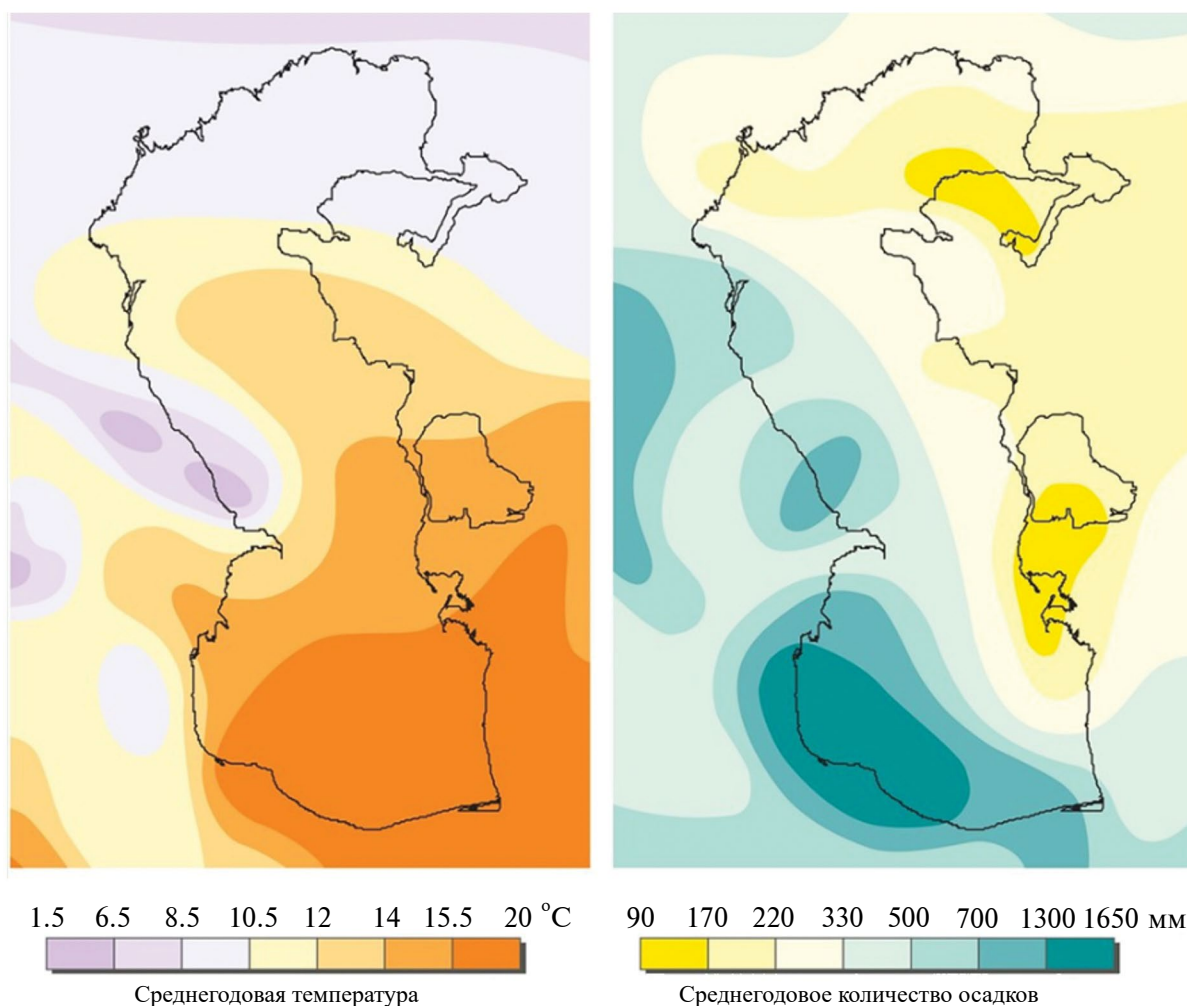


Рис. 9. Температура и осадки в Прикаспийском регионе.

Составлено по: European Space Agency climate change initiative land cover – Проект о наземном покрове Инициативы по изменению климата Европейского космического агентства. <https://esa-landcover-cci.org/> (дата обращения 01.11.2023).

статистически значимых трендов аридизации за более, чем вековой период, например, в российской части наблюдаются длительные внутривековые периоды усиления и ослабления аридизации, которые характеризуются существенными различиями частоты и интенсивности весенне-летних засух (Титкова, 2003). Показано, что в сухой период частота засух возрастала в 1.5 раза при незначительном росте интенсивности засух (Титкова, Золотокрылин, 2022). В современный сухой период, который наблюдается с начала XXI в., весенне-летние засухи стали раньше возникать в восточных областях юга Европейской России (Золотокрылин и др., 2020);

г) в свою очередь, сокращение доступных земельных ресурсов ожидаемо увеличит нагрузку и на без того сильно деградированные пастбища;

д) падение уровня Каспийского моря, особенно заметное в северной части моря, отрицательно сказывается в форме обнажения мелководий и превращения их в солончаки, несмотря на кратковременное зарастание галофитами;

е) наблюдается отток населения из прибрежной зоны, что с одной стороны, снижает нагрузку на природные, особенно пустынные сообщества, а с другой стороны – приводит к вовлечению их в пастбищное использование, несмотря на низкую продуктивность и относительную хрупкость.

В наиболее полном виде в картографической форме ожидаемые изменения отражены на интегральной карте, приведенной в международном обзоре “Vital Caspian Graphics 2 – Возможности, стремления, вызовы”²⁸ (рис. 8).

Сравнение полученных нами результатов по индикаторам НБДЗ с этими данными, а также с основными климатическими характеристиками Прикаспийского региона (рис. 9) наглядно демонстрирует, что при определенном соответствии зон с наибольшим снижением продуктив-

²⁸ Vital Caspian Graphics 2 – Opportunities, Aspirations and Challenges, 2012. GRID–Arendal. https://gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/s_document/174/original/vg-caspian2.pdf?1484295216 (дата обращения 01.11.2023).

ности и наиболее аридных регионах (восточная и северо-восточная части Прикаспия), эта корреляция отмечается далеко не всегда. Хотя в целом тенденции, отмечаемые при исследовании показателей НБДЗ, хорошо соотносятся с перечисленными особенностями изменений климата. Прогнозируемое “сильное опустынивание” подтверждается установленными в ходе нашего исследования актуальными процессами снижения продуктивности и деградации земель на более обширных территориях в северо-восточной и восточной частях региона, в меньшей степени — на северо-западе и западе Прикаспия, и лишь отдельными небольшими участками — в южной части региона, где преобладают земли с повышением продуктивности, стабильные, или в крайнем случае — подверженные риску деградационных явлений. Несмотря на то, что ожидаемое, согласно прогнозным моделям, сильное повышение температуры, особенно в холодный сезон, сопровождается современными трендами деградации, актуальный потенциал продуктивности в этой части Прикаспия, описываемый через “уровень” продуктивности, достаточно высок, чтобы проектировать успешные мероприятия по адаптации.

Важно отметить, что улучшение продуктивности и заметное снижение доли деградированных земель характерно для южной части региона, отличающейся как раз наиболее высокими температурами, хотя относительно большее количество осадков явно способствует здесь повышенной адаптационной способности. Однако, и это обстоятельство не всегда прослеживается в должной мере, что мы связываем не столько с фактическим климатом или его изменениями, сколько с определенными мероприятиями по устойчивому землепользованию, внедрению эффективных почво- и водосберегающих технологий, по сохранению и восстановлению земель. Среди последних, хорошо фиксируемых с помощью индикаторов НБДЗ, доминируют практики и модели землепользования, направленные на увеличение лесистости горных склонов (лесовосстановление и лесоразведение), внедрение улучшенных земледельческих практик в иранской и азербайджанской части региона. В туркменской части адаптационные мероприятия, хорошо отражающиеся в положительных трендах продуктивности и стабилизации негативной динамики деградации пустынных пастбищ, связаны с одной стороны — с закреплением песков и солончаков в районе залива Туркменбаши, а с другой — с регулированием пастбищной нагрузки и мероприятиями по восстановлению отгонных пастбищ и пустынной растительности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований находит подтверждение рабочая гипотеза о том, что достижение состояния нейтрального баланса деградации земель может служить критерием адаптации наземных экосистем к изменениям климата. Иначе говоря, территории, где за определенное время достигнут и поддерживается НБДЗ, могут быть с определенной степенью уверенности отнесены к тем, где реализован потенциал адаптации к климатическим изменениям.

Картографический анализ динамики продуктивности земель как наиболее информативного показателя достижения НБДЗ для Прикаспийского региона позволяет заключить, что для анализируемых территорий в пределах даже относительно короткого промежутка времени основным изменениям в продуктивности подвержены пастбищные системы, природные пустыни и пахотные земли. Основные тенденции в составе наземного покрова и его продуктивности, отражающих реакцию землепользователей на изменения природной среды и климата, направлены на преобразование травянистых систем (пастбищ) в пахотные земли, а природных пустынных сообществ — в пастбища. Интенсификация эксплуатации этих типов земель приводит к их усиленной деградации несмотря на то, что значительная их часть остается стабильной в отношении изменений природной среды и климата. Соответственно, адаптационный потенциал этих земель снижается и требует особого внимания для его поддержания и восстановления. Некоторая часть природных пустынь и пастбищ (при снижении антропогенной нагрузки и внедрении методов регулирования пастбищной нагрузки и управления пастбищами), а также пахотных земель (в случае применения приемов устойчивого землепользования с внедрением почво- и водосберегающих практик) испытывает тенденции к улучшению, однако их доля в регионе невелика. Лесопокрываемые земли занимают значительную часть среди улучшенных земель (и более ни в одной из категорий), поэтому с уверенностью можно утверждать, что успешные практики лесопользования имеют в регионе приоритет и высокую эффективность в области адаптации.

Вместе с тем деградационные явления в целом для региона во многом сходны по проявлению. Поэтому крайне важным представляется разработать “модельные” сценарии отклика на изменения климата.

Для разработки таких адаптационных сценариев необходим анализ наиболее успешных практик и ситуаций. И в этом случае использование методологии НБДЗ может быть значительным подспорьем, позволяющим с помощью разных “субиндикаторов” продуктивности вы-

явить территории, потенциально адаптированные к ИК. Предварительная оценка, проведенная нами в настоящее время, показывает, что таких территорий на всем Прикаспии – не более 2%. Но они должны быть использованы для исследования наиболее приемлемых локальных моделей по адаптации. Среди последних очевидное доминирующее значение занимают модели по лесоразведению, в меньшей степени – земледельческие и пастбищные практики, которые требуют более глубокого анализа соответствующих моделей УЗП, а также практики сохранения естественных, преимущественно пустынных, ландшафтов. Территории с применением таких практик следует отличать от территорий, где степень деградации земель достигла максимальной степени и при формальном применении показателей НБДЗ, реагирующих на динамику состояния экосистем, сохраняется стабильной. Полагаем, что это направление требует особого внимания при дальнейшей разработке подходов к применению показателей НБДЗ для оценки адаптационной способности природных и природно-антропогенных систем к ИК.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института географии РАН FMWS-2022-0001.

FUNDING

This study was supported within topic FMWS-2022-0001 of a State Assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беляева М.В., Андреева О.В., Куст Г.С., Лобковский В.А. Опыт оценки динамики деградации земель юга Европейской части России с использованием методологии нейтрального баланса деградации земель // *Экосистемы: экология и динамика*. 2020. Т. 4. № 3. С. 145–165.
- Беляева М.В., Куст Г.С., Андреева О.В. Оценка нейтрального баланса деградации земель Самарской области с помощью глобальных и региональных индикаторов // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение*. 2023. № 3. С. 16–27. <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-3-16-27>
- Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Титкова Т.Б. Аридизация засушливых земель Европейской части России и связь с засухами // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2020. № 2. С. 207–217. <https://doi.org/10.31857/S258755662002017X>
- Национальный докл. “Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)”. М.: ООО “Изд-во МБА”, 2019. Т. 2. 476 с.
- Национальный докл. “Глобальный климат и почвенный покров России: оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель. Адаптивные системы и технологии рационального природопользования (сельское и лесное хозяйство)” / ред. А.И. Бедрицкий. М.: ГЕОС, 2018. 357 с.
- Природопользование и устойчивое развитие. Мировые экосистемы и проблемы России. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. 448 с.
- Романовская А.А. Потребности и пути развития мониторинга адаптации // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 2018. Т. 29. № 1. С. 107–126.
- Сапанов М.К. Влияние изменения климата на обводненность территории северного Прикаспия // *Аридные экосистемы*. 2010. Т. 16. № 5 (45). С. 25–30.
- Семенов В.А., Черенкова Е.А. Оценка влияния атлантической мультидекадной осцилляции на крупномасштабную атмосферную циркуляцию в Атлантическом секторе в летний сезон // *ДАН*. 2018. Т. 478. № 6. С. 697–701. <https://doi.org/10.7868/S0869565218060178>
- Славко В.Д., Андреева О.В., Куст Г.С. Оценка динамики наземного покрова в целях установления нейтрального баланса деградации земель на локальном уровне (для опустыненных угодий сухостепного Заволжья) // *Аридные экосистемы*. 2023. Т. 29. № 1 (94). С. 59–69.
- Титкова Т.Б. Изменения климата полупустынь Прикаспия и Турция в XX в. // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2003. № 1. С. 106–112.
- Титкова Т.Б., Золотокрылин А.Н. Мониторинг подверженных опустыниванию земель Республики Калмыкия // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 2. С. 130–141. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-2-130-141>
- Титкова Т.Б., Черенкова Е.А., Золотокрылин А.Н. Современные тенденции изменений влажности почвы и испарения на юге Европейской России по спутниковым данным и данным реанализа: матер. 20-й Международ. конф. “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. М.: ИКИ РАН, 2022. 460 с. <https://doi.org/10.21046/20DZZconf-2022a>
- Черенкова Е.А., Бардин М.Ю., Платова Т.В., Семенов В.А. Влияние долгопериодной изменчивости температуры поверхности океана в Северной Атлантике и изменений атмосферной циркуляции на повторяемость сильных атмосферных засух летом на юге Восточно-Европейской равнины // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 12. С. 5–19.

- Черенкова Е.А., Сидорова М.В. Климатический сдвиг сезонных вариаций увлажнения в бассейне реки Урал в последние десятилетия // Проблемы региональной экологии. 2022. № 5. С. 93–98.
<https://doi.org/10.24412/1728-323X-2022-5-93-98>
- Akbari M., Baubekova A., Roozbahani A., Gafurov A., Shiklomanov A., Rasouli K., Ivkina N., Klöve B., Torabi Haghighi A. Vulnerability of the Caspian Sea shoreline to changes in hydrology and climate // Environmental Res. Let. 2020. Vol. 15. № 11. Art. 115002.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/abaad8>
- Andreeva O.V., Kust G.S. Land Assessment in Russia Based on the Concept of Land Degradation Neutrality // Reg. Res. Russ. 2020. Vol. 10. № 4. P. 593–602.
<https://doi.org/10.1134/S2079970520040127>
- Andreeva O.V., Kust G.S., Lobkovsky V.A. Sustainable Land Management and Land Degradation Neutrality // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2022. Vol. 92. P. 285–296.
<https://doi.org/10.1134/S1019331622030066>
- Andreeva O.V., Lobkovsky V.A., Kust G.S., Zonn I.S. The Concept of Sustainable Land Management: Modern State, Models and Typology Development // Arid Ecosystems. 2021. Vol. 11. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1134/S2079096121010029>
- Behzadi F., Yousefi H., Javadi S., Moridi A., Hashemy S., Mehdy S., Neshat A. Meteorological drought duration–severity and climate change impact in Iran // Theoretical and Applied Climatology. 2022. Vol. 149. P. 1297–1315.
<https://doi.org/10.1007/s00704-022-04113-5>
- Hu Yunfeng, Han Yu-ku, Zhang Yunzhi Land desertification and its influencing factors in Kazakhstan // J. of Arid Environments. 2020. Vol. 180. Art. 104203.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104203>
- Javari M. Trend and Homogeneity Analysis of Precipitation in Iran // Climate. 2016. Vol. 4. № 3. Art. 44.
<https://doi.org/10.3390/cli4030044>
- Kust G., Andreeva O., Cowie A. Land Degradation Neutrality: Concept development, practical applications and assessment // J. of Environ. Management. 2017. Vol. 195. № 1. P. 16–24.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.043>
- Kust G., Andreeva O., Lobkovskiy V., Telnova N. Uncertainties and policy challenges in implementing Land Degradation Neutrality in Russia // Environ. Sci. & Policy. 2018. Vol. 89. P. 348–356.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.08.010>
- Kust G.S., Andreeva O.V., Shklyayeva D.S., Lobkovskiy V.A. Towards the possibilities of achieving the land degradation neutrality in the countries of the Caspian Region (on the example of Russia, Kazakhstan and Turkmenistan). Scientific Conference on Climate Change in the Caspian Sea Region. 2021. P. 273–276.
- Kust G., Andreeva O., Shklyayeva D. Application of the Concept of Land Degradation Neutrality for Remote Monitoring of Agricultural Sustainability of Irrigated Areas in Uzbekistan // Sensors. 2023. Vol. 23. Art. 6419.
<https://doi.org/10.3390/s23146419>
- Kuzucuoğlu C., Leroy S. Geographic and geomorphologic context of Caspian Sea level fluctuations over the Late Pleistocene and Holocene // Quaternaire. 2023. Vol. 34. № 2. P. 71–92.
- Limareva N., Cabos N., William D., Izquierdo A., Sein D. The climate change of the Caucasus as a result of the global warming // Современная наука и инновации. 2017. № 2. С. 15–26.
- Molavi-Arbshahi M., Arpe K., Leroy S. Precipitation and temperature of the southwest Caspian Sea region during the last 55 years: Their trends and teleconnections with large-scale atmospheric phenomena // Int. J. of Climatology. 2016. Vol. 36. P. 2156–2172.
<https://doi.org/10.1002/joc.4483>
- Kust G.S., Andreeva O.V., Shklyayeva D.S., Lobkovskiy V.A. Towards the possibilities of achieving the land degradation neutrality in the countries of the Caspian Region (on the example of Russia, Kazakhstan and Turkmenistan). In Proc. of Sci. Conf. on Climate Change in the Caspian Sea Region, 27–28 October 2021. 2021. P. 273–276.
- Orr B.J., Cowie A.L., Castillo Sanchez V.M., et al. Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality. A Report of the Science-Policy Interface. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). Bonn, Germany, 2017. 129 p.
- Pearce-Higgins J.W., Antao L.H., Bates R.E., Bowgen K.M., Bradshaw C.D., Duffield S.J., et al. A framework for climate change adaptation indicators for the natural environment // Ecological Indicators. 2022. Vol. 136. Art. 108690.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108690>
- Phillips L.B., Hansen A.J., Flather C.H. Evaluating the species energy relationship with the newest measures of ecosystem energy: NDVI versus MODIS primary production // Remote Sens. of Environment. 2008. Vol. 112. № 12. P. 4381–4392.
- Rabbaniha M. Assessment of climate change impacts on the Caspian Sea Iranian coastal wetlands, using by GIS. 2013. https://www.researchgate.net/publication/258216633_Assessment_of_climate_change_impacts_on_the_Caspian_Sea_Iranian_coastal_wetlands_using_by_GIS
- Samant R., Prange M. Climate-driven 21st century Caspian Sea level decline estimated from CMIP6 projections // Communications Earth & Environment. 2023. Vol. 4. Art. 357.
<https://doi.org/10.1038/s43247-023-01017-8>
- Sanz M.J., Vente J. de, Chotte J.-L., Bernoux M., Kust G., Ruiz I., Almagro M., Alloza J.-A., Vallejo R., Castillo V., Hebel A., Akhtar-Schuster M. Sustainable Land Management contribution to successful land-based climate change adaptation and mitigation. A Report of the Science-Policy Interface. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). Bonn, Germany, 2017. 178 p.

- Schiemann R., Lüthi D., Vidale P., Schär C.* The precipitation climate of Central Asia – intercomparison of observational and numerical data sources in a remote semiarid region // *Int. J. Climatol.* 2008. Vol. 28. P. 295–314.
- Sims N.C., Newnham G.J., England J.R., et al.* Good Practice Guidance. SDG Indicator 15.3.1, Proportion of Land That Is Degraded Over Total Land Area. Ver. 2.0. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). Bonn, Germany, 2021. 148 p.
- UN, 2015. United Nations. A/RES/70/1. General Assembly. Resolution adopted by the General Assembly. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. 2015. 35 p.
- Vahdati K., Massah Bavani A.R., Khosh-Khui M., Fakour P., Sarikhani S.* Applying the AOGCM-AR5 models to the assessments of land suitability for walnut cultivation in response to climate change: A case study of Iran // *PLoS ONE*. 2019. Vol. 14. № 6. Art. e0218725.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218725>
- Zhang W., Xiang F., Qin W., Jiang W.* Vegetation dynamics and the relations with climate change at multiple time scales in the Yangtze River and Yellow River Basin, China // *Ecological Indicators*. 2020. Vol. 110. Art. 105892.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105892>

Achieving Land Degradation Neutrality as an Integral Indicator of Land Ecosystems Adaptation to Climate Change in the Caspian Region

G. S. Kust^{a, *}, V. A. Lobkovskiy^a, O. V. Andreeva^a, and D. S. Shklyaeva^a

^a*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^{*}*e-mail: kust@igras.ru*

Adaptation to climate change is one of the highest priorities on national and regional agendas. Various approaches are proposed to assess the effectiveness of adaptation measures: valuation of ecosystem services, changes in total carbon stocks, ecosystem and community-based adaptation, actual climate change indicators and others. Currently, there are no indicators of the effectiveness of climate change adaptation measures in either the regulatory framework or the national statistical system of Russia. None of the eight SDG target 13 indicators are developed in the Rosstat system. In this paper, we examine the possibility of using land degradation neutrality (LDN) as an integrated indicator to assess the adaptation of terrestrial ecosystems to climate change. We studied the territories of the administrative regions of the countries bordering the Caspian Sea, for which an analysis of LDN achievement was carried out in terms of indicators of land cover dynamics, land productivity dynamics and soil organic carbon stock dynamics. Land productivity dynamics play a leading role in the overall assessment of LDN for the Caspian region. The analysis of land transitions within the identified integral classes of productivity dynamics shows that the maintenance and change of adaptive potential and degradation risks within these classes is uneven. According to our calculations, the condition of land in a significant part of the Caspian region improved in 2016–2020 compared to the baseline period 2001–2015. In general, land productivity is relatively high during this period, confirming the high potential for adaptation to climate change in recent years. Intensified exploitation of pasture systems, natural deserts and croplands leads to their increased degradation, although a significant part of them remains stable in the face of current natural and climatic changes. Some natural deserts and rangelands (due to reduced anthropogenic pressure) and arable lands (due to the application of sustainable land management practices) are improving, but their share in the region is small. Forested areas account for a significant proportion of improved land, so it can be argued that successful forest management practices are a priority and have a high adaptive capacity in the Caspian region. The observed trends in land dynamics and productivity are in good agreement with recorded and projected climate changes in the Caspian region. This allows for a generally positive assessment of the experience of using the LDN approach in the Caspian region to assess adaptation to climate change.

Keywords: adaptation to climate change, sustainable land management, arid and semiarid areas, Caspian Sea region, land degradation, land degradation neutrality

REFERENCES

- Akbari M., Baubekova A., Roozbahani A., Gafurov A., Shiklomanov A., Rasouli K., Ivkina N., Klöve B., Torabi Haghighi A. Vulnerability of the Caspian Sea shoreline to changes in hydrology and climate. *Environ. Res. Lett.*, 2020, vol. 15, no. 11, art. 115002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abaad8>
- Andreeva O.V., Kust G.S. Land assessment in Russia based on the concept of land degradation neutrality. *Reg. Res. Russ.*, 2020, vol. 10, no. 4, pp. 593–602. <https://doi.org/10.1134/S2079970520040127>
- Andreeva O.V., Kust G.S., Lobkovsky V.A. Sustainable land management and land degradation neutrality. *Her. Russ. Acad. Sci.*, 2022, vol. 92, pp. 285–296. <https://doi.org/10.1134/S1019331622030066>
- Andreeva O.V., Lobkovsky V.A., Kust G.S., Zonn I.S. The concept of sustainable land management: Modern state, models and typology development. *Arid Ecosys.*, 2021, vol. 11, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1134/S2079096121010029>
- Behzadi F., Yousefi H., Javadi S., Moridi A., Hashemy S., Mehdy S., Neshat A. Meteorological drought duration–severity and climate change impact in Iran. *Theor. Appl. Climatol.*, 2022, vol. 149, pp. 1297–1315. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04113-5>
- Belyaeva M.V., Andreeva O.V., Kust G.S., Lobkovskiy V.A. Experience in assessment of land degradation dynamics of the south of European part of Russia using the methodology of Land Degradation Neutrality. *Ekosis.: Ekol. Dinamika*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 145–165. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/1993-3916-2021-10135>
- Belyaeva M.V., Kust G.S., Andreeva O.V. Assessment of the land degradation neutrality in the Samara region by global and regional indicators. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 17: Pochvoved.*, 2023, no. 3, pp. 16–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-3-16-27>
- Cherenkova E.A., Bardin M.Y., Platova T.V., Semenov V.A. Influence of North Atlantic SST Variability and Changes in Atmospheric Circulation on the Frequency of Summer Droughts in the East European Plain. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, pp. 819–829. <https://doi.org/10.3103/S1068373920120018>
- Cherenkova E.A., Sidorova M.V. Climatic shift of seasonal variations in moisture in the Ural River basin in recent decades. *Probl. Reg. Ekol.*, 2022, no. 5, pp. 93–98. (In Russ.).
- Hu Yu., Han Yu., Zhang Yu. Land desertification and its influencing factors in Kazakhstan. *J. Arid Environ.*, 2020, vol. 180, art. 104203. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104203>
- Javari M. Trend and homogeneity analysis of precipitation in Iran. *Climate*, 2016, vol. 4, no. 3, art. 44. <https://doi.org/10.3390/cli4030044>
- Kust G., Andreeva O., Cowie A. Land degradation neutrality: Concept development, practical applications and assessment. *J. Environ. Manage.*, 2017, vol. 195, no. 1, pp. 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.043>
- Kust G., Andreeva O., Lobkovskiy V., Telnova N. Uncertainties and policy challenges in implementing Land Degradation Neutrality in Russia. *Environ. Sci. Policy*, 2018, vol. 89, pp. 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.08.010>
- Kust G., Andreeva O., Shklyayeva D. Application of the concept of land degradation neutrality for remote monitoring of agricultural sustainability of irrigated areas in Uzbekistan. *Sensors*, 2023, vol. 23, art. 6419. <https://doi.org/10.3390/s23146419>
- Kust G.S., Andreeva O.V., Shklyayeva D.S., Lobkovskiy V.A. Towards the possibilities of achieving the land degradation neutrality in the countries of the Caspian Region (on the example of Russia, Kazakhstan and Turkmenistan). In *Proc. of Sci. Conf. on Climate Change in the Caspian Sea Region, 27–28 October 2021*. 2021, pp. 273–276.
- Kuzucuoğlu C., Leroy S. Geographic and geomorphologic context of Caspian Sea level fluctuations over the Late Pleistocene and Holocene. *Quaternaire*, 2023, vol. 34, no. 2, pp. 71–92.
- Limareva N., Cabos N., William D., Izquierdo A., Sein D. The climate change of the Caucasus as a result of the global warming. *Sovrem. Nauka Innov.*, 2017, no. 2, pp. 15–26. (In Russ.).
- Molavi-Arbshahi M., Arpe K., Leroy S. Precipitation and temperature of the southwest Caspian Sea region during the last 55 years: Their trends and teleconnections with large-scale atmospheric phenomena. *Int. J. Climatol.*, 2016, vol. 36, pp. 2156–2172. <https://doi.org/10.1002/joc.4483>
- Natsional'nyi doklad “Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii: otsenka riskov i ekologo-ekonomicheskikh posledstviy degradatsii zemel’. Adaptivnye sistemy i tekhnologii ratsional'nogo prirodoop'zovaniya (sel'skoe i lesnoe khozyaistvo)” [National Report “Global Climate and Soil Cover in Russia: Assessment of Risks and Environmental and Economic Consequences of Land Degradation. Adaptive Systems and Technologies for Rational Environmental Management (Agriculture and Forestry)”]. Moscow: GEOS Publ., 2018. 357 p.
- Natsional'nyi doklad “Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii: opustynivanie i degradatsiya zemel’, institutsional'nye, infrastrukturnye, tekhnologicheskie mery adaptatsii (sel'skoe i lesnoe khozyaistvo)”. T. 2 [National Report “Global Climate and Land Cover in Russia: Desertification and Land Degradation, Institutional, Infrastructural, and Technological Adaptation Measures (Agriculture and Forestry)”. Vol. 2]. Moscow: MBA Publ., 2019. 476 p.
- Orr B.J., Cowie A.L., Castillo Sanchez V.M. et al. *Scientific conceptual framework for land degradation neutrality. A report of the science-policy interface*. Bonn: UN Convention to Combat Desertification (UNCCD), 2017. 129 p.

- Pearce-Higgins J.W., Antao L.H., Bates R.E., Bowgen K.M., Bradshaw C.D., Duffield S.J. et al. A framework for climate change adaptation indicators for the natural environment. *Ecol. Indic.*, 2022, vol. 136, art. 108690. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108690>
- Phillips L.B., Hansen A.J., Flather C.H. Evaluating the species energy relationship with the newest measures of ecosystem energy: NDVI versus MODIS primary production. *Remote Sens. Environ.*, 2008, vol. 112, no. 12, pp. 4381–4392.
- Prirodopol'zovanie i ustoichivoe razvitie. Mirovye ekosistemy i problemy Rossii* [Environmental Management and Sustainable Development. World Ecosystems and Problems of Russia]. Moscow: KMK Publ., 2006. 448 p.
- Rabbaniha M. *Assessment of climate change impacts on the Caspian Sea Iranian coastal wetlands, using by GIS*. 2013.
- Romanovskaya A.A. Needs and development paths for adaptation monitoring. *Probl. Ekol. Monitor. Modelir. Ekosis.*, 2018, vol. 29, no. 1, pp. 107–126. (In Russ.).
- Samant R., Prange M. Climate-driven 21st century Caspian Sea level decline estimated from CMIP6 projections. *Commun. Earth Environ.*, 2023, vol. 4, art. 357. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01017-8>
- Sanz M.J., Vente J. de, Chotte J.-L., Bernoux M., Kust G., Ruiz I., Almagro M., Alloza J.-A., Vallejo R., Castillo V., Hebel A., Akhtar-Schuster M. *Sustainable Land Management contribution to successful land-based climate change adaptation and mitigation. A Report of the Science-Policy Interface*. Bonn: UN Convention to Combat Desertification (UNCCD), 2017. 178 p.
- Sapanov M.K. Impact of climate change on water content in the northern Caspian region. *Arid Ekosys.*, 2010, vol. 16, no. 5, pp. 25–30. (In Russ.).
- Schiemann R., Lüthi D., Vidale P., Schär C. The precipitation climate of Central Asia—intercomparison of observational and numerical data sources in a remote semiarid region. *Int. J. Climatol.*, 2008, vol. 28, pp. 295–314.
- Semenov V.A., Cherenkova E.A. Evaluation of the Atlantic Multidecadal Oscillation Impact on Large-Scale Atmospheric Circulation in the Atlantic Region in Summer. *Dokl. Earth Sci.*, 2018, vol. 478, pp. 263–267. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18020290>
- Sims N.C., Newnham G.J., England J.R., et al. *Good Practice Guidance. SDG Indicator 15.3.1, Proportion of Land That Is Degraded Over Total Land Area. Version 2.0*. Bonn: UN Convention to Combat Desertification (UNCCD), 2021. 148 p.
- Slavko V.D., Andreeva O.V., Kust G.S. Assessment of land cover dynamics in order to establish a neutral balance of land degradation at the local level (for decertified lands of the dry steppe Trans-Volga region). *Arid Ekosys.*, 2023, vol. 29, no. 1, pp. 59–69. (In Russ.).
- Titkova T.B. Climate changes in the Caspian and Turgai semi-deserts in the 20th century. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2003, no. 1, pp. 106–112. (In Russ.).
- Titkova T.B., Cherenkova E.A., Zolotokrylin A.N. Current trends in changes in soil moisture and evaporation in the south of European Russia based on satellite data and reanalysis data. In *Materialy 20-i Mezhdun. Konf. "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* [Proc. of the 20th Int. Conf. "Modern Problems of Earth Remote Sensing from Space"]. Moscow: IKI RAN, 2022, p. 460. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/20DZZconf-2022a>
- Titkova T.B., Zolotokrylin A.N. Monitoring of lands affected by desertification in the Republic of Kalmykia. *Sovrem. Probl. Distant. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 130–141. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-2-130-141>
- UN, 2015. *United Nations. A/RES/70/1. General Assembly. Resolution adopted by the General Assembly. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. 2015. 35 p.
- Vahdati K., Massah Bavani A.R., Khosh-Khui M., Fakour P., Sarikhani S. Applying the AOGCM-AR5 models to the assessments of land suitability for walnut cultivation in response to climate change: A case study of Iran. *PLoS ONE*, 2019, vol. 14, no. 6, art. e0218725. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218725>
- Zhang W., Xiang F., Qin W., Jiang W. Vegetation dynamics and the relations with climate change at multiple time scales in the Yangtze River and Yellow River Basin, China. *Ecol. Indic.*, 2020, vol. 110, art. 105892. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105892>
- Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A., Titkova T.B. Aridization of drylands in the European part of Russia: Secular trends and links to droughts. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2020, vol. 84, no. 2, pp. 207–217. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S258755662002017X>