

СОДЕРЖАНИЕ

Том 157, номер 3, 2025

Тематическая классификация лесных карт и методологические основы их создания

Е.Л. Макаренко 247

Новые сведения о позднеголоценовых изменениях уровня Ладожского озера в Южном Приладожье

А.О. Аксенов, Д.Ю. Большиянов, С.А. Правкин, Г.Б. Лебедев, З.В. Пушина, П.С. Зубкова 268

Чувствительность фитопродукционного процесса в низкогорно-степных ландшафтах Южного Урала к флуктуациям гидротермического режима

А.В. Хорошев 288

Интегральная оценка опасности размывов берегов рек Западной Сибири

А.А. Куракова 305

Морфодинамика русла р. Северной Двины, его естественные и техногенные трансформации в XX–начале XXI в.

Р.С. Чалов, Г.Б. Голубцов, А.А. Куракова, В.А. Семаков, Е.Д. Панченко 317

Расчет предельно допустимой рекреационной емкости территории природного парка “Белуха”

О.П. Николаева, К.С. Савенко, Р.В. Любимов, В.А. Ситникова 340

Дружественность и недружественность стран мира как фактор современного геополитического положения России и Сибири

А.Н. Фартышев, С.В. Писаренко, Л.С. Жирнова 359

Перспективы использования возобновляемых источников энергии на севере Красноярского края

М.Ю. Березкин, К.С. Дегтярев, О.А. Синюгин 379

Природно-антропогенные изменения стока наносов рек в бассейне Индигирки

Д.В. Магрицкий, Д.И. Школьный, П.Г. Илюшина 394

О строительном камне псковских земель в эпоху Средневековья

М.Г. Цинкобурова, М.Л. Барановская 416

Наводнение на побережье полуострова Камчатка 14–15 декабря 2023 г.

Ю.В. Любичский, А.Н. Вражский 434

Региональные различия в накоплении запасов произведенных черных металлов и металлолома в экономике России

Л.Р. Имангулов 451

CONTENT

Volume 157, No. 3, 2025

Thematic Classification of Forest Maps and Methodological Principles of Their Creation	
<i>E. L. Makarenko</i>	247
New Insight into the Late Holocene Lake-Level Changes of Lake Ladoga in the Southern Ladoga Region	
<i>A.O. Aksenov, D.Yu. Bolshiyanov, S.A. Pravkin, G.B. Lebedev, Z.V. Pushina, P.S. Zubkova</i>	268
Sensitivity of Phytoproduction in Low-Mountain Steppe Landscapes in the Southern Urals to Hydrothermal Fluctuations	
<i>A.V. Khoroshev</i>	288
Methodology of assessment of dangerous channel processes in rivers of Western Siberia	
<i>A.A. Kurakova</i>	305
Morphodynamics of the Channel of the Northern Dvina River, Its Natural and Technogenic Transformations in the XX–Early XXI Century	
<i>R.S. Chalov, G.B. Golubtsov, A.A. Kurakova, V.A. Semakov, E.D. Panchenko</i>	317
Calculation of the Maximum Allowable Recreational Capacity of the Territory of the Belukha Nature Park	
<i>O.P. Nikolaeva, K.S. Savenko, R.V. Lybimov, V.A. Sitnikova</i>	340
Friendliness and Unfriendliness of Countries of the World as a Factor in the Modern Geopolitical Position of Russia and Siberia	
<i>A.N. Fartyshchik, S.V. Pisarenko, L.S. Zhirnova</i>	359
Prospects for the Use of Renewable Energy Sources in the North of the Krasnoyarsk Territory	
<i>M.Yu. Berezkin, K.S. Degtyarev, O.A. Sinyugin</i>	379
Natural and Anthropogenic Changes in River Suspended Sediment Runoff in the Indigirka River Basin	
<i>D.V. Magritsky, D.I. Shkolnyi, P.G. Ilyushina</i>	394
About the Building Stone of the Pskov Lands in the Middle Ages	
<i>M.G. Tsinkoburova, M.L. Baranovskaya</i>	416
Flood on the Coast of the Kamchatka Peninsula on December 14–15, 2023	
<i>Yu.V. Lyubitskiy, A.N. Vrazhkin</i>	434
Regional Differences in The Accumulation of Produced Ferrous Metals Stocks and Scrap Metal in the Russian Economy	
<i>L.R. Imangulov</i>	451

УДК 911.5/9+912.43-12

ТЕМАТИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ЛЕСНЫХ КАРТ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИХ СОЗДАНИЯ

© 2025 г. Е.Л. Макаренко

*Институт географии СО РАН им. В.Б. Сочавы, г. Иркутск, Россия**E-mail: elmakarenko@bk.ru*

Поступила в редакцию 14.02.2025 г.

После доработки 22.04.2025 г.

Принята к публикации 28.04.2025 г.

Цель исследования — тематическая классификация лесных карт на основе анализа и оценки их содержания, методологических основ создания, в том числе в рамках мелкомасштабного атласного картографирования. Лесные карты представляют собой пространственно-временные, образно-знаковые модели, отражающие многоаспектный характер лесов, их значение в развитии и взаимодействии природы и общества. В широком понимании и в рамках данной работы под ними понимаются все карты, содержание которых связано с природным, социально-экономическим и экологическим аспектами картографирования лесов. Основой для реализации цели является богатый теоретико-методологический и практический опыт по созданию лесных карт для территории России, ее отдельных субъектов и макрорегионов, например Байкальского региона, бассейна озера Байкал и др. В качестве образцов приведены разработанные авторские мелкомасштабные карты, представленные в ряде изданных комплексных атласов. Разработка их осуществлена с применением методов математико-статистического и экспертного анализа, дистанционного зондирования, геоинформационного моделирования и др. В результате исследования лесные карты разделены на семь основных классификационных групп: лесов и их основных характеристик; территориально-хозяйственной организации лесов; продуктивности, функций лесов и лесных ресурсов; лесной промышленности; охраны, защиты и воспроизводства лесов; лесоэкологических (лесохозяйственно-экологических) ситуаций; истории изучения и освоения лесов. Содержание карт отражает: размещение и состояние лесов; оценку сырьевых, экологических и социальных функций лесов; виды использования лесов; размещение и производственные показатели отраслей лесопромышленного комплекса; нарушение лесов, обусловленную воздействиями неблагоприятных природных и антропогенных факторов; природную пожарную опасность лесов и др.

Ключевые слова: лесные карты, земли лесного фонда, лесные ресурсы, лесопользование, атласное мелкомасштабное картографирование, лесная промышленность

DOI: 10.31857/S0869607125030013, EDN: LTBYMJ

Введение

Леса представляют собой один из немногих природных ресурсов, имеющих самое разнообразное значение и применение для человека. Это не только источник различных растительно-сырьевых ресурсов — древесных, недревесных (коры, хвои и пр.), пищевых и лекарственных, создающих основу для развития ряда отраслей экономики, многих видов человеческой деятельности, в той или иной степени

связанных с лесом, но и необходимая среда обитания живых организмов, а также средозащитный, средоформирующий и средостабилизирующий (средорегулирующий) фактор, роль которого трудно переоценить в деле экологически-безопасного, духовно-эстетического развития общества, сбалансированного функционирования природных и природно-антропогенных систем.

Лесоресурсный потенциал, экологическое состояние, хозяйственное использование лесов и многое другое являются предметами картографирования во многих странах, включая Россию. Уже более 40 лет особое значение для изучения лесов имеют космические снимки [24]. Использование их значительно упростило лесное картографирование, вывело его на новый уровень, связанный с обработкой больших географических пространств, разработкой новых тематических направлений, реализацией мониторинговых задач в отношении такого динамичного объекта как лес и связанных с ним процессов.

Анализ зарубежного опыта последних лет, представленный на интернет-платформах, показал, что картографирование лесов развивается по нескольким основным направлениям. Выделяются карты, отображающие: зонально-климатические виды лесов, например, мангровые [50], тропические [51]; использование лесов, например, вырубку лесов в хозяйственных целях¹; экологические проблемы и комплексную оценку лесов стран, регионов^{2, 3} и мира в целом, например в рамках глобальной оценки лесных ресурсов⁴; карты оценки изменений площади лесов на основе анализа временных рядов изображений Landsat, выполненного в лаборатории глобального анализа и изучения земель (GLAD) в университете Мэриленда в сотрудничестве с Global Forest Watch (GFW)⁵ [49]. В ряде случаев карты создаются в рамках национальных проектов по инвентаризации лесов [32], направленных, в частности, на сохранение их биологического разнообразия.

На протяжении многих десятилетий ведется картографирование лесов и в нашей стране, где они — одно из основных ее богатств. Основная часть лесов страны относится к бореальным, играющим важную роль в деле сохранения экологического равновесия на планете⁶ и представляющим отдельный интерес для картографирования [48]. За многие годы разработано большое количество карт, посвященных лесной тематике, в том числе в составе географических атласов.

¹ Mapped: 30 Years of Deforestation and Forest Growth, by Country: [сайт]. URL: <https://www.visualcapitalist.com/mapped-30-years-of-deforestation-and-forest-growth-by-country/> (дата обращения: 10.12.2024).

² Forest map of Europe. European Forest Institute: [сайт]. URL: <https://efi.int/knowledge/maps/forest> (дата обращения: 10.12.2024).

³ Current United States Forest Type and Density Maps: [сайт]. URL: <https://www.thoughtco.com/current-us-forest-type-density-maps-1343455> (дата обращения: 10.12.2024).

⁴ Глобальная оценка лесных ресурсов. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных наций: [сайт]. URL: <https://www.fao.org/forest-resources-assessment/fra-2020/maps/ru/> (дата обращения: 10.12.2024).

⁵ Global Forest Change 2000-2021: [сайт]. URL: <https://glad.earthengine.app/view/global-forest-change#bl=off;old=off;dl=1;lon=20;lat=10;zoom=3> (дата обращения: 10.12.2024).

⁶ Обновленная информация о работе по вопросам, касающимся бореальных лесов / Европейская экономическая комиссия. Продовольственная и сельскохозяйственная организация. Сан-Марино, 20–23 ноября 2023 г.: [сайт]. URL: https://unece.org/sites/default/files/2023-10/ECE_TIM_2023_13R.pdf (дата обращения: 10.07.2024).

С недавнего времени понятие “лесные карты” в России закреплено законодательно. Под ними, согласно статье 93.3 [27], вступившей в силу с февраля 2021 г., понимаются как публичные⁷, так и служебные карты, “...составленные на картографической основе, на которой в графической и текстовой форме воспроизведены сведения, содержащиеся в государственном лесном реестре”. Форма представления, содержание и оформление служебных и публичных лесных карт в России регламентированы [14, 26, 27]. Согласно статье 93.2 [27] и приказа Минприроды России № 533 от 22 августа 2023 г.⁸, сведения, содержащиеся в лесных картах, включают: состав и границы земель лесного фонда и земель иных категорий, на которых расположены леса; границы лесных кварталов и лесотаксационных выделов, защитных лесов и их категорий, эксплуатационных и резервных лесов; количественные, качественные, экономические характеристики лесов и лесных ресурсов; данные по использованию, охране, защите и воспроизводству лесов и др. Так как масштабы для публичных и служебных карт не оговорены, можно считать, что для тех и других они могут быть разными и применены для различных пространственных и хозяйственно-территориальных уровней.

Несмотря на тематико-содержательное разнообразие карт в рамках понятия “лесные карты”, считаем его достаточно узким, направленным, прежде всего, на решение задач в области лесного хозяйства. В широком смысле и в рамках данной работы под лесными картами мы понимаем все те, содержание которых в той или иной мере связано с многоаспектным характером лесов и является предметом природного, социально-экономического и экологического картографирования. Такое понимание обусловлено тем, что существует большой пласт научных исследований, затрагивающих самые разные стороны изучения лесов (сырьевые и социально-экологические функции, индикационные свойства лесной растительности, лесоресурсный потенциал и влияние его на развитие отраслевой структуры экономики и др.), не отраженные в содержании лесного реестра. Кроме того, даже в рамках принятой концепции лесного картографирования отмечается нехватка или отсутствие карт разных масштабов по многим тематическим сюжетам. К таким сюжетам следует отнести⁹: ведомственную принадлежность лесов; древесно-кустарниковую растительность за пределами земель лесного фонда; возможные условия ведения хозяйственной деятельности, а также природные, экологические, социальные и иные факторы, ограничивающие такую деятельность в России; леса, пригодные или непригодные для ведения устойчивого ведения лесного хозяйства; информацию о хозяйственной инфраструктуре в лесах и на примыкающих к ним территориях; регулярно обновляемые изменения, произошедшие в лесном фонде. Отсутствие такой информации на картах создает проблемы при планировании лесопользования и лесопользования за счет возможной переоценки количества лесов в стране, оперирования с устаревшей информацией, а также затрудняет единое и оперативное управление лесами, охрану их от пожаров и лесонарушений, особенно в рай-

⁷ Федеральная геоинформационная система лесного комплекса. Модуль “Публичная лесная карта”: [сайт]. URL: [https:// pub.fgislk.gov.ru/map/](https://pub.fgislk.gov.ru/map/) (дата обращения: 15.08.2024).

⁸ Об утверждении состава сведений, содержащихся в лесных картах / Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 533 от 22 авг. 2023 г.: [сайт]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202401250005> (дата обращения: 15.08.2024).

⁹ О российских лесных картах / Аналитические материалы (архив за 2005 г.). Первый лесопромышленный портал: [сайт]. URL: www.wood.ru (дата обращения 15.08.2024).

онах с малыми по размеру лесохозяйственными предприятиями, с территориально-фрагментированными землями лесного фонда, которые интенсивно используются, прежде всего, в рекреационных и промыслово-заготовительных целях.

Материалы и методы исследований

Огромное разнообразие лесных карт определило цель настоящей работы — их тематическую классификацию на основе анализа и оценки содержания, методологических основ создания, в том числе в рамках мелкомасштабного атласного картографирования. Основой для реализации цели является богатый концептуальный теоретико-методологический и практический опыт, включая авторский, по созданию лесных карт на территорию Российской Федерации (РФ), ее отдельные субъекты и макрорегионы, например: Байкальский (Иркутская область, Республика Бурятия, Забайкальский край), бассейн озера Байкал. Задачи для достижения цели включали: анализ тематики и содержания лесных карт, а также методов и подходов к их разработке; выделение на основе анализа и оценки лесных карт их основных тематических групп, являющихся, по сути, частью общей классификации географических карт по различным основаниям (масштабу, пространственному охвату, содержанию, функциональному типу, характеру обобщения пространственно-временной геоинформации, назначению и пр.); рассмотрение ряда карт, в том числе авторских, в рамках предложенной тематической классификации лесных карт. Достижение цели предполагало использование методов, связанных с накоплением, обработкой, анализом и оценкой различных видов информации.

Работа основывается на анализе карт, которые как пространственно-временные, образно-знаковые модели отражают многоаспектный характер лесов и их значение в развитии и взаимодействии природы и общества. Разработка таких карт, в свою очередь, базируется на методах, основными из которых являются картографический, математико-статистический, дистанционного зондирования, геоинформационного анализа и моделирования, экспертный и др. В последние десятилетия создание лесных карт во многом осуществляется с применением ГИС-технологий, которые, в частности, лесохозяйственной отрасли страны внедрены одной из первых [26].

Особенности разработки для лесных карт системы условных обозначений, принципов генерализации, способов картографического отображения и пр., как и для иных тематических карт, зависят от: их содержания, на которое в значительной степени влияют территориальные особенности развития природы и общества, наличие и качество исходной информации; масштаба (крупномасштабные — крупнее 1 : 200 000, среднемасштабные — 1 : 200 000–1 : 1 000 000, мелкомасштабные — мельче 1 : 1 000 000); пространственного охвата картографируемой территории (от локального до глобального); характера обобщения пространственно-временной геоинформации (аналитический, комплексный, синтетический); функционального типа (инвентаризационный, оценочный, рекомендательный, прогнозный и др.); назначения карты (учебное, научно-справочное, инженерно-техническое, туристское, служебное и др.).

В деле организации и развития лесного комплекса наиболее важное место занимают лесные карты крупных и средних масштабов, которые создаются для решения задач, прежде всего, на уровне лесничеств — лесохозяйственных подразделений территориальных органов исполнительной власти, а также административных районов, их групп, иных территориальных образований. Для развития лесного ком-

плекса на уровне субъектов РФ, регионов, страны составляются мелкомасштабные (обзорные) карты [38]. Мелкомасштабный уровень, используемый в основном для географических атласов, охватывает страну в целом [4, 7, 34, 45], отдельные субъекты России [5, 6] и регионы, выделенные на основе социально-экономических [8, 22, 47] или физико-географических принципов [3, 4, 9, 46].

Анализ лесных карт, проведенный по ряду атласных изданий, показал, что их тематико-содержательное, функциональное и иное разнообразие варьирует в зависимости от концептуальных особенностей атласов, создаваемых как единые и целостные произведения со своими горизонтальными (тематическое содержание карт) и вертикальными (масштабы карт и пространственный уровень исследований) структурами, экономико-организационными и иными принципами, определяющими формат, объем, оформление, внесение дополнительной информации и пр.. Несмотря на то что тематические карты, включая лесные, в атласах обладают “горизонтальной обособленностью” [17], они, согласно принципам атласного картографирования, требуют согласования своего содержания с картами из иных тематических блоков. Анализ лесных карт показал, что они находятся в самых разнообразных по содержанию атласах, например физико-географических узкоотраслевых [4], физико-географических комплексных отраслевых и межотраслевых [3, 9, 35], социально-экономических комплексных [7, 22], общих комплексных [5, 8, 34]. Присутствуют лесные карты также в эколого-географических комплексных атласах [6, 45–47].

В целом по содержанию наибольшее распространение, особенно в атласных изданиях, получили карты, на которых отражено размещение лесов и их основные характеристики, ресурсный потенциал лесов, влияющий на разные аспекты социально-экономического развития территорий, карты лесной промышленности. По характеру обобщения пространственно-временной информации в наибольшей степени представлены карты аналитические (например, карты лесистости, запасов древесины, распределения лесов по преобладающим породам и пр.) и комплексные, в которых совмещены несколько аналитических показателей. Реже представлены карты с синтетическим (интегральным) обобщением информации (например, карты лесорастительного районирования, типов леса, лесорастительных условий и др.). Среди функциональных типов чаще представлены карты инвентаризационного характера, служащие для отображения (фиксации) современной территориально-хозяйственной, лесорастительной, экологической и иной ситуаций. Меньшую долю занимают карты оценочного типа (карты оценки природной пожарной опасности лесов, продуктивности лесов, лесных ресурсов, экологических функций леса, интенсивности лесовосстановления или лесопользования и др.), составляемые на основе инвентаризационных. Отметим недостаток прогнозных, рекомендательных и оценочно-рекомендательных карт, имеющих большое значение в целях управления и принятия решений на разных территориально-пространственных уровнях.

Основными источниками для разработки содержания лесных карт являются: полевые исследования, данные лесостроительств, аэро- и космической съемки, государственной статистики, государственного лесного реестра, лесопатологического мониторинга, отчеты государственного мониторинга воспроизводства лесов, схемы территориального планирования, стратегии социального-экономического и инвестиционного развития регионов и пр. Большое значение в качестве источников

имеют электронные мультимасштабные карты^{10, 11, 12}, геопорталы пространственных данных [23], тематические карты. В последние годы расширился круг доступных зарубежных интернет-платформ, содержащих открытые данные по мониторингу лесов и позволяющих с достаточно высоким разрешением получать информацию о динамике глобальных изменений в лесном покрове, касающихся, например, площади и пожарной опасности лесов и др.^{13, 14} Для мелкомасштабного картографирования глобальных изменений лесных ресурсов большое значение имеют доклады Продовольственной и сельскохозяйственной организации объединенных наций¹⁵. При разработке карт велика роль собственно лесных карт. Использование их путем синтеза пространственно-временной информации, разработки новых классификаций, проведения картографического мониторинга ведет к созданию карт нового тематико-содержательного наполнения, функционального типа, назначения и др.

Результаты и обсуждение

Учитывая характер лесного комплекса как гетерогенной системы, состоящей из взаимосвязанных природной (леса как биологическая среда) и социально-экономической (лесное хозяйство и лесная промышленность) подсистем [2], а также экологической подсистемы, рожденной на основе взаимодействия двух предыдущих, лесные карты можно подразделить на семь основных групп: карты лесов и их основных характеристик; территориально-хозяйственной организации лесов; продуктивности, функций лесов и лесных ресурсов; лесной промышленности; охраны, защиты и воспроизводства лесов; лесоэкологических (лесохозяйственно-экологических) ситуаций; истории изучения и освоения лесов.

Карты лесов и их основных характеристик. В крупномасштабной лесохозяйственной документации они представлены планами лесонасаждений, отражающими размещение лесов по преобладающим древесным породам и группам возраста. В средне- и мелкомасштабном картографировании карта лесов отражает размещение и состав леса по преобладающим породам, иногда с указанием сомкнутости древесного полога¹⁶ или полноты, а также текущего состояния, характеризуемого наличием гарей, вырубок, сухостоя и пр. [5, 6, 9, 34]. Следует заметить соблюдение принципа единого цветового оформления породного состава для карт лесов всех масштабов.

¹⁰ Аналитические системы ФБУ “Рулесозащита”: [сайт]. URL: <https://services.rcfh.ru> (дата обращения: 15.08.2024).

¹¹ Леса высокой природоохранной ценности (ЛВПЦ) России: [сайт]. URL: <https://hcvp.ru/> (дата обращения: 15.08.2024).

¹² Федеральная геоинформационная система лесного комплекса. Модуль “Публичная лесная карта”: [сайт]. URL: <https://pub.fgislk.gov.ru> (дата обращения: 15.08.2024).

¹³ Global Forest Watch: [сайт]. URL: <https://www.globalforestwatch.org/map/> (дата обращения: 18.10.2024).

¹⁴ Global Forest Change 2000–2021: [сайт]. URL: <https://glad.earthengine.app/view/global-forest-change#bl=off;old=off;dl=1;lon=20;lat=10;zoom=3> (дата обращения: 10.12.2024).

¹⁵ Глобальная оценка лесных ресурсов / Продовольственная и сельскохозяйственная организация объединенных Наций: [сайт]. URL: <https://www.fao.org/forest-resources-assessment/ru/> (дата обращения: 04.12.2024).

¹⁶ Карта лесов Российской Федерации. Преобладающие группы древесных пород и сомкнутость древесного полога / Бартаев С.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Потапов П.В., Турбанова С.А., Ярошенко А.Ю. Масштаб: 1 : 14000000. М.: Изд-во ИКИ РАН, 2004. URL: https://www.booksite.ru/rusles/map/karta_lesa.jpg (дата обращения: 04.04.2025).

Размещение и состав лесов могут быть дополнены иными таксационными показателями, содержащимися в материалах учета государственного лесного фонда. На основе их могут быть созданы самостоятельные карты, например, распределения лесов по группам возраста, полноте, классам бонитета и пр. К данной группе можно отнести также синтетические карты типов леса и лесорастительного районирования.

Размещение лесов как элемента природной основы может присутствовать в содержании иных лесных карт, карт природно-хозяйственной тематики, отражающих, например, структуру земельного фонда.

Карты территориально-хозяйственной организации лесов отражают совокупность территориальных кластеров, выделенных на нормативно-правовой основе для ведения лесного хозяйства в рамках лесного и природоохранного законодательства. Тематика и содержание карт связаны с отображением административно-хозяйственных территорий, лесоустроительных мероприятий (отображаются площади изученных и обследованных лесов с указанием разрядов или категорий лесоустройства), различных функциональных категорий и видов использования лесов, зонально-типологического и природно-экономического разнообразия и пр. В практике атласного картографирования данные карты могут относиться к природному, социально-экономическому и экологическому блокам. Наиболее полно в тематическом отношении карты территориально-хозяйственной организации лесов представлены в лесохозяйственной документации¹⁷, где они разработаны на топографической основе с учетом типовых требований. Следует заметить, что при их создании часто возникает давняя проблема несогласованности земле- и лесоустроительной документации [33].

На административно-хозяйственных картах кластерами являются лесничества со своими административными центрами и их иерархически-соподчиненные подразделения (участковые лесничества, лесные дачи, кварталы, выделы). На картах зонально-типологического и территориально-экономического разнообразия лесов кластеры — это, соответственно, лесные зоны, районы¹⁸ и лесотаксовые районы¹⁹. Первые выделяются по однородности лесорастительных признаков в существующих природно-климатических условиях и отличаются относительно сходными условиями использования, охраны, защиты, воспроизводства лесов, что служит основанием для планирования лесохозяйственных мероприятий и пр. Лесотаксовые районы — участки, выделенные по общности результатов оценки лесосек согласно региональным нормативам [43] и служащие для формирования платы при заготовке древесины, арендной платы за использование лесных участков. На картах, отображающих функциональный характер лесов, кластерами являются законодательно-утвержденные категории лесов — защитные, эксплуатационные, резервные с соответствующими

¹⁷ Об утверждении типовой формы и состава лесного плана субъекта Российской Федерации, порядка его подготовки / Приказ Федерального агентства лесного хозяйства от 5 окт. 2011 г. № 423: [сайт]. URL: <https://base.garant.ru/70109402/> (дата обращения: 15.05.2024).

¹⁸ Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации / Приказ Минприроды России от 18 авг. 2014 г. № 367 (ред. от 19 фев. 2019 г.): [сайт]. URL: http://www.consultant.ru/document/Cons_doc_LAW_169590/ (дата обращения: 15.05.2024).

¹⁹ О ставках платы за единицу объема лесных ресурсов и ставках платы за единицу площади лесного участка, находящегося в федеральной собственности / Постановление Правительства Российской Федерации от 22 мая 2007 г. № 310 (ред. от 6 марта 2024 г.): [сайт]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_68813/ (дата обращения: 15.05.2024).

для них режимами управления. На картах использования лесов, лесной и лесоперерабатывающей инфраструктуры кластерами выступают участки разрешенного и фактического использования лесов с установленными для них площадью, сроками и видами использования и др.

К группе карт территориально-хозяйственной организации лесов относятся также карты разрядов лесоустройств, лесосеменного и лесозащитного районирования, эколого-экономического развития, инвестиционно-экономического освоения лесов, где кластерами являются районы или зоны, выделенные на основании планов территориального развития, инвестиционного освоения лесов и пр.

Примером карты, отображающей перспективное инвестиционно-экономическое освоение лесов, является авторская оценочная карта “Зоны освоения и использования лесов”, которая выполнена для 16 регионов Сибири в результате анализа и интерпретации данных Лесных планов субъектов РФ по 75 экономическим зонам освоения (ЭЗО) лесов (рис. 1) [8].

В содержании карты отражена интенсивность освоения лесов в границах ЭЗО, которая представляет собой интегральный результат воздействия на леса различных видов их использования (статья 25 Лесного кодекса [27]) в зависимости от количества видов, используемой площади лесов и объемов заготовки древесины. Для каждой ЭЗО в зависимости от степени (от очень низкой до очень высокой) приоритетного развития в ней видов лесопользования определены типы перспективного лесопользования (лесозаготовительный, промыслово-заготовительный, охотничье-промысловый, сельскохозяйственный (агролесной), рекреационный, природоохранный, лесоперерабатывающий, инфраструктурно-промышленный).

Лесопользование может представлять собой самостоятельную тему для картографирования. Оно происходит как с изъятием (заготовка древесины, пищевых и иных лесных ресурсов), так и без изъятия лесных ресурсов (рекреация, охотничье хозяйство, научно-исследовательская и образовательная деятельность, сельское хозяйство и др.). Например, на мелкомасштабной карте “Использование лесов” [34] оно отражено относительно объемов заготовки древесины в процессе различных видов рубки в разрезе субъектов РФ. Объемы заготовки могут быть картографированы также по хозяйствам (хвойному, мелколиственному и др.) с учетом площади и объема расчетной лесосеки, удельного веса ее использования и др. Некоторые элементы содержания таких карт могут дополнять содержание карт лесной промышленности, учитывая входящую в их состав лесозаготовительную отрасль.

Карты продуктивности, функций лесов и лесных ресурсов. Карты объединены в группу на основе большей частью единых для них исходных показателей, характеризующих продукционные свойства лесных сообществ, влияющие на функциональные свойства леса и его ресурсный потенциал. По мнению В.Т. Виноградова, А.С. Мартынова и других авторов, “первичная продуктивность — запасы растительной массы и ее ежегодная продукция — один из наиболее достоверных показателей” [3, с. 58]. Продуктивность как экономическая категория отражает не только влияющие на нее производительные силы природы, определяемые тепло- и влагообеспеченностью, но и воздействие хозяйственных мероприятий. Для оценки продуктивности лесов чаще всего используют показатель годового или среднегодового прироста древостоев по запасу в м^3 на единицу лесопокрытой площади [3]. Продуктивность определяет бонитет древостоев и при условии их ненарушенности — общий или накопленный к определенному возрасту запас древесины (в м^3), объем

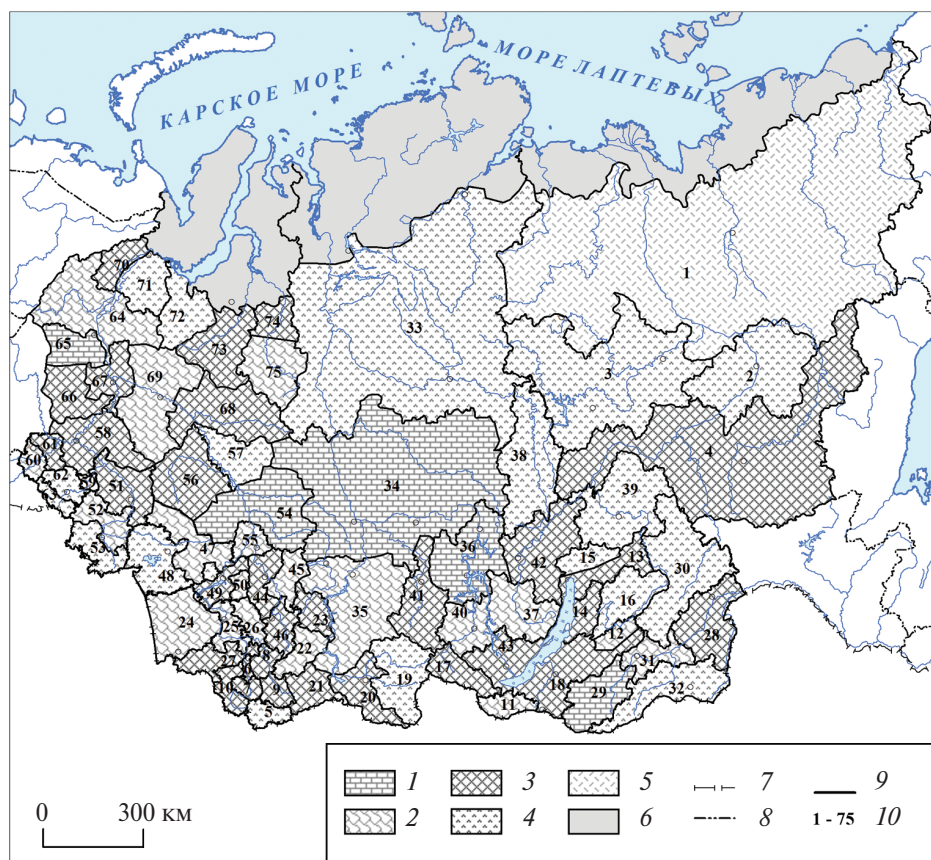


Рис. 1. Зоны освоения и использования лесов. Интенсивность освоения лесов всеми видами деятельности (использования лесов): 1 — очень высокая; 2 — высокая; 3 — средняя; 4 — низкая; 5 — очень низкая; 6 — не покрытые лесом земли (тундра). Границы: 7 — Российской Федерации (РФ); 8 — субъектов РФ; 9 — экономических зон освоения (ЭЗО) лесов. 10 — Порядковые номера (1–75) ЭЗО лесов.

Fig. 1. Forest development and use zones. Intensity of forest development by all types of activities: 1 — very high; 2 — high; 3 — average; 4 — low; 5 — very low; 6 — lands not covered by forest (tundra). Borders: 7 — of the Russian Federation (RF); 8 — of constituent entities of the RF; 9 — economic development zones (EDZ) of forests. 10 — Ordinal numbers (1–75) of EDZ of forests.

фитомассы (в тоннах) на единицу покрытой ими площади. Продуктивность может быть рассчитана для отдельных компонентов леса — древесных, недревесных (коры, древесной зелени и пр.), пищевых (грибов, ягод, орехов, древесных соков) и лекарственных ресурсов.

Авторская карта “Продуктивность лесов и их использование” (рис. 2) [8] своей целью ставит отображение на примере Байкальского региона результатов интегральной оценки потенциальной продуктивности лесов в границах природно-территориальных комплексов (геосистем). На важность картографирования лесов и оценки их функций на ландшафтной основе указывал еще В.Б. Сочава [40].

Продуктивность лесов, соотносимая с продуктивностью древесных насаждений, оценена для 12 лесных из 14 природно-территориальных комплексов (геосистем), обладающих единством природных условий (геоморфологических и гидротермиче-

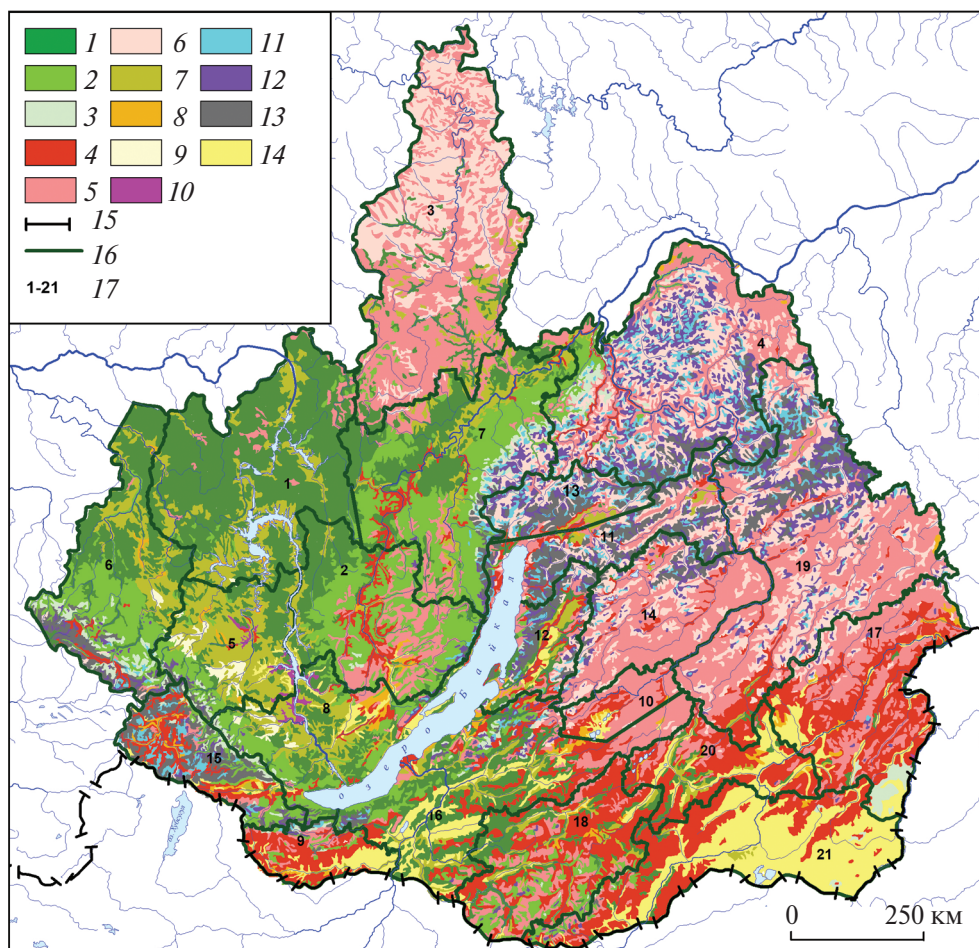


Рис. 2. Продуктивность лесов и их использование. 1–14 — Природно-территориальные комплексы. Границы: 15 — Российской Федерации; 16 — экономических зон освоения (ЭЗО) лесов. 17 — Порядковые номера (1–21) ЭЗО лесов.

Fig. 2. Forest productivity and use. 1–14 — Natural territorial complexes. Borders: 15 — Russian Federation; 16 — economic development zones (EDZ) of forests. 17 — Sequence numbers (1–21) of EDZ of forests.

ских) в рамках зональных типов лесной растительности. Основными оценочными показателями продуктивности явились: бонитет (классы I — V), запас ($\text{м}^3/\text{га}$) и прирост ($\text{м}^3/\text{га}$ в год) древостоев. Значения данных показателей рассчитаны на основе показателей лесных районов²⁰, территориально-сопряженных с картографируемыми природными комплексами. На карте также отражены границы ЭЗО лесов с перспективными для развития видами лесопользования. Выявлена тесная связь между продуктивностью лесов и видами лесопользования.

²⁰ Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации / Приказ Минприроды России от 18 авг. 2014 г. № 367 (ред. от 19 фев. 2019 г.): [сайт]. URL: http://www.consultant.ru/document/Cons_doc_LAW_169590/ (дата обращения: 15.05.2024).

Картографирование функций лесов основывается на теории их полифункциональных свойств [36] — сырьевых, экологических (климаторегулирующих, почвозащитных, гидрологических²¹ и др.) и социальных (рекреационных, санитарно-гигиенических, научно-образовательных, эстетических, психотерапевтических, противошумных и др.). В основе создания карт [11, 13, 15, 20, 21, 25, 29, 30] лежат различные подходы и методики. Оцениваются и картографируются отдельные функции лесов, их комплексы, функциональный потенциал лесных территорий, например, экологический в виде интегральных показателей [29].

Важное место занимает картографирование отдельных экологических функций, например, углерододепонирующей и кислородопроизводящей, которые по мнению некоторых авторов [18], являются важнейшими производными климата. В работе О.Д. Васильева и С.В. Чистова [11] степень выполнения лесом этих функций определена и картографирована при использовании методов А.Ю. Варфоломеева, А.И. Уткина и др. [10, 41]. Комплекс экологических функций лесов в составе функций растительности представлен в Национальном атласе России [35]. В соответствии с экосистемным подходом картографируются также экосистемные услуги леса (обеспечивающие, регулирующие, культурные) [21], оцениваемые монетарными и немонетарными показателями. В последние годы в стране на уровне лесничеств на основе ряда методик^{22, 23, 24} проводятся экологические и экономические (стоимостные) оценки средообразующих, водоохранных, защитных, санитарно-гигиенических, оздоровительных и иных функций леса.

При разработке карт сырьевых функций лесов используют подход, основанный на взаимосвязи данных функций с продуктивностью и запасами лесных ресурсов (недревесных, пищевых, лекарственных и др.), среди которых древесные занимают решающее значение [29, 30]. Важную часть сырьевого потенциала леса представляет эксплуатационный. На авторской карте “Эксплуатационный потенциал древесно-сырьевых ресурсов” [8] он оценен в разрезе 17 лесоресурсных районов Сибири. Используются показатели лесистости, удельные значения запаса и годового прироста древесины на единицу покрытой лесом площади ($\text{м}^3/\text{га}$), доля запаса спелых и перестойных древостоев в эксплуатационных лесах, доля запаса хвойных в спелых и перестойных древостоях (рис. 3).

Карты лесных ресурсов — комплексные карты обобщающего характера, которые в атласах часто открывают раздел “Леса и лесное хозяйство” и дают представление о лесохозяйственной деятельности в целом, лесах и их потенциале для развития лесоориентированных видов деятельности, лесной промышленности. Карты основаны на оценке и отображении многих показателей, большей частью связанных с сырьевым потенциалом лесов, прежде всего, на землях лесного фонда. Чаще всего, для данных карт он характеризуется показателями: общего или удельного запасов древесины в разрезе возрастных групп леса, породного состава,

²¹ Global Reviews on Forest Management and Provision of Hydrological Functions <https://www.sciencedirect.com/> [сайт]. URL: <https://www.sciencedirect.com/> (дата обращения: 15.05.2024).

²² Методика региональной оценки бюджета углерода лесов (РОБУЛ). [сайт]. URL: <https://carbonplatform.ru/metodika-regionalnoj-oczenki-byudzheta-ugleroda-lesov-robul> (дата обращения: 10.12.2024).

²³ Лебедев Ю.В. Методология, принципы и практика оценки лесных экосистем. [сайт]. URL: https://lesnoizhurnal.ru/issuesarchive/?ELEMENT_ID=199025 (дата обращения: 10.12.2024).

²⁴ Методика экономической оценки лесов / Приказ Федеральной службы лесного хозяйства России № 43 от 10 марта 2000 г. [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901828190> (дата обращения: 10.12.2024).

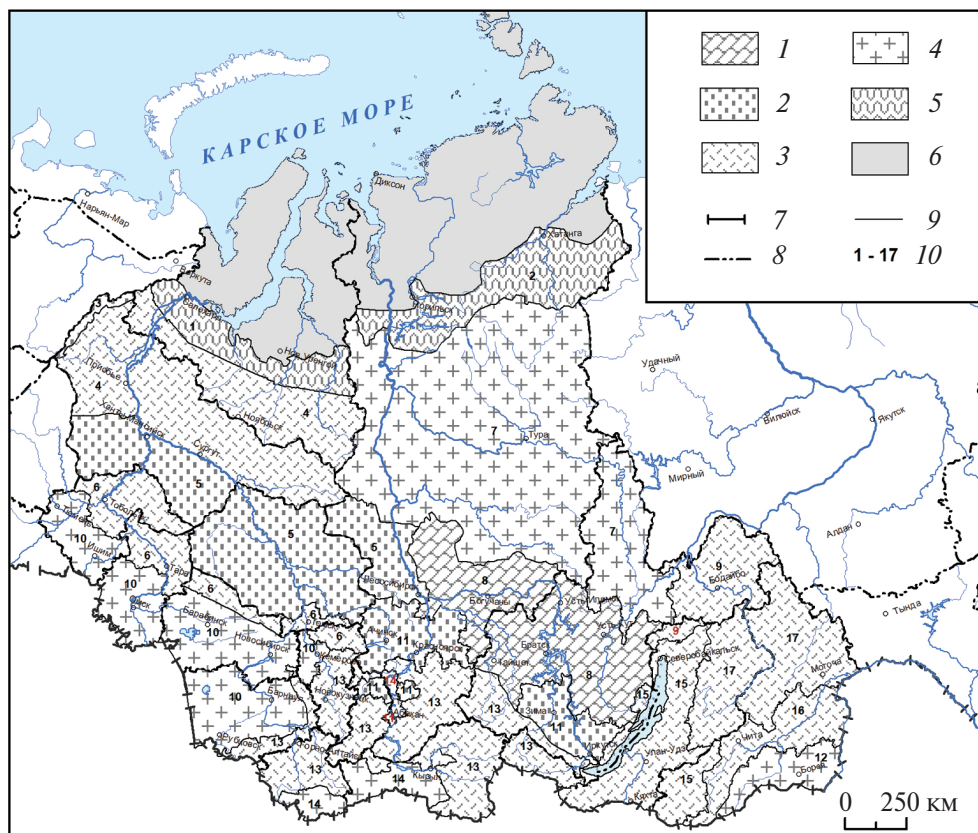


Рис. 3. Эксплуатационный потенциал древесно-сырьевых ресурсов: 1 — очень высокий; 2 — высокий; 3 — средний; 4 — низкий; 5 — очень низкий; 6 — не покрытые лесом земли (тундра). Границы: 7 — Российской Федерации (РФ); 8 — субъектов РФ; 9 — лесоресурсных районов. 10 — Порядковые номера (1–17) лесоресурсных районов.

Fig. 3. Exploitation potential of timber resources: 1 — very high; 2 — high; 3 — average; 4 — low; 5 — very low; 6 — lands not covered by forest (tundra). Borders: 7 — of the Russian Federation (RF); 8 — of subjects of the RF; 9 — of forest resource districts. 10 — Ordinal numbers (1–17) of forest resource districts.

функциональных категорий лесов (защитной, эксплуатационной, резервной) и др. [34], запасами других лесных ресурсов (грибов, ягод, древесных соков, лекарственных растений и пр.). Ресурсы леса могут оцениваться с помощью натуральных или стоимостных показателей [31]. На картах может отображаться текущая ресурсная ситуация, пространственно-временная динамика лесных ресурсов с выходом на прогнозные показатели, а также лесистость, границы размещения лесов, соотношения между площадями, занимаемыми функциональными категориями лесов, лесными и нелесными землями и их видами (например, лесными культурами, гарями и пр. на лесных землях; песками, болотами, дорогами и пр. на нелесных землях).

Карты лесной промышленности. На данных картах одним из основных элементов содержания являются ступки лесопромышленных предприятий, которые картографируются на уровнях пункта, например на карте “Хозяйственное использование лесов” [22], центра — на картах “Лесопромышленный комплекс” [8] и “Лесная промышленность” [34], узла, группировки, района характеристикой основных под-

отраслей (лесозаготовительной, деревообрабатывающей, целлюлозно-бумажной, лесохимической) по видам специализации. Размер (например, крупнейшие, крупные, средние, мелкие, прочие) картографируемых единиц, в частности, пунктов, центров или узлов, соотносимый с размером условного знака, может определяться исходя из объемов выпускаемой продукции, объемов выручки от ее реализации или числа работников, занятых в производстве. Объектами картографирования могут быть также типы организации лесопромышленного сектора экономики, выделенные на основе теории комплексного и кластерного подходов, учитывающей в первом случае — структурно-технологические, а во втором — диверсификационные особенности предприятий лесозаготовки и деревообработки [19], товарно-сырьевые связи, важнейшие объекты инфраструктуры (железные дороги, лесосплавные пути, зимники), лесоперевалочные пункты и пункты отгрузки, лесозаготовительные районы (лесосырьевые базы) и пр.

На примере авторской карты “Лесопромышленный комплекс”, характеризующей его на примере Сибири [8], сгустки лесопромышленных предприятий картографированы на уровне центра — образования, территориально локализованного в одном населенном пункте, где расположены либо несколько некрупных предприятий, либо одно крупное. Размер условного знака данного пункта вычислен относительно объема выручки от реализации продукции. Дополнительным условным знаком обозначены пункты, в которых предприятия находятся в системе полного цикла по комплексной переработке древесного сырья. Отображены также размещение лесов и лесозаготовительные районы, границы которых определены в соответствии с распространением эксплуатационных лесов.

Карты охраны, защиты и воспроизводства лесов. На картах, относящихся к этой группе, отображаются: виды (естественное, искусственное (посадка саженцев леса или посев семян), комбинированное) и объемы лесовосстановления; объемы и виды рубок (санитарные, ухода, спелых и перестойных древостоев, прочие); границы охраны лесов различными способами (наземная, аэро- и космонавигационная, комбинированная), объекты противопожарной охраны, интенсивность лесовосстановления и др. Интенсивность лесовосстановления, например на карте “Лесовосстановление” [22], хорошо передается через соотношение между объемами (m^3) рубок различных видов и лесовосстановления. На карте “Лесовозобновление” [6] в разрезе лесохозяйственных предприятий отображены как площади лесовосстановительных работ (га/год), так и потенциал лесовосстановления — через долю фонда лесовосстановления (гари, вырубки, прогалины и пр.) в общей лесной площади. В качестве элемента территориально-хозяйственной организации лесов могут отображаться территории, различные по режимам охраны, например земли ООПТ с подразделением их на функциональные зоны и земли лесного фонда с выделением защитных лесов и их категорий, особо защитных участков леса. К этой же группе следует отнести карты экономических затрат на ведение лесоохранной деятельности.

На картах лесоэкологических (лесохозяйственно-экологических) ситуаций отображаются как участки с неблагоприятной лесоэкологической ситуацией, так и прямые потери лесных ресурсов в результате негативных факторов природного (болезни леса, повреждения животными и насекомыми-вредителями, воздействие вод, ветровалы), природно-антропогенного (пожары) и антропогенного (незаконные рубки древостоев, заготовки или уничтожения иных лесных ресурсов), в том числе техногенного (например, загрязнение лесов) воздействия. Оценочные показатели ущерба в результате факторов неблагоприятного воздействия на леса могут быть

отображены как в абсолютных (площадь, объем, стоимость, например, при расчете потери лесов от негативного воздействия затоплений, абразионных процессов и др. [31]), так и в относительных единицах (например, на картах плотности усыхания лесов в га/тыс. км² лесной площади в год, или плотности загрязнения цезием-137 в Ки/км², или суммарной площади, пройденной пожарами в га/тыс. км² лесной площади [3]). На карте “Гибель лесов от неблагоприятных факторов” [34] способом картограмм отражена интенсивность гибели лесов (в процентах от площади лесов), а круговыми картодиаграммами — площади погибших лесов с дифференциацией ее по причинам гибели. Карты нарушенности лесов [47] или малонарушенных лесных территорий [4], по сути, являются синтетическими картами с интегральным обобщением показателей.

В разработке карт этой группы высока роль картографических источников, выступающих в качестве каркасной основы. К одному из них относится картографическая модель речных бассейнов Европейской России [16], авторы которой предлагают использовать ее при проведении геоэкологических оценок. Следует заметить, что бассейновый подход получил большое распространение в исследованиях природной среды, в том числе лесов, на что указывают М.С. Савин и другие авторы [39].

Методы и подходы к созданию карт группы столь же разнообразны, как и их тематическое содержание. Кратко рассмотрим их на примере карт природной пожарной опасности лесов, теория создания которых представлена в ряде работ [1, 8, 36]. В практике лесного хозяйства природная пожарная опасность лесов оценивается по 5 классам шкалы И.С. Мелехова, единой для лесов всей страны. Однако стремление к учету природно-климатических условий отдельных территорий обусловило необходимость разработки региональных шкал [44]. Большое значение при картографировании пожароопасности лесов имеют прогнозные карты [42], а также карты оценки рисков от лесных пожаров [8].

На авторской оценочной карте “Пожароопасность лесов” [8], разработанной для Байкальского региона, особенностью содержания является отображение потенциальной пожароопасности не только для лесной, но и нелесной растительности, в том числе с участками лесов. Все сообщества разбиты по группам (типам) в зависимости от класса растительных горючих материалов [12] и природных факторов (климатических, орографических и пр.), влияющих на особенности (сезонную скорость, пространственное размещение, распространение и пр.) возгорания. Для каждой группы определен соответствующий класс потенциальной природной пожарной опасности. В частности, для лесов выделено пять классов: от наиболее до наименее пожароопасных. Для нелесных растительных сообществ выделено три класса природной пожарной опасности. Для каждого из классов приведены данные по особенностям возникновения потенциальных пожаров, например их виды (верховые, низовые), вероятные сроки пожароопасных ситуаций в течение пожароопасного периода. Цвета, характеризующие пожарную опасность лесов, соответствуют применяемым службами лесного хозяйства и лесопожарной охраны. Для участков с нелесной растительностью использованы произвольные цвета.

Карты истории изучения и освоения лесов представляют собой практически не разработанную группу, что связано прежде всего с трудностями поиска архивных картографических или статистических документов, а также обработки, анализа и оценки исследуемых показателей. Однако такие карты представляют интерес, связанный с реконструкцией географических знаний о лесах прошлых исторических

периодов, эволюцией этих знаний в окружающем человека пространстве, этапами изучения, освоения лесов и пр. В известной мере к этой группе относятся карты лесорастительных реконструкций, например карты лесистости Европейской части России, начиная со второй половины XVI в. и до второй половины XIX в. [3].

Заключение

Тематика и содержание лесных карт очень разнообразны и создание их, учитывая огромное экологическое и социально-экономическое значение леса и связанных с ним явлений и процессов, представляет в современных условиях актуальную задачу для многих стран, включая Россию. Для создания лесных карт в настоящее время создана обширная теоретико-методологическая и информационная база, охватывающая лесные пространства по всему миру. Общие задачи при создании лесных карт связаны с рациональным использованием и охраной лесов, оценкой различных условий для их воспроизводства и улучшения качественных характеристик, оценкой роли лесов в формировании экологического и социально-экономического потенциала территорий.

Закрепление в отечественном законодательстве понятия “лесные карты” представляет собой новый этап в развитии тематического картографирования. Несмотря на охват данным понятием большого количества тематико-содержательных сюжетов, они отвечают большей частью служебным (отраслевым) задачам. Поэтому предлагается рассмотрение данного понятия в более широкой трактовке, что связано со значительным количеством научных исследований и картографических работ, отражающих многоаспектный характер леса. Расширенному пониманию лесных карт отвечает тематическая классификация, проведенная в результате анализа содержания и теоретико-методологических подходов к их разработке. Выделенные классификационные группы карт охватывают основные блоки (природный, социально-экономический и экологический) тематического картографирования, объединяющие в своем составе множество карт более узкой тематики, перечень которых имеет тенденцию к расширению. Работа призвана также упорядочить тематику и содержание, состав основных показателей для лесных карт, входящих в те или иные классификационные группы.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке научно-исследовательской работы “Цифровое атласное картографирование развития общества и природы регионов Северной и Северо-Восточной Азии” (№ AAAA-A21-121012190063-2).

Список литературы

1. Аброскина А.К., Волокитина А.В., Корец М.А. Составление карт природной пожарной опасности по материалам лесоустройства // Вестник КрасГАУ. 2012. № 7 (70). С. 60–64.
2. Асламов С.В. Отдельные аспекты системного анализа развития лесного комплекса // Известия Иркутской государственной экономической академии (Известия Байкальского государственного университета). 2007. № 5 (55). С. 62–65.
3. Атлас биологического разнообразия лесов Европейской России и сопредельных территорий / Моск. представительство Всемирного Союза Охраны природы. Гл. ред. А.С. Мартынов. М: ПАИМС, 1996. 144с.
4. Атлас малонарушенных лесных территорий России: [сайт]. URL: <http://old.forest.ru/rus/publications/intact/index.htm> (дата обращения: 20.07.2024).
5. Атлас Иркутской области. М.; Иркутск: ГУГК, 1962. 182 с.

6. Атлас Иркутской области: экологические условия развития. М.; Иркутск, 2004. 94 с.
7. Атлас социально-экономического развития России. М.: ФГУП ПКО “Картография”, 2009. 216 с.
8. Атлас. Байкальский регион: общество и природа. М.: Паулсен, 2021. 320 с.
9. Байкал. Атлас. М.: Федер. служба геодезии и картографии России, 1993. 160 с.
10. Варфоломеев А.Ю., Мироненко А.А. Влияние накопления биологических повреждений на выделение кислорода хвойными насаждениями на севере // *Фундаментальные исследования*, 2012. № 9. С. 361–368.
11. Васильев О.Д., Чистов С.В. Исследование и картографирование экологических функций Московского региона: методика и результаты / *Материалы Междунар. конф. “ИнтерКарто. Интер ГИС”*. 218.24(1): 348–367. URL: <https://doi.org/10.29057/2414-9179-2018-1-24-348-367>
12. Волокитина А.В., Софронов М.А. Классификация и картографирование растительных горючих материалов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 314 с.
13. Волкова Е.А., Федорова И.Т. Карта экологических функций растительного покрова России // *Геоботаническое картографирование*. Санкт-Петербург, 1993. С. 51–57.
14. Временные технические указания по созданию и оформлению лесных карт / *Федеральное государственное бюджетное учреждение “Рослесинфорг”*. М., 2017. 75 с.
15. Грибова С.А., Юрковская Т.К. Карты растительности и функций растительного покрова как основа программы оптимизации ландшафта // *Геоботаническое картографирование*. Л.: Наука, Ленингр. Отд-ние, 1981. С. 63–66.
16. Ермолаев О. П., Мальцев К.А., Мухарамова С.С., Харченко С.В., Веденева Е.А. Картографическая модель речных бассейнов Европейской России // *География и природные ресурсы*. 2017. № 2. С. 27–36.
17. Загребнев Т.И., Макаренко А.А., Степанченко А.Л. Вопросы теории атласного картографирования // *Вестник СГУГиТ*. Т.25. № 1. 2020. С. 136–144.
18. Замолодчиков Д.Г. Система оценки и прогнозов запаса углерода в лесных экосистемах // *Устойчивое лесопользование*, 2011. № 4(29). С. 15–22.
19. Измestьев А.А. Территориально-отраслевая организация лесного сектора: комплексный и кластерный подходы // *Известия Иркутской государственной экономической академии (Известия Байкальского государственного университета)*. 2007. № 5(55). С. 57–62.
20. Зимин М.В. Разработка методики картографирования средообразующих функций бореальных лесов Евразийской России: Дисс. кан-та географ. наук. М.: МГУ, 2009. 157 с.
21. Истомина Е.А., Лужкова Н.М. Картографирование экосистемных услуг в Забайкальском национальном парке // *Геодезия и картография*. 2017. № 7. С. 38–46. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2017-925-7-3846>
22. Канско-Ачинский топливно-энергетический комплекс (серия карт). М.: ГУГК, 1991. 52 с.
23. Кошкарев А.В., Антипов А.Н., Батуев А.Р., Ермошин В.В., Каракин В.П. Геопорталы в составе инфраструктур пространственных данных: российские академические ресурсы и геосервисы // *География и природные ресурсы*. 2008. № 1. С. 21–31.
24. Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Губаев А.В., Лежнин С.А., Полевщикова Ю.В., Демисева Ю.Н. Четыре десятилетия исследования лесов по снимкам // *Вестник Поволж. госуд. техн. ун-та*, 2014. № 1(21). С. 18–32.
25. Лавренко Н.Н. Опыт составления карты ландшафтно-защитных функций растительного покрова зоны Байкало-Амурской магистрали // *Геоботаническое картографирование*: 1977. Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1977. С. 20–32.
26. Лебзак Е.В. Современные проблемы и направления развития лесной картографии // *ИНТЕРЭКСПО ГЕО-Сибирь*. Т. 1. 2022. С. 198–205. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2022-1-198-205>

27. Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 № 200-ФЗ (ред. от 26.12.2024). [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902017047> (дата обращения: 20.12.2024).
28. Лукина Н.В., Гераськина А.П., Горнов А.В., Шевченко Н.Е., Куприн А.В., Гонова М. В. Биоразнообразие и климаторегулирующие функции лесов: Актуальные вопросы и перспективы исследований // Вопросы лесной науки. Т. 3. № 1. 2020. С. 1–90. <https://doi.org/31509/2658-607x-2020-3-4-1-90>
29. Макаренко Е.Л. Оценка и картографирование экологического и древесно-сырьевого потенциала лесных ресурсов Иркутской области // География и природ. ресурсы. 2007. № 1. С. 115–124.
30. Макаренко Е.Л. Картографирование лесопромышленного комплекса Сибири и древесно-сырьевого потенциала его развития // Геодезия и картография. 2019. Т. 10. № 11. С. 37–47. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2019-953-11-37-47>
31. Макаренко Е.Л. Картографирование лесной растительности и оценка ущерба от ее потенциальной потери в результате негативного воздействия вод // Картографирование биоты: традиции и актуальные вопросы развития / Под ред. В.М. Плюснина, И.Н. Владимирова: материалы Междунар. научной конф. (Иркутск, 10–12 октября 2023 г.). Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2023. С. 61–64.
32. Малышева Н.В., Филипчук А.Н., Золина Т.А., Кинигопуло П.С., Шалимова Е.М., Попик С.А., Сильнягина Г.В. Анализ зарубежного опыта национальных инвентаризаций лесов: методы, выборка, результаты и международная статистика // Лесохозяйственная информация. 2022. № 2. С. 90–132. <https://doi.org/10.24419/LNI.2304-3083.2022.2.08>
33. Мезенина О.Б., Камалова О.Ф. Формирование территориальной организации землепользования лесного комплекса регионов: сб. Евразийского конгресса зеленых инноваций: “IFOREST”. Воронеж: Воронежский лесотехнический университет, 2015. С. 193–196.
34. Национальный атлас России в четырех томах [Карты] / гл. ред.: А.В. Бородко, В.В. Свешников. [М-бы разные]. М.: Роскартография, 2004–2008.
35. Национальный атлас почв Российской Федерации. М.: Астрель, АСТ, 2011. 632 с.
36. Плотникова А.С., Ершов Д.В. Метод актуализации карт классов природной пожарной опасности лесной территории с помощью спутниковых тематических продуктов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 181–189.
37. Рубцов М.В. Классификация функций и роли леса // Лесоведение. 1984. № 2. С. 3–9.
38. Русинова Н.В., Мазуркин П.М., Фадеев А.Н. Методика построения электронной тематической лесной карты // Современные наукоемкие технологии. 2012. № 1. С. 35–41.
39. Савин М.С., Плотников А.С., Нарочкова А.Н. Применение ГИС-технологий для создания пространственных предикторов в целях картографирования экосистемных функций лесов на локальном уровне // Вопросы лесной науки. 2022. Т. 5. № 2. Ст. № 105. <https://doi.org/10.31509/2658607x-202252-105>
40. Сочава В.Б. Теоретическая и прикладная география. Новосибирск: Наука, 2005. 288 с.
41. Уткин А.И., Замолотчиков Д.Г., Пряжников А.А. Методы определения депонирования углерода фитомассы и нетто-продуктивности лесов (на примере Республики Беларусь) // Лесоведение. 2003. № 1. С. 48–57.
42. Чумаченко С.И., Маюк Д.Н. Модель долгосрочного прогнозирования динамики показателей природной пожарной опасности для зоны тайги и смешанных лесов европейской части России. Основные параметры модели // Научные труды МГУЛ. Электронный журнал. 2012. № 10. С. 1–13.
43. Шевелев С.Л., Немич В.Н., Воробьева И.А., Усов С.В. Нормативная база для оценки лесосек в Сибири // Хвойные бореальной зоны. 2023. Т. 41. № 1. С. 73–79. <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2023-1-73-79>

44. Шур Ю.З., Нешатаев В.Ю., Степченко А.А., Шаповал Н.В. Региональные шкалы оценки природной пожарной опасности лесов // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского ин-та лесного хозяйства. 2020. № 2. С 59–69.
45. Экологический атлас России [Карты] / гл. ред.: Касимов Н.С., Тикунов В.С.; отв. ред.: Венчикова В.Р., Котова Т.В. [Масштабы разные]. М.: Феория, 2017. 509 с.
46. Экологический атлас бассейна озера Байкал. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы, 2015. 145 с.
47. Экологический атлас Байкальского региона, 2017. [сайт]. URL: <http://atlas.isc.irk.ru> (дата обращения 15.09.2024)
48. Polezhaev A.N. GIS “Boreal vegetation map of the north of Russian Far East” for international project on preparation of circumboreal vegetation map (CBVM) // InterCarto InterGIS. № 1(19). Pp. 245–261. <https://doi.org/10.24057/2414-9179-2013-1-19-245-261>
49. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A. et al. (2013) High-resolution global maps of 21st century forest cover change. *Science* (New York, NY), 342. Pp. 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
50. Sploding M., Blasko F. and Field C. World mangrove atlas. The International Society for Mangrove Ecosystems, 1997. Okinawa, Japan. 178 pp.
51. Tao S., Labrière N., Calders K. et al. Mapping tropical forest trees across large areas with lightweight cost-effective terrestrial laser scanning. // *Annals of Forest Science* 78, 103 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01113-9>

Thematic Classification of Forest Maps and Methodological Principles of Their Creation

E. L. Makarenko

V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia

E-mail: elmakarenko@bk.ru

Received 14.02.2025

Revised 22.04.2025

Accepted 28.04.2025

The aim of the study is thematic classification of forest maps on the basis of analysis and evaluation of their content, methodological bases of creation, including within the framework of small-scale atlas mapping. Forest maps are spatial-temporal, symbolic models that reflect the multidimensional nature of forests, their importance in the development and interaction of nature and society. In a broad sense and within the framework of this work, they are understood as all maps whose content is related to natural, socio-economic and environmental aspects of forest mapping. The basis for achieving the goal is rich theoretical and methodological experience in creating forest maps for Russia, its individual entities and macro-regions, such as the Baikal region, the Baikal basin, etc. Examples include the small-scale maps developed by authors and presented in a number of published complex atlases. Their development is carried out using methods of mathematical-statistical and expert analysis, remote sensing, geo-information modeling, etc. As a result of the study, forest maps are divided into seven main classification groups: maps of forests and their main characteristics; spatial management of forests; productivity and restoration, functions of forests and forest resources; forest industry; forest conservation, protection; forest ecological (forestry-ecological) situations; history of the study and development of forests. Map content reflects: location and condition of forests; assessment of resource, ecological and social functions of forests; types of use of forests; location and water performance of forest

industries; forest disturbance caused by adverse natural and anthropogenic factors; natural fire hazard of forests, etc.

Keywords: forest fund lands, forest resources, forest use, atlas mapping, forest industry

References

1. Abroskina A.K., Volokitina A.V., Korecz M.A. Sostavlenie kart prirod-noj pozharnoj opasnosti po materialam lesoustrojstva // Vestnik KrasGAU. 2012. № 7 (70). S. 60–64.
2. Aslamov S.V. Otdel'ny'e aspekty` sistemnogo analiza razvitiya lesnogo kompleksa // Izvestiya Irkutskoj gosudarstvennoj e'konomicheskoy akademii (Izvestiya Bajkal'skogo gosudarstvennogo universiteta). 2007. № 5 (55). S. 62–65. (in Russ.)
3. Atlas biologicheskogo raznoobraziya lesov Evropejskoj Rossii i sopredel'nyh` territorij / Mosk. predstavitel'stvo Vsemirnogo Soyuza Ohrany` prirody`. Gl. red. A.S. Marty'nov. M: PAIMS, 1996. 144s.
4. Atlas malonarushenny'x lesny'x territorij Rossii: [sajt]. URL: <http://old.forest.ru/rus/publications/intact/index.htm> (data obrashheniya: 20.07.2024)
5. Atlas Irkutskoj oblasti. M.; Irkutsk: GUGK, 1962. 182 s.
6. Atlas Irkutskoj oblasti: e'kologicheskie usloviya razvitiya. M.; Irkutsk, 2004. 94 s.
7. Atlas social'no-e'konomicheskogo razvitiya Rossii. M.: FGUP PKO “Kartografiya”, 2009. 216 s.
8. Atlas. Bajkal'skij region: obshhestvo i priroda. M.: Paulsen, 2021. 320 s.
9. Bajkal. Atlas. M.: Feder. sluzhba geodezii i kartografii Rossii, 1993. 160 s.
10. Varfolomeev A.Yu., Mironenko A.A. Vliyanie nakopleniya biologicheskix povrezhdenij na vy'delenie kisloroda xvojny'mi nasazhdeniyami na severe // fundamen-tal'ny'e issledovaniya, 2012. № 9. S. 361–368.
11. Vasil'ev O.D., Chistov S.V. Issledovanie i kartografirovanie e'kologicheskix funkcij Moskovskogo regiona: metodika i rezul'taty` / Materialy` Mezhdunar. konf. “InterKarto. Inter GIS”. 218.24(1): 348–367. <https://doi.org/10.29057/2414-9179-2018-1-24-348-367>
12. Volokitina A.V., Sofronov M.A. Klassifikaciya i kartografirovanie rastitel'ny' goryuchix materialov. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2002. 314 s.
13. Volkova E.A., Fedorova I.T. Karta e'kologicheskix funkcij rastitel'nogo pokrova Rossii // Geobotanicheskoe kartografirovanie. Sankt-Peterburg, 1993. S. 51–57.
14. Vremenny'e texnicheskie ukazaniya po sozdaniyu i oformleniyu lesny'x kart / Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie “Roslesinforg”. M., 2017. 75 s.
15. Gribova S.A., Yurkovskaya T.K. Karty` rastitel'nosti i funkcij rastitel'nogo pokrova kak osnova programmy` optimizacii landshafta // Geobotanicheskoe kartografirovanie. L.: Nauka, Leningr. otd-nie, 1981. S. 63–66.
16. Ermolaev O.P., Mal'cev K.A., Muxaramova S.S., Xarchenko S.V., Vedeneeva E.A. Kartograficheskaya model' rechny'x bassejnov Evropejskoj Rossii // Geografiya i prirodny'e resursy`. 2017. № 2. S. 27–36.
17. Zagrebnev T.I., Makarenko A.A., Stepanchenko A.L. Voprosy` teorii atlasnogo kartografirovaniya // Vestnik SGUGiT. T.25. № 1. 2020. S. 136–144.
18. Zamolodchikov D.G. Sistema ocenki i prognozov zapasa ugleroda v lesny'x e'kosistemax // Ustojchivoe lesopol'zovanie, 2011. № 4(29). S. 15–22.
19. Izmest'ev A.A. Territorial'no-otraslevaya organizaciya lesnogo sektora: kompleksny'j i klasterny'j podxody` // Izvestiya Irkutskoj gosudarstvennoj e'konomicheskoy akademii (Izvestiya Bajkal'skogo gosudarstvennogo universiteta). 2007. № 5 (55). S. 57–62.

20. Zimin M.V. Razrabotka metodiki kartografirovaniya sredooobrazuyushhix funkcij boreal'ny'x lesov Evrazijskoj Rossii: Diss. kan-ta geograf. nauk. M.: MGU, 2009. 157 s.
21. Istomina E.A., Luzhkova N.M. Kartografirovanie e'kosistemny'x uslug v Zabajkal'skom nacional'nom parke // Geodeziya i kartografiya. 2017. № 7. S. 38–46.
<https://doi.org/10.22389/0016-7126-2017-925-7-3846>
22. Kansko-Achinskij toplivnoe'nergeticheskij kompleks (seriya kart). M.: GUGK, 1991. 52 s.
23. Koshkarev A.V., Antipov A.N., Batuev A.R., Ermoshin V.V., Karakin V.P. Geoportaly' v sostave infrastruktur prostranstvenny'x danny' rossijskie akademicheskie resursy' i geoservisy' // Geografiya i prirodny'e resursy. 2008. № 1. S. 21–31.
24. Kurbanov E'.A., Vorob'ev O.N., Gubaev A.V., Lezhnin S. A., Polevshhikova Yu.V., Demisheva Yu.N. Chety're desyatiletiya issledovaniya lesov po snimkam // Vestnik Povolzh. gosud. texn. un-ta, 2014. № 1(21). S. 18–32.
25. Lavrenko N.N. Opy't sostavleniya karty' landshaftno-zashhitny' funkcij rastitel'nogo pokrova zony' Bajkalo-Amurskoj magistrali // Geobotanicheskoe karto-grafirovanie: 1977. L.: Nauka, Lenin-gr. otd-nie, 1977. S. 20–32.
26. Lebzak E. V. Sovremennyy'e problemy' i napravleniya razvitiya lesnoj karto-grafii // INTERE'KSPO GEO-Sibir'. T. 1. 2022. S. 198–205.
<https://doi.org/10.33764/2618-981X-2022-1-198-205>
27. Lesnoj kodeks Rossijskoj Federacii ot 04.12.2006 № 200-FZ (red. ot 08.08.2024). [sajt]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902017047> (data obrashheniya: 20.12.2024).
28. Lukina N.V., Geras'kina A.P., Gornov A.V., Shevchenko N.E., Kuprin A.V., Gonova M. V. Bioraznoobrazie i klimatoreguliruyushhie funkcii lesov: Aktual'ny'e voprosy' i perspektivy' issledovaniy // Voprosy' lesnoj nauki. T. 3. № 1. 2020. S. 1–90.
<https://doi.org/31509/2658-607x-2020-3-4-1-90>
29. Makarenko E.L. Ocenka i kartografirovanie e'kologicheskogo i drevesno-sy'r'evogo potentsiala lesny'x resursov Irkutskoj oblasti // Geografiya i prirod. re-sursy'. 2007. № 1. S. 115–124.
30. Makarenko E.L. Kartografirovanie lesopromy'shlennogo kompleksa Sibiri i drevesno-sy'r'evogo potentsiala ego razvitiya // Geodeziya i kartografiya. 2019. T. 10. № 11. S. 37–47.
<https://doi.org/10.22389/0016-7126-2019-953-11-37-47>
31. Makarenko E.L. Kartografirovanie lesnoj rastitel'nosti i ocenka ushherba ot ee potencial'noj poteri v rezul'tate negativnogo vozdejstviya vod // Kartografirovanie bioty': tradicii i aktual'ny'e voprosy' razvitiya / Pod red. V.M. Plyusnina, I.N. Vladimirova: Materialy' Mezhdunar. nauchnoj konf. (Irkutsk, 10–12 oktyabrya 2023 g.). Irkutsk: Izd-vo In-ta geografii im. V.B. Sochavy' SO RAN, 2023. S. 61–64.
32. Maly'sheva N.V., Filipchuk A.N., Zolina T.A., Kinigopulo P.S., Shalimova E.M., Popik S.A., Sil'nyagina G.V. Analiz zarubezhnogo opy'ta nacional'ny'x inventarizacij lesov: metody', vy'borka, rezul'taty' i mezhdunarodnaya statistika // Lesoxozyajstvennaya informaciya. 2022. № 2. S. 90–132.
<https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2022.2.08>
33. Mezenina O.B., Kamalova O.F. Formirovanie territorial'noj organizacii zemlepol'zovaniya lesnogo kompleksa regionov: sb. Evrazijskogo kongressa zeleny'x innovacij: "IFOREST". Voronezh: Voronezhskij lesotexnicheskij universitet, 2015. S. 193–196.
34. Nacional'ny'j atlas Rossii v chety'rex tomax [Karty'] / gl. red.: A.V. Borodko, V.V. Sveshnikov. [M-by' razny'e]. M.: Roskartografiya, 2004–2008.
35. Nacional'ny'j atlas pochv Rossijskoj Federacii. M.: Astrel', AST, 2011. 632 s.
36. Plotnikova A.S., Ershov D.V. Metod aktualizacii kart klassov prirodnoj pozharnoj opasnosti lesnoj territorii s pomoshh'yu sputnikovyx tematicheskix produktov // Sovremennyy'e problemy' distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2015. T. 12. № 1. S. 181–189.
37. Rubczov M.V. Klassifikaciya funkcij i roli lesa // Lesovedenie. 1984. № 2. S. 3–9.

38. Rusinova N.V., Mazurkin P.M., Fadeev A.N. Metodika postroeniya e'lektronnoj tematicheskoy lesnoj karty // *Sovremennyye naukoemkie tekhnologii*. 2012. № 1. S. 35–41.
39. Savin M.S., Plotnikov A.S., Narochkova A.N. Primenenie GIS-tekhnologij dlya sozdaniya prostranstvenny'x prediktorov v celyax kartografirovaniya e'kosistemny'x funkcij lesov na lokal'nom urovne // *Voprosy lesnoj nauki*. 2022. T. 5. № 2. St. № 105.
<https://doi.org/10.31509/2658607x-202252-105>
40. Sochava V.B. *Teoreticheskaya i prikladnaya geografiya*. Novosibirsk: Nauka, 2005. 288 s.
41. Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Pryazhnikov A.A. Metody opredeleniya de-ponirovaniya ugleroda fitomassy i netto-produktivnosti lesov (na primere Respubliki Belarus') // *Lesovedenie*. 2003. № 1. S. 48–57.
42. Chumachenko S.I., Mayuk D.N. Model' dolgosrochnogo prognozirovaniya dinamiki pokazatelej prirodnoj pozharnej opasnosti dlya zony tajgi i smeshanny'x lesov evropejskoj chasti Rossii. Osnovny'e parametry modeli // *Nauchny'e trudy MGUL. E'lektronny'j zhurnal*. 2012. № 10. S. 1–13.
43. Shevelev S.L., Nemich V.N., Vorob'eva I.A., Usov S.V. Normativnaya baza dlya ocenki lesosek v Sibiri // *Xvojny'e boreal'noj zony*. 2023. T. 41. № 1. S. 73–79.
<https://doi.org/10.53374/1993-0135-2023-1-73-79>
44. Shur Yu.Z., Neshataev V.Yu., Stepchenko A.A., Shapoval N.V. Regional'ny'e shkaly ocenki prirodnoj pozharnej opasnosti lesov // *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo in-ta lesnogo xozyajstva*. 2020. № 2. S. 59–69.
45. *E'kologicheskij atlas Rossii [Karty] / gl. red.: Kasimov N.S., Tikunov V.S.; otv. red.: Venchikova V.R., Kotova T.V. [Masshtaby razny'e]. M.: Feoriya, 2017. 509 s.*
46. *E'kologicheskij atlas bassejna ozera Bajkal. Irkutsk: Izd-vo Instituta geografii im. V.B. Sochavy, 2015. 145 s.*
47. *E'kologicheskij atlas Bajkal'skogo regiona, 2017. [sajt]. URL: <http://atlas.isc.irk.ru>.*
48. Polezhaev A.N. GIS “Boreal vegetation map of the north of Russian Far East” for international project on preparation of circumboreal vegetation map (CBVM) // *InterCarto InterGIS*. № 1(19). Pp. 245–261. <https://doi.org/10.24057/2414-9179-2013-1-19-245-261>
49. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A. et al. (2013) High-resolution global maps of 21st century forest cover change. *Science* (New York, NY), 342. Pp. 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
50. Sploding M., Blasko F. and Field C. *World mangrove atlas*. The International Society for Mangrove Ecosystems, 1997. Okinawa, Japan. 178 pp.
51. Tao S., Labrière N., Calders K. et al. Mapping tropical forest trees across large areas with lightweight cost-effective terrestrial laser scanning // *Annals of Forest Science* 78, 103 (2021).
<https://doi.org/10.1007/s13595-021-01113-9>

УДК 551.89

НОВЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПОЗДНЕГОЛОЦЕНОВЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ УРОВНЯ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА В ЮЖНОМ ПРИЛАДОЖЬЕ

© 2025 г. А.О. Аксенов^{1,2,3,*}, Д.Ю. Большианов¹, С.А. Правкин¹,
Г.Б. Лебедев¹, З.В. Пушина^{1,4}, П.С. Зубкова⁵

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского,
Санкт-Петербург, Россия

⁴ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия

⁵Нижне-Свирский государственный заповедник

* E-mail: aksenov2801@gmail.com

Поступила в редакцию 04.12.2024 г.

После доработки 28.04.2025 г.

Принята к публикации 13.05.2025 г.

В работе представлены результаты исследований, детализирующих колебания относительного уровня Ладожского озера в районе Южного Приладожья в период после завершения Ладожской трансгрессии. Полевые работы проведены на Стороженском полуострове, а также в Нижне-Свирском заповеднике. Методика работ включает в себя геоморфологическое профилирование, бурение торфяников, а также диатомовый анализ, люминесцентное датирование в инфракрасном спектре и радиоуглеродное датирование отобранных отложений. Установлено, что уровень Ладожского озера в максимальную стадию трансгрессии 2900 календарных лет назад (кал. л.н.) в этом районе достигал абсолютной высоты 16.5 м над уровнем моря (н.у.м.), что маркируется береговыми валами, расположенными на этой отметке. В интервале 2100–1200 кал. л.н. средний уровень стабилизировался на отметках 6–8 м. В результате сформировалась аккумулятивная терраса с большим количеством береговых валов. Предполагается, что 1200–600 кал. л.н. произошло малоамплитудное повышение уровня, в результате которого сформировался береговой бар на высоте 7.6 м.

Ключевые слова: Ладожское озеро, поздний голоцен, колебания уровня озера, Ладожская трансгрессия, береговые формы рельефа, ИКСЛ-датирование, радиоуглеродное датирование, диатомовый анализ

DOI: 10.31857/S0869607125030025, EDN: LTCRDM

Введение

Исследования изменений уровня Ладожского озера начались еще в конце XIX в. Финским геологом Ю. Айлио [33] была установлена трансгрессивная фаза развития водоема, независимая от уровня Балтийского моря. Впоследствии она была обозначена как “Ладожская трансгрессия”. Ее возраст был определен поздним голоценом (суббореалом) [22]. В дальнейшем советские, а затем и российские исследователи не раз подходили к изучению Ладожской трансгрессии. Основные дискуссии касались времени и уровня развития фазы максимального подъема воды (например, [15; 19; 20]).

В результате последующего снижения уровня озера в Южном Приладожье сформировалась полоса аккумулятивных озерных равнин и террас, окаймляющих берег озера (вторая терраса по К.К. Маркову [21]). Наиболее широкие участки (до 5–8 км) этих поверхностей приурочены к заливам озера (бухта Петрокрепость, Волховская, Свирская губы). Наблюдения ряда авторов позволяют предполагать, что при общем снижении уровня происходили осцилляции высоты береговой линии, что привело к формированию террасовых уровней. Так, Е.Г. Шеффером [27] отмечаются две террасы Ладожской трансгрессии, имеющие абсолютную высоту 18 и 9 м. Д.Б. Малаховский с соавторами в нижнем течении р. Оять устанавливает два уровня древних береговых линий — на 16 и 12 м [8, 20].

Таким образом, на сегодняшний день существуют разночтения в истории колебаний уровня воды Ладожского озера. Наше исследование призвано частично закрыть этот пробел. Целью нашего исследования является детализация хода колебаний относительного уровня воды в Южном Приладожье на основе новых данных о геоморфологии и возрасте береговых образований и материалов предыдущих исследований.

Характеристика района исследования

Объектом изучения выступает субаэральная часть юго-восточного побережья Ладожского озера. Сам водоем расположен в умеренном поясе Северного полушария, в подзоне южной тайги. Площадь озера равна 17765 км², объем воды — 845 км³ [39]. Его котловина расположена на стыке двух тектонических структур — Восточно-Европейской плиты и Балтийского кристаллического щита, что определяет контрастность рельефа дна и берегов [3]. Средний уровень озера составляет 4.7 м БС [17]. Многолетняя динамика уровня характеризуется разнопериодными циклами, долгопериодными (30 лет) и короткопериодными (5–11 лет). Амплитуды этих колебаний в среднем достигают 3 м. Современная скорость снижения уровня составляет 3.6 мм/год [25].

Формирование береговых аккумулятивных форм, исследуемых в данной работе, обусловлено совокупностью экзогенных факторов, основным из которых выступает прибойный поток, трансформирующийся из волнового движения при подходе к берегу. Средняя высота волны при средней скорости ветра колеблется от 0.8 до 1.1 м, средняя длина — 8–12 м. Во время штормов высота волн в южной части может повышаться до 5–8 м, в центральной и северной — до 4 м [17]. Амплитуды приливно-отливных, сгонно-нагонных колебаний, а также стоячих волн — сейш — минимальны [24]. К второстепенным процессам формирования берега относятся: эоловые процессы (дюнообразование), вдольбереговые течения, речной сток.

Методы

Для исследования было выбрано два участка на юго-восточном побережье Ладожского озера (рис. 1а, б). Первый участок расположен на юго-западном берегу Стороженского полуострова (рис. 1в). Этот район представляет собой береговую систему с хорошо выраженными валами, ориентированными параллельно береговой линии, а также широким развитием в основном мезо- и эвтрофных торфяников. Антропогенная нагрузка здесь минимальна, что обуславливает хорошую сохранность береговых форм рельефа. Кроме того, через этот участок проходит нулевая изолиния скоростей современных вертикальных движений земной поверхности [31], что позволяет предполагать незначительное воздействие тектонических

движений на положение береговых террас. Нами на этом участке было выполнено геоморфологическое профилирование, включающее в себя следующие этапы: нивелирование с геоморфологическим описанием, литологическое описание отложений береговых валов и торфяников, отбор образцов для люминесцентного датирования в инфракрасном спектре (ИКСЛ) и диатомового анализа. Нивелировка выполнялась реечным способом с помощью оптического нивелира ГЕОБОХ № 8–26 со стандартным квадратным отклонением ± 2.0 мм на 1 км. Проложены два профиля. Профиль 230530 заложен от уреза воды, привязка которого к Балтийской системе высот выполнена по данным Стороженского гидрологического поста Росгидромета. Профиль 230531 заложен от пункта государственной геодезической сети. Также на линии профиля выполнено бурение торфяника Большой Мох, расположенного между двумя береговыми валами. Из него были отобраны образцы для радиоуглеродного датирования и диатомового анализа.

Второй участок работ расположен в Нижне-Свирском государственном природном заповеднике (рис. 1г). Ранее на этом участке были получены несколько радиоуглеродных датировок почв ближайших к урезу озера береговых образований [32]. С целью соотнесения этих дат к высотам береговых форм было выполнено геоморфологическое профилирование (профиль 240524). Привязка к Балтийской системе высот выполнена по уровню воды в день измерения. Кроме того, на торфянике Гагарье был отобран керн отложений, из которых были отобраны образцы для диатомового и радиоуглеродного анализов (рис. 1б). Этот торфяник расположен в котловине, ограниченной с запада береговым баром. Геоморфологическое положение этого образования предполагает его развитие на месте палеолагуны Ладожского озера. Высота устья скважины не была определена инструментально, по данным цифровой модели FABDEM [36] составляет приблизительно 11.8 м.

ИКСЛ датирование зерен полевых шпатов (фракция 100–160 мкм) произведено в научно-исследовательской лаборатории геохронологии четвертичного периода “GeoAge” (Таллин, Эстония). Радиоуглеродный анализ органогенных образцов выполнен в Лаборатории геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана Института Наук о Земле СПбГУ [5]. Значения календарного возраста приведены на основании калибровочной программы “OxCal 4.4.4” (калибровочная кривая “IntCal 20”) [40]. Расчет эквивалентной дозы выполнен с помощью протокола измерений “multiple-aliquot additive-dose” [Molodkov, Bitinas, 2006]. Образцы для изучения диатомовых водорослей были подготовлены по стандартной методике [13]. Препараты исследовали с помощью светового микроскопа Amplival C. Zeiss Jena.

Для реконструкции последних этапов изменений уровня озера были использованы радиоуглеродные даты из работ предыдущих исследователей. Даты, представленные в [28], получены по пойменным почвам и подстилающим торфам и болотным почвам, вскрытым в обнажениях и скважинах 10–11-метровой террасы реки Волхов. Даты в работе [32] получены по гумусовому веществу почв береговых валов.

Результаты

Геоморфологический профиль и хронология береговых образований Стороженского полуострова

На рис. 2 представлен геоморфологический профиль участка исследования. На профиле выделяется несколько поверхностей, имеющих разные морфологические

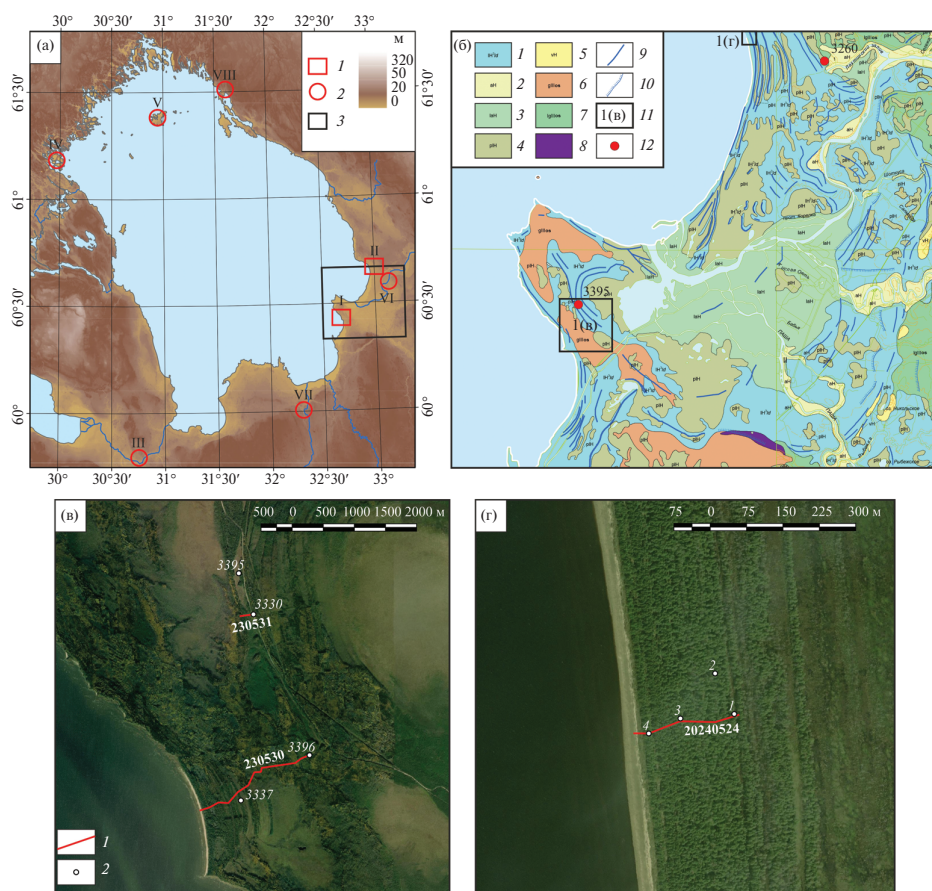


Рис. 1. (а) — Местоположение объектов, (1) изученных и (2) упомянутых в данной работе. 3 — участок, представленный на рис. 1 (б). Цифровая модель рельефа — FABDEM с пространственным разрешением 30 м [36]. I — Стороженский полуостров; II — Нижне-Сви́рский государственный природный заповедник; III — река Нева, разрез “Невский Пятачок”; IV — остров Килполансаари; V — остров Валаам; VI — река Сви́рь, урочище Калач; VII — река Волхов, Старая Ладога; VIII — залив Уксунлахти; (б) — фрагмент карты четвертичных образований масштаба 1 : 200 000 листов Р-36-XXXIII, Р-36-XXXIV, по [26], с изменениями. 1 — озерные образования Ладожской трансгрессии; 2 — голоценовые аллювиальные образования; 3 — голоценовые озерно-аллювиальные образования; 4 — голоценовые болотные образования; 5 — голоценовые золотые образования; 6 — ледниковые отложения осташковского горизонта верхнего неоплейстоцена; 7 — ледниково-озерные образования осташковского горизонта верхнего неоплейстоцена; 8 — дочетвертичные образования; 9 — береговые валы, бары, 10 — абразионные уступы; 11 — местоположение ключевых участков; 12 — местоположение скважин. (в) и (г) — карты фактического материала Стороженского и Нижне-Сви́рского участков исследования соответственно. Спутниковое изображение сервиса ArcGIS Imagery [44]. 1 — геоморфологические профили; 2 — местоположения точек пробоотбора

Fig. 1. (a) — Location of objects, (1) studied and (2) mentioned in this work. Digital Elevation Model — FABDEM with a resolution of 30 m [36]. 3 — area represented in Fig. 1 (b). I — Storozhensky Peninsula; II — Nizhnesvirsky Nature Reserve; III — Neva River, “Nevsky Pyatachok” section; IV — Kilpolansaari Island; V — Valaam Island; VI — Svir River, Kalach area; VII — Volkhov River, Staraya Ladoga; VIII — Uksunlahti Bay. (b) — fragment of the Quaternary deposits map at a scale of 1:200 000 sheets Р-36-XXXIII, Р-36-XXXIV, modified from [26]. 1 — lacustrine deposits of the Ladoga transgression; 2 — Holocene alluvial deposits; 3 — Holocene lacustrine-alluvial deposits; 4 — Holocene peat bog deposits; 5 — Holocene eolian deposits; 6 — glacial deposits of the Ostashkov horizon of the Upper Neopleistocene; 7 — glacial-lacustrine deposits of the Ostashkov horizon of the Upper Neopleistocene; 8 — pre-Quaternary deposits; 9 — beach ridges, bars; 10 — abrasion cliffs; 11 — Storozhensky key area, see Fig. 1 (c); 12 — location of the borehole in Gagarye peat bog, RP-3260. (c) and (d) — maps of the factual material of the Storozhensky key area and Nizhnesvirsky key area correspondingly. Satellite image from ArcGIS Imagery service [44]. 1 — geomorphological profiles; 2 — sampling points locations.

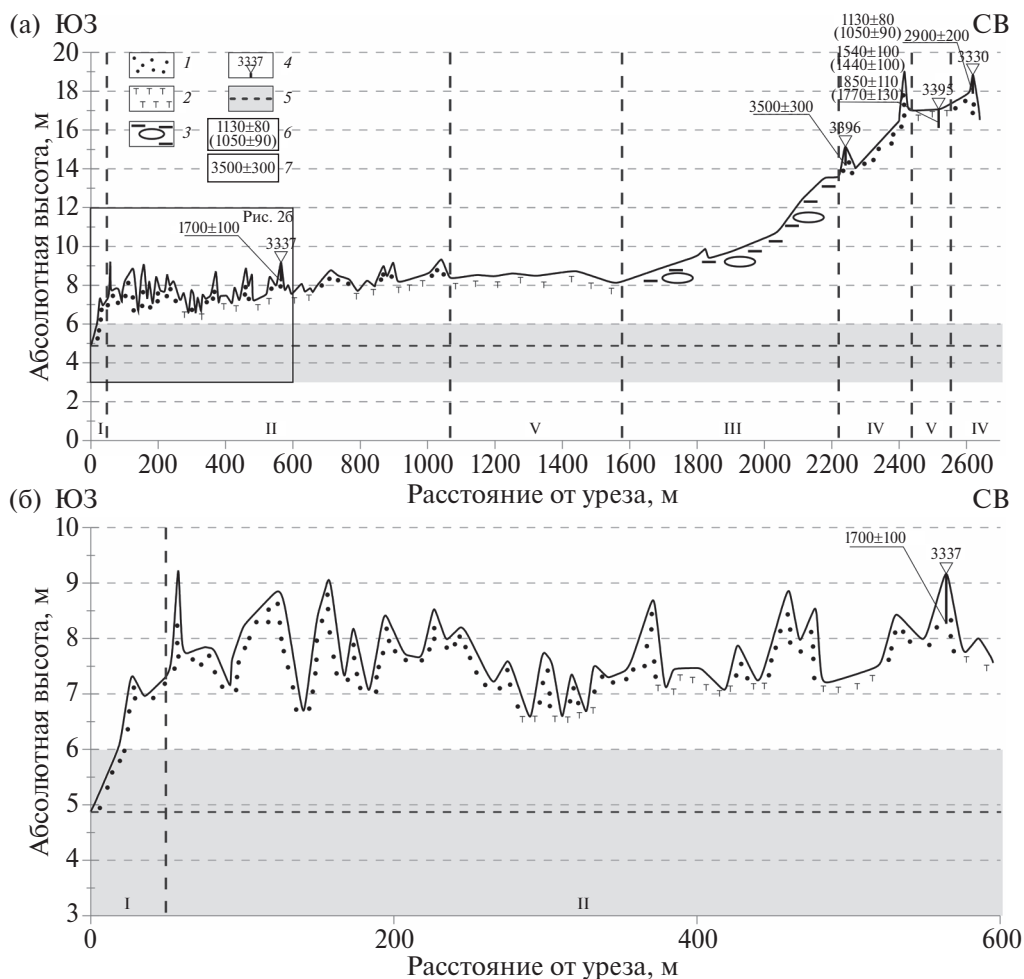


Рис. 2. (а) — геоморфологический профиль Storozhno участка исследования. (б) — увеличенный фрагмент профиля. Условные обозначения: 1 — пески; 2 — торфа; 3 — валунные суглинки; 4 — точки отбора образцов; 5 — уровень Ладожского озера во время проведения полевых исследований и амплитуда многолетних изменений по [25]; 6 — радиоуглеродный возраст, ^{14}C л.н., в скобках — кал. л.н.; 7 — ИКСЛ даты, кал. л.н. I — современный пляж и 7.3-метровая аккумулятивная поверхность; II — 6.5–8.1-метровая аккумулятивная поверхность; III — 8.1–13.2-метровая абразионная поверхность; IV — 13.2–16.5-метровая аккумулятивная поверхность; V — торфяники.

Fig. 2. (a) — geomorphological profile of the Storozhno research site. (b) — enlarged fragment of the profile. Legend: 1 — sand; 2 — peat; 3 — boulder clay; 4 — sampling sites; 5 — Lake Ladoga level during field studies and the amplitude of long-term changes [25]; 6 — radiocarbon datings, ^{14}C BP, cal. BP in parentheses; 7 — IRSL datings, cal BP. I — beach zone and 7.3-meter accumulative surface; II — 6.5–8.1-meter accumulative surface; III — 8.1–13.2-meter abrasional surface; IV — 13.2–16.5-meter accumulative surface; V — peat bogs.

характеристики и литологический состав слагающих их отложений. Первая поверхность представляет собой небольшую 15-метровую площадку, ограниченную снизу береговым валом пляжа полного профиля, а сверху — абразионным уступом, выполненном на проксимальном склоне вышележащего вала. Тыловой шов уступа находится на высоте 7.3 м. Уклон террасы составляет 1.3° .

Выше, на абсолютных высотах от 6.5 до 8.1 м, сформирована следующая аккумулятивная поверхность. На расстоянии от 50 до 270 м от уреза воды она осложнена береговыми валами, частично перевеянными эоловыми процессами. За счет этого амплитуда изменения высоты достигает 2.3 м. Далее валы не имеют признаков эоловой переработки, они хорошо выдержаны по простиранию, котловины выдувания и дюнные формы отсутствуют. В межваловых понижениях сформированы низинные торфяники. Относительная высота валов варьирует от 0.5 до 2 м. Нами было описано строение одного из валов (ТН-3337). Высота его подножия составляет 8.0 м, вершины — 9.2 м. Слагающие его отложения представлены мелкозернистыми и тонкозернистыми среднеокатанными кварцевыми песками с зернами полевошпатовых (5–10%) и слюдистых (5–10%) минералов. Возраст песков из основания вала, на глубине 90 см от поверхности, составил 1700 ± 100 кал. л.н. (RLQG 2812-024) (табл. 1). Ближе к тыловому шву террасы береговые валы исчезают, поверхность перекрывается мезотрофным торфяником, сформированным на высоте 8.1–8.7 м.

На наиболее высоких поверхностях Стороженского полуострова выделены 3 береговых вала. Нижний вал имеет высоту подножия 13.6 м, а вершины — 15.1 м. Его разрез (ТН-3396) имеет двучленное строение. Верхняя часть разреза (0–119 см от поверхности) представлена желтовато-серыми разномзернистыми хорошо сортированными кварц-полевошпатовыми песками с примесью зерен гранатовых и слюдистых минералов. В нижней части (119–140 см) уже наблюдаются серые разномзернистые пески с небольшим содержанием алеврита и среднеразмерной гальки. Они характеризуются субгоризонтальной слоистостью, определяющейся по изменению цвета. ИКСЛ возраст песков с глубины 130 см составил 3500 ± 300 кал. л.н. (RLQG-2816-024). Диатомовый анализ отложений нижней толщи показал наличие сильно обедненного пресноводного диатомового комплекса из преобладающих планктонных *Aulacoseira islandica* (O. Müller) Simonsen, *A. subarctica* (O. Müller) Haworth emend. Genkal, единичных бентосных *Pinnularia microstauron* (Ehrenberg) Cleve, *P. viridis* (Nitzsch) Ehrenberg, *Stauroneis phoenicenteron* (Nitzsch) Ehrenberg.

На высоте 16.5 м сформированы два крупных вала с относительной высотой 2.5 и 2.4 м. Второй вал принадлежит к системе валов, обращенных в сторону восточного берега полуострова. Отложения вала представлены мелко- и среднезернистыми песками, переслаивающимися с гравием. ИКСЛ датирование образца песка с глубины 120 см (160 см от вершины вала) дало возраст 2900 ± 200 кал. л.н. (RLQG-2732-122). Створок диатомовых водорослей в отобранных песках обнаружено не было.

Таблица 1. Результаты ИК-ОСЛ датирования отложений береговых валов

Table 1. Results of IRSL dating of coastal ridge deposits

Номер образца	Лаб. №	Материал датирования	Глубина отбора от поверхности, см	Возраст, л.н.	U, ppm	Th, ppm	K, %
3330-1	RLQG 2732-122	Песок	120	2900 ± 200	0.65	2.45	1.87
3337-1	RLQG 2812-024	Песок	90	1700 ± 100	1.17	2.06	1.65
3396-1	RLQG 2816-024	Песок	130	3500 ± 300	0.73	2.61	1.70

*Геоморфологический профиль и хронология береговых образований
Нижне-Свирского заповедника*

Профиль, построенный на Нижне-Свирском участке, позволяет детально рассмотреть геоморфологическое строение ближних к Ладожскому озеру береговых образований. На профиле, проведенном от уреза воды, выделяются три поверхности. Первая, расположенная у уреза, представлена современным аккумулятивным пляжем полного профиля. Абсолютная высота тылового подножия вала составляет 6 м, его гребня — 6.5 м. Выше расположена 6.0–7.8-метровая поверхность. Она осложнена тремя береговыми валами. В понижениях сформированы низовые торфяники. Характерно, что, в сравнении с профилем Стороженского участка, ширина этой поверхности больше — около 32 м.

Следующая поверхность представляет собой трансгрессивный комплекс, состоящий из берегового бара и причлененного к нему вала. Его проксимальное подножие расположено на 6 м, дистальное — на 6.7 м. Подножие бара находится на высоте 7.6–7.8 м, его гребень — на 10 м. На то, что данный комплекс имеет трансгрессивное происхождение, указывает его морфология. Морфометрические параметры превышают параметры соседних валов, а его подножие находится на более высоких абсолютных высотах.

Дальше от берега сформирована поверхность на высотах 6.2–6.9 м. На ней наблюдаются береговые валы с низовыми торфами в межваловых понижениях. Профиль постепенно повышается по направлению от берега.

По подзолистым почвам этих образований получено несколько радиоуглеродных датировок [32]. По первому валу 5.6–6-метровой поверхности получен возраст 130 ± 80 кал. л.н. (70 ± 25 ^{14}C л.н.) (табл. 2). Возраст, определенный по почвам с гребня бара, составил 140 ± 80 кал. л.н. (135 ± 30 ^{14}C л.н.). На 6.2–6.9-метровой поверхности получены две даты: по ближнему к берегу валу возраст оценен в 510 ± 30 кал. л.н. (455 ± 25 ^{14}C л.н.), по дальнему — 1590 ± 25 ^{14}C л.н. (1470 ± 40 кал. л.н.). Если предположить, что возраст формирования почв соответствует возрасту завершения формирования береговой формы, то можно прийти к выводу, что формирование берегового бара завершилось около 140 кал. л.н., следовательно, в это время уровень отступил ниже 7.6 м. Как будет продемонстрировано ниже, такая хронология изменений уровня не подтверждается анализируемыми данными, следовательно, радиоуглеродная дата, полученная по почвам берегового бара, исключена из дальнейшей интерпретации.

*Литоология, состав диатомовых водорослей и радиоуглеродная хронология
отложений торфяников*

В межваловом понижении двух замыкающих валов изученной береговой системы расположен мезотрофный торфяник Большой Мох. Абсолютная высота поверхности торфяника по данным нивелирования составляет 17.1 м. В скважине ТН-3395 (рис. 4а) вскрыты следующие слои:

0.00–1.07 м — торф сфагновый;

1.07–1.16 м — постепенный переход от торфа к слоистой коричневой гиттии с зернами полимиктового песка;

1.16–1.44 м — коричневая гиттия с зернами песка; вниз по разрезу увеличивается количество песка, появляются обломки гравийной и галечной размерности.

В гиттии установлены многочисленные цисты пресноводных золотистых водорослей, пресноводные диатомовые водоросли — “единично” *Pinnularia microstauron*, единичные обломки створок *Aulacoseira islandica*, *Eunotia* sp., *Pinnularia* spp.

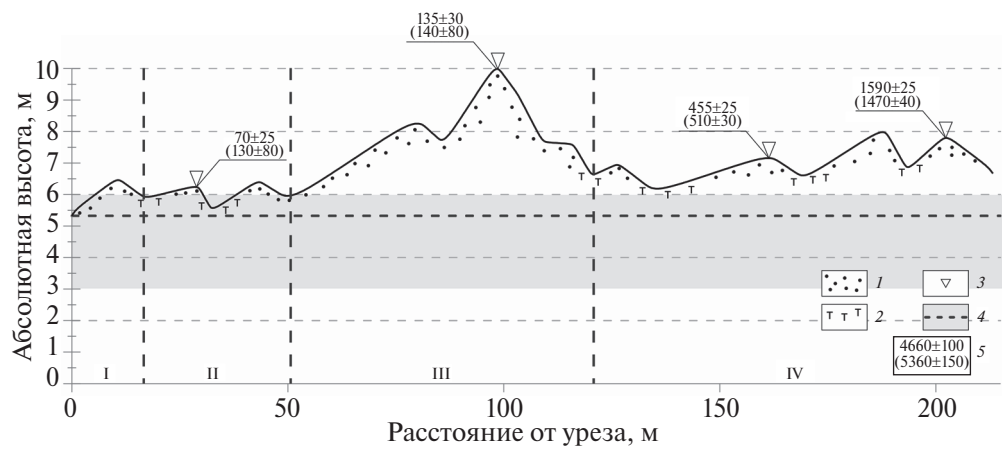


Рис. 3. Геоморфологический профиль Нижне-Свирского участка исследования. Условные обозначения: 1 — пески; 2 — торфа; 3 — точки отбора образцов; 4 — уровень Ладожского озера во время проведения полевых исследований и амплитуда многолетних изменений по [25]; 5 — радиоуглеродный возраст, ¹⁴C л.н., в скобках — кал. л.н. I — современный пляж; II — 5.6–6-метровая аккумулятивная поверхность; III — аккумулятивный трансгрессивный комплекс, 6–10 м; IV — 6.2–6.9-метровая аккумулятивная поверхность.

Fig. 3. Geomorphological profile of the Nizhnesvirsky research site. Legend: 1 — sand; 2 — peat; 3 — sampling sites; 4 — Lake Ladoga level during field studies and the amplitude of long-term changes [25]; 5 — radiocarbon dates, ¹⁴C BP, cal. BP in parentheses; I — beach zone; II — 5.6–6-meter accumulative surface; III — transgressive complex; IV — 6.2–6.9-meter accumulative surface.

Таблица 2. Радиоуглеродные даты, полученные из работ предыдущих исследователей

Table 2. Radiocarbon dates from previous researches

Лаб. №	Материал датирования	Радиоуглеродный возраст, ¹⁴ C л.н.	Калиброванный возраст, кал. л.н.	Источник
Ле-6518	Торф	1260 ± 30	1200 ± 50	[27]
Ле-6519	Торф	1820 ± 60	1720 ± 80	[27]
Ле-6520	Торф	1480 ± 40	1360 ± 40	[27]
Ле-6521	Торф	1580 ± 80	1470 ± 80	[27]
Ле-6522	Болотная почва	2130 ± 120	2110 ± 160	[27]
Ле-6680	Пойменная почва	570 ± 70	580 ± 50	[27]
Ле-6681	Болотная почва	1280 ± 300	1220 ± 300	[27]
Ле-6875	Пойменная почва	650 ± 80	610 ± 50	[27]
Ле-6879	Болотная почва	850 ± 100	790 ± 90	[27]
-	Подзолистая почва	1590 ± 25	1470 ± 40	[31]
-	Подзолистая почва	445 ± 25	510 ± 30	[31]
-	Подзолистая почва	135 ± 30	140 ± 80	[31]
-	Подзолистая почва	70 ± 25	130 ± 80	[31]

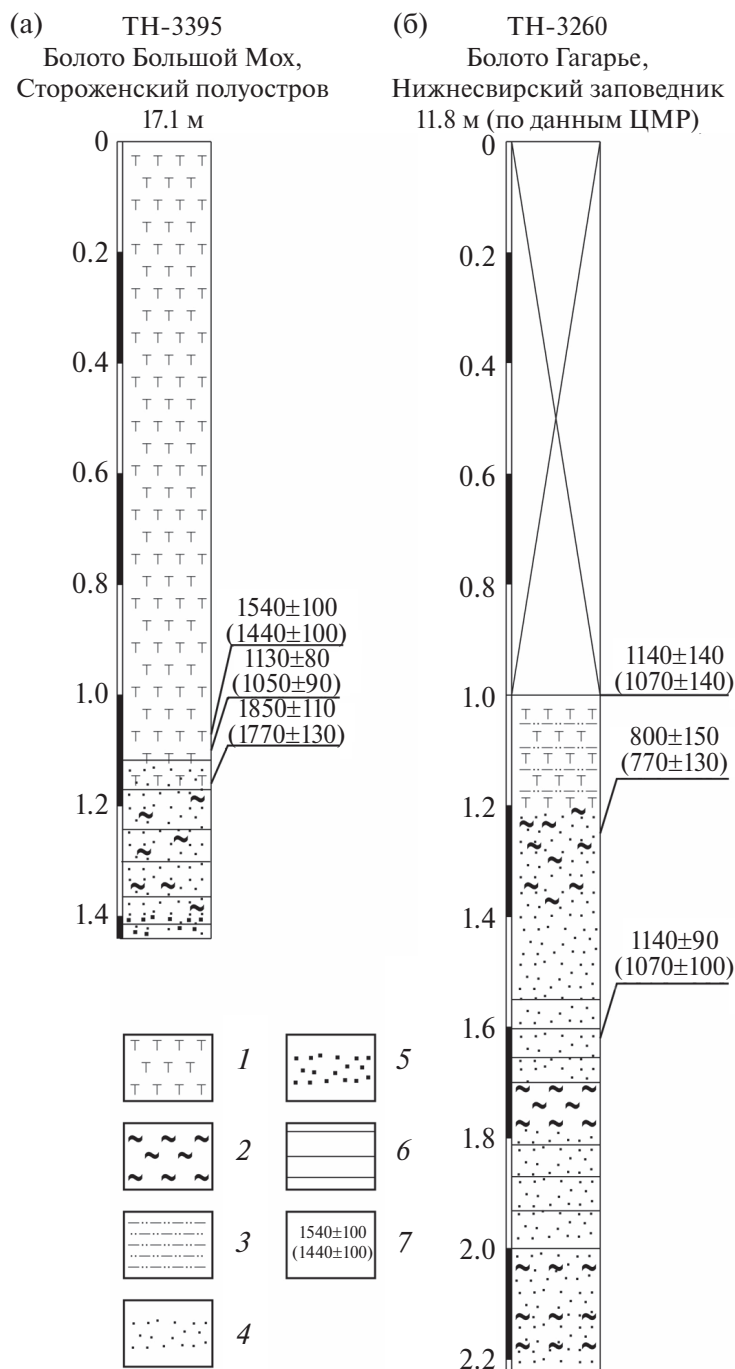


Рис. 4. Разрезы кернов ТН-3395 (а) и ТН-3260 (б). Условные обозначения: 1 — торф; 2 — гиттия; 3 — алеврит; 4 — песок; 5 — гравий и галька; 6 — субгоризонтальная слоистость; 7 — радиоуглеродный возраст, ^{14}C л.н., в скобках — кал. л.н.

Fig. 4. Core sections of TN-3395 (a) and TN-3260 (b). Legend: 1 — peat; 2 — gyttia; 3 — silt; 4 — sand; 5 — gravel and pebble; 6 — laminated bedding; 7 — radiocarbon dates, ^{14}C BP, cal. BP in parentheses.

На контакте гиттии с торфом в интервале 100–121 см получены три радиоуглеродные даты (табл. 3). Радиоуглеродный возраст, полученный по нижней части торфа, равен 1440 ± 100 кал. л.н. л.н. (1540 ± 100 ^{14}C , ЛУ-11170). Образец торфа с гиттией, отобранный ниже, датирован 1050 ± 90 кал. л.н. (1130 ± 80 ^{14}C л.н., ЛУ-11168). Возраст нижележащей гиттии равен 1770 ± 130 кал. л.н. (1850 ± 110 ^{14}C л.н., ЛУ-11169). Таким образом, имеет место возрастная инверсия. Скорость осадконакопления в торфяниках Ленинградской области на протяжении голоцена составляла от 0.5 до 1.0 мм/год [8]. Скорость осадконакопления с учетом только датировок ЛУ-11168 и ЛУ-11169 равна 0.086 мм/год, что значительно меньше среднего значения в регионе. Если считать верными даты ЛУ-11170 и ЛУ-11169, то этот показатель будет равен 0.27 мм/год, что является более правдоподобным значением. Следовательно, дата 1050 ± 90 кал. л.н. (1130 ± 80 ^{14}C л.н., ЛУ-11168) исключается из дальнейшей интерпретации.

Болото Гагарье расположено на побережье Свирской губы. С запада оно ограничено береговым баром, коррелируемым с максимальной стадией Ладожской трансгрессии [7, 33], с юга — заливом Кут-Лахта (старица реки Свирь). Здесь была заложена скважина ТН-3260 глубиной 2.22 м (рис. 46). Высота устья не была определена, по данным топографических карт, она составляет около 11.8 м. Описание полученного керна представлено ниже (сверху вниз):

0.0–1.0 м — керна нет, водный слой;

1.0–1.2 м — торф низинный с небольшим количеством алеврита;

1.2–1.55 м — песок гиттиевый с растительными волокнами на глубинах 1.27–1.3 и 1.36–1.55 м;

1.55–1.7 м — песок, переслаивающийся с алевритовым песком серого цвета;

1.7–1.78 м — гиттия с песком;

1.78–2 м — песок мелкозернистый горизонтально-слоистый, кварцевый;

2–2.08 м — гиттия с песком;

2.08–2.22 м — песок мелкозернистый, желтовато-серый с тонкими коричневыми прослоями гиттии.

В песках в интервале 2.08–2.22 м обнаружен пресноводный планктонный комплекс диатомей, богатый численно и обедненный в видовом отношении

Таблица 3. Результаты радиоуглеродного датирования отложений торфяников Большой Мох (ТН-3395) и Гагарье (ТН-3260)

Table 3. Radiocarbon dating results of the peat-bogs Bolshoi Mokh (Site 3395) and Gagar'e (Site 3260) deposits

Номер образца	Лаб. №	Материал датирования	Глубина отбора от поверхности, см	Радиоуглеродный возраст, л.н.	Калиброванный возраст, кал. л.н.
3395-5	ЛУ-11170	Торф	105	1540 ± 100	1440 ± 100
3395-1	ЛУ-11168	Торф с гиттией	112	1130 ± 80	1050 ± 90
3395-2	ЛУ-11169	Гиттия	118	1850 ± 110	1770 ± 130
3260-2	ЛУ-9562	Торф	100	1140 ± 140	1070 ± 140
3260-3	ЛУ-9563	Растительные волокна	125	800 ± 150	770 ± 130
3260-5	ЛУ-9564	Растительные волокна	162	1140 ± 90	1070 ± 100

(всего 8 видов), а также немногочисленные (до 2% от общего состава установленных микрофоссилий) цисты золотистых водорослей. В диатомовом комплексе доминирует пресноводный планктонный вид *Aulacoseira islandica* (O. Müller) Simonsen (66% от общего состава комплекса), также в диатомовом комплексе заметны пресноводные планктонные *Handmannia comta* (Ehrenberg) Kociolek et Khursevich emend Genkal (6%), *Stephanodiscus rotula* (Kützing) Hendeby (4%) и *Cyclotella schumannii* (Grunow) Håkansson (2%). Комплекс диатомей отражает формирование озерных отложений, достаточно глубоководных (приоритет принадлежит типично планктонным формам), в относительно холодноводном палеоводоеме с щелочной активной реакцией среды. В песках с интервала 1.78–2 м диатомовый комплекс аналогичен установленному в нижней толще, только очень обедненный численно. В небольшом количестве установлен пресноводный планктонный вид *Aulacoseira islandica*. Также обнаружены единичные створки пресноводных видов *Stephanodiscus rotula*, *S. minutulus* (Kützing) Cleve et Möller, *Tetracyclus emarginatus* (Ehrenberg) W. Smith.

По керну получены три радиоуглеродных даты (см. табл. 3). Возраст кровли торфа составляет 1070 ± 140 кал. л.н. (1140 ± 140 ^{14}C л.н., ЛУ-9562). Из гиттии получен возраст 770 ± 130 кал. л.н. (800 ± 150 ^{14}C л.н., ЛУ-9563). По растительным волокнам из переслаивающихся песков в интервале 1.55–1.7 м получена дата 1140 ± 90 ^{14}C л.н. (1070 ± 100 кал. л.н., ЛУ-9564). Как и в случае с предыдущим керном, результаты датирования показывают возрастную инверсию. По результатам сравнения рассчитываемых скоростей роста торфяника со средней скоростью по Ленинградской области [8], исключена дата 1070 ± 140 кал. л.н. (1140 ± 140 ^{14}C л.н., ЛУ-9562).

Обсуждение

Впервые элементы геоморфологии Стороженского полуострова были описаны Ю. Айлио [33], который пытался определить уровень максимума Ладожской трансгрессии по высоте расположения береговых валов. Он выделил два вала в районе деревни Загубье, которые, однако, не были соотнесены с береговой линией максимальной стадии Ладожского озера за счет их низкого положения. Основание и вершина первого находятся на высотах 13 и 15.1 м соответственно, второго — на 10.6 и 12.1 м. В текущем исследовании установлено, что на полуострове сформированы береговые валы на более высоких отметках. Подножия двух наиболее высоко расположенных валов находятся на высоте 16.5 м. ИКСЛ-возраст, полученный по отложениям одного из этих валов, составляет 2900 ± 200 кал. л.н. Эта дата достаточно близка ко времени завершения Ладожской трансгрессии. Д.Б. Малаховский с соавторами [20, 37] по отложениям торфа в долине реки Невы датировал образование последней и завершение трансгрессии возрастом 3200–3000 кал. л.н. Датирование времени изоляции малых озер от Ладожского озера также позволяет оценить время прорыва р. Невы и завершения Ладожской трансгрессии около 3400–3200 кал. л.н. [41, 42]. Близкий возраст (3320 ± 40 кал. л.н.) получен и по результатам изучения донных отложений Финского залива, где зафиксирован перерыв в осадконакоплении, связанный с прорывом реки Невы [43]. Таким образом, можно прийти к выводу, что формирование самых высоких валов Стороженского полуострова связано с завершением Ладожской трансгрессии. Следовательно, подножия валов на высоте 16.5 м идентифицируются нами как древняя береговая линия, соответствующая максимальному подъему воды. Оценки максимального уровня трансгрессии в Южном Приладожье довольно значительно разнятся. Ю. Айлио [33] пришел к выводу, что уровень озера поднимался до 18–19 м. Проследивая абразионные уступы Южного

Приладожья, Е.Г. Шеффер, а позднее и Б.И. Кошечкин пришли к схожим выводам [15, 27]. К.К. Марков, анализируя нивелировки Айлио, понизил оценку высоты трансгрессии в пределах 14–15 м [21, 22]. Некоторые авторы также придерживаются подобной точки зрения [20, 30]. При этом М.В. Шитов [29] допускает, что береговые линии в этом районе могут быть зафиксированы на 17 м.

Высотное положение вала, описанного Ю. Айлио [33], близко к валу, изученному в нашем исследовании (13.6 м, ТН-3396), что позволяет предположить, что речь идет об одном и том же образовании. Из этого образования был получен ИКСЛ-возраст 3500 ± 300 кал. л.н., который древнее, чем возраст вышележащего вала и, соответственно, завершения Ладожской трансгрессии. Объяснить данную инверсию можно, предположив, что эта дата получена из трансгрессивных песков, подстилающих вал. Описанный нами разрез состоит из двух толщ. Нижняя, из которой получена дата, представлена горизонтально-слоистыми песками. В ней встречены типичные “ладожские” диатомовые [1, 12], в то время как образцы, отобранные из других валов, не содержали диатомовых водорослей. Результаты исследования разрезов урочища Калач в долине реки Свирь показывают, что в интервале от 3750 до 3400 кал. л.н. уровень Ладожского озера находился в пределах 12–14.5 м [7], что можно соотнести с полученным нами результатом.

Взгляды о следовавших за Ладожской трансгрессией изменениях уровня также разнятся. Часть исследователей придерживаются точки зрения о резком сокращении уровня до современных отметок в интервале от 3000 до 2600 кал. л.н. [2, 34, 35, 37]. Другие выделяют еще одну трансгрессивную стадию около 2100 кал. л.н. [16, 18]. Геоморфологические данные не позволяют сделать вывод о поднятии уровня озера в этот период в юго-восточном Приладожье. В интервале высот от 16.5 до 8 м не наблюдается трансгрессивных береговых форм. Поверхность имеет абразионный характер. В настоящее время вдольбереговые течения к побережью Стороженского полуострова переносят осадки из Свирской губы [4]. Отсутствие аккумуляции на данном этапе, вероятно, связано с достаточно отдаленным расположением устья реки Свирь.

Ниже 8 м фиксируется субгоризонтальная терраса, сформированная в результате проградации береговых валов друг на друга при относительно стабильном уровне озера. Террасовые поверхности на близких высотных отметках достаточно широко распространены в Южном Приладожье [27]. По одному из береговых валов этой поверхности получен ИКСЛ возраст 1700 ± 100 кал. л.н. Возраст образования почвы четвертого датированного берегового вала Нижне-Свирского заповедника составляет 1470 ± 40 кал. л.н. [32]. В разрезах террасы реки Волхов на высотах около 10 м возраст погребенных торфяников и болотных почв оценивается в интервале от 2100 до 1200 кал. л.н. [29]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что 2100 кал. л.н. уровень озера опустился ниже 10 м, и в дальнейшем уровень был относительно стабильным, на что указывает профиль террасы, который постепенно понижается от 8 до 6 м. Этот вывод противоречит представлениям о резком снижении уровня 3000–2600 кал. л.н.

В это время на осушенных территориях происходит постепенная эвтрофикация малых озер, возникших в результате изоляции их котловин по мере снижения уровня Ладожского озера. Вскрытые в скважине ТН-3395 гиттии содержат в себе большое количество цист золотистых водорослей. Данный класс водорослей на севере России обитает преимущественно в малых слабокислых водоемах [9]. В то же время створки пресноводных диатомовых водорослей представлены единичными

экземплярами. Следовательно, описанные гиттии накапливались в изолированном бассейне, и полученные даты контакта между гиттиями и торфами 1800–1400 кал. л.н. указывают на время перехода от обстановок осадконакопления малых озер к болотным.

Геолого-геоморфологические данные позволяют предположить развитие в конце позднего голоцена малоамплитудной положительной осцилляции уровня Ладожского озера. Геоморфологические свидетельства заключаются в формировании на бровке 6–8-метровой террасы берегового бара. Данная форма наблюдается по всему побережью Ладожского озера. Возникновение баров обуславливается трансгрессивным налеганием субаквальных волновых осадков на отложения береговых валов вследствие поднятия уровня [6]. Высота проксимального подножия этого образования составляет 7.6 м.

Геоморфологические наблюдения подтверждаются и геологическими данными. Литостратиграфическое описание разреза скважины ТН-3260 показывает следующую последовательность снизу вверх: пески–гиттии–пески–гиттии–торф. Диатомовый состав нижних слоев песка указывает на их формирование в глубоководных олиготрофных условиях Ладожского озера [11]. Такие виды, как *Aulacoseira islandica* (самый характерный доминирующий вид), а также *A. Granulata*, *Cyclotella radiosa*, *C. schumannii*, *Stephanodiscus rotula*, *Tabellaria fenestrata*, входят в состав в качестве доминант и субдоминант комплексов Ладожского озера начиная с позднего неоплейстоцена [19]. Такая интерпретация позволяет сделать вывод о формировании этой толщи при относительно высоком уровне, то есть во время Ладожской трансгрессии. Следовательно, вышележащие пески представляют собой образования более поздней трансгрессивной фазы. Для них получена дата 1070 ± 100 кал. л.н., по контакту между песками и вышележащими гиттиями — 770 ± 130 кал. л.н. Высота устья скважины по данным ЦМР [36] составляет 11.8 м, высота залегания контакта верхних песков и гиттий — 10.6 м. Следовательно, можно было бы утверждать, что около 1100 кал. л.н. уровень Ладожского озера находился на высотах выше 10 м. Однако это противоречит археологическим данным, согласно которым первые поселения в районе Старой Ладоги возникли на высоте около 10 м в середине VII века (около 1300 кал. л.н.) [23]. Вероятно, верхняя толща песков сформировалась в результате подпора со стороны Ладожского озера и затопления низменных пространств залива Кут-Лахта.

Другим свидетельством подъема уровня являются данные о геологическом строении 10-метровой террасы в долине реки Волхов [28]. В ней вскрыты отложения пойм, которые перекрывают отложения погребенных торфов и болотных почв. Возраст пойменных отложений составляет около 600 кал. л.н., возраст торфов и болотных почв — 2100–1200 кал. л.н. (в исследовании отмечено, что дата болотной почвы 790 ± 90 кал. л.н., вероятно, омоложена [28, с. 13]) (см. табл. 2). Замещение вверх по разрезу отложений субаэральных обстановок пойменными фациями указывает на поднятие уровня р. Волхов, что в свою очередь может быть связано с увеличением уровня принимающего водоема.

Таким образом, временные рамки малоамплитудного подъема уровня могут быть определены в интервале от 1200 до 600 кал. л.н. с пиком около 1100 кал. л.н. Максимальный уровень подъема воды достигал 7.6 м, что определяется по высоте подножия берегового бара. Дальнейшее снижение уровня до современных отметок хорошо реконструируется по датам почв береговых валов. Почвы вала, расположенного на высоте 6.2 м, сформировались 510 ± 30 кал. л.н., вала на высоте 6 м — 130 ± 80 кал. л.н., следовательно, уровень находился примерно на одной высоте.

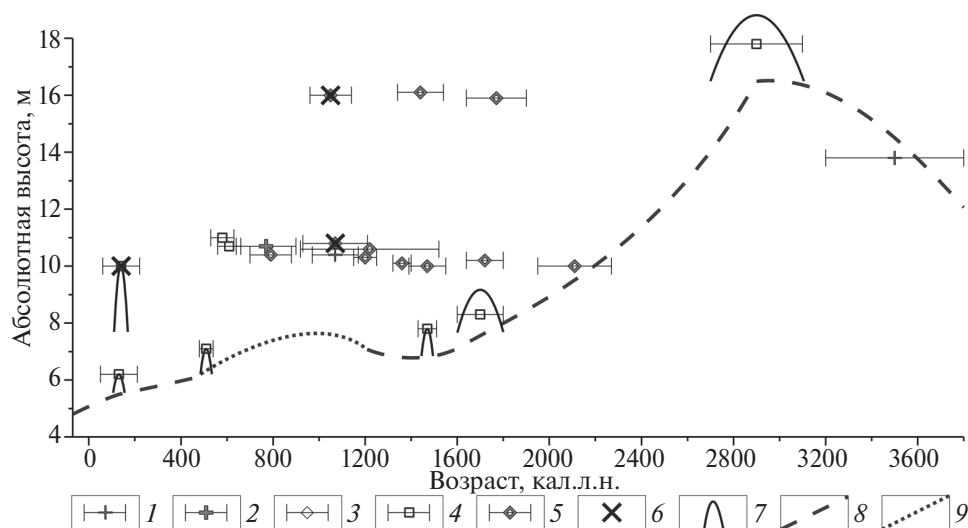


Рис. 5. Реконструкция изменений относительного уровня воды в Южном Приладожье. Условные обозначения: 1 — даты из отложений Ладожского озера; 2 — даты из отложений регрессивных контактов; 3 — даты из пойменных отложений; 4 — даты из отложений и почв береговых валов, привязанные к Балтийской системе высот; 5 — даты из отложений торфяников и изолированных озер; 6 — отклоненные даты; 7 — схематическое отображение датированных береговых форм рельефа: высота символа соответствует высоте формы, ширина — погрешности определения возраста; 8 — кривая колебаний уровня; 9 — предполагаемое поднятие уровня воды.

Fig. 5. Relative lake level fluctuations of Lake Ladoga. Legend: 1 — Lake Ladoga sediments datings; 2 — datings of regressive surface sediments; 3 — datings of floodplain sediments; 4 — datings of coastal bars sediments and soils, linked to Baltic Reference System; 5 — datings of peatbogs and isolated lakes sediments; 6 — excluded datings; 7 — schematic shapes of dated coastal landforms, where symbol size corresponds to landform height, symbol width corresponds to dating error; 8 — level fluctuations curve; 9 — suggested level uprise.

Учитывая, что скорость современного понижения уровня по инструментальным наблюдениям оценивается в 3.6 мм/год [25], можно допустить увеличение этого показателя за последние 100 лет.

Заключение

В результате анализа геолого-геоморфологических данных юго-восточного Приладожья определены позднеголоценовые изменения уровня Ладожского озера. Установлено, что береговая линия Ладожской трансгрессии в этом районе находится на 16.5 м н.у.м. Это не согласуется с данными предыдущих исследователей, которые определяли ее высоту на 14–15 м или 18–19 м абсолютной высоты.

Примерно 2900 кал. л.н. началось снижение уровня Ладожского озера. Геоморфологические данные указывают на постепенное равномерное понижение береговой линии, которое привело к формированию абразионной поверхности на высотах 8–14 м н.у.м. В интервале от 2100 до 1200 кал. л.н. уровень находился примерно на высотах 6–8 м н.у.м. В рельефе это отразилось в виде субгоризонтальной аккумулятивной поверхности с проградирующей последовательностью береговых валов.

Выдвинуто предположение о том, что в интервале 1200–600 кал. л.н. произошло незначительное поднятие уровня с амплитудой около 1.5 м. Это привело к формированию невысокого берегового бара на аккумулятивных берегах Ладожского озера. В дальнейшем уровень постепенно понижался до современного.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00273 “Оценка темпов снижения уровня Ладожского озера за последние 3000 лет по результатам абсолютного датирования береговых форм рельефа”, <https://rscf.ru/project/23-27-00273/>.

Список литературы

1. Абрамова С.А., Давыдова Н.Н., Квасов Д.Д. История Ладожского озера в голоцене по данным спорово-пыльцевого и диатомового анализов // История озер Северо-запада. Л.: Наука, 1967. С. 113–132.
2. Александровский А.Л., Арсланов Х.А., Давыдова Н.Н., Долуханов П.М., Зайцева Г.И., Кирпичников А.Н., Кузнецов Д.Д., Лавенто М., Лудикова А.В., Носов Е.Н., Савельева Л.А., Сапелко Т.В., Субетто Д.А. Новые данные относительно трансгрессии Ладожского озера, образования реки Невы и земледельческого освоения северо-запада России // Доклады Академии наук. 2009. Т. 424, № 5. С. 682–687.
3. Амантов А.В., Спиридонов М.А. Геология Ладожского озера // Советская геология. 1989. № 4. С. 83–86.
4. Анохин В.М., Виноградова О.М., Пятов И.М., Дудакова Д.С. Вдольбереговое перемещение наносов в Ладожском озере по данным анализа тяжелой фракции песков в прибрежных отложениях // Известия Русского географического общества. 2023. Т. 155, вып. 3–4. С. 3–16.
5. Арсланов Х.А. Радиоуглерод: геохимия и геохронология. Л.: Издательство Ленинградского государственного университета, 1987. 300 с.
6. Бадюкова Е.Н., Каплин П.А. Береговые бары // Геоморфология. 1999. № 3. С. 3–15.
7. Бобровникова Е.М., Шитов М.В. Свирская лагунно-баровая система (поздний голоцен, юго-восточное Приладожье) // Труды Кольского научного центра. 2019. Т. 6, вып. 1. С. 42–51.
8. Верзилин Н.Н., Клейменова Г.И. Особенности биогенного осадконакопления в голоцене на территории Ленинградской области // Известия Русского географического общества. 2005. Т. 137, вып. 1. С. 35–46.
9. Волошко Л.Н. Золотистые водоросли севера: экологические условия обитания // Астраханский вестник экологического образования. 2017. Т. 42, № 4. С. 45–56.
10. Геоморфология и четвертичные отложения северо-запада европейской части СССР (Ленинградская, Псковская и Новгородская области) / под ред. Д.Б. Малаховского, К.К. Маркова Л.: Наука, 1969. 256 с.
11. Давыдова Н.Н. Диатомовая флора голоценовых отложений Ладожского озера М.: Наука, 1968. С. 97–102.
12. Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли — индикаторы экологических условий водоемов в голоцене, Л.: Наука, 1985. 244 с.
13. Диатомовые водоросли (ископаемые и современные). Т. 1 / под ред. А.И. Прошкиной-Лавренко. Л.: Наука, 1974. 403 с.
14. История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки (Серия: История озер СССР) / под ред. Д.Д. Квасова, Г.Г. Мартинсона, А.В. Раукас. Л.: Наука, 1989. 280 с.
15. Кошечкин Б.И., Адаменко И.В., Арсланов Х.А., Джиноридзе Р.Н., Хомутова В.И. Береговые образования голоценовой трансгрессии в Южном Приладожье // Известия Русского географического общества. 1992. Т. 124, вып. 6. С. 541–547.
16. Кошечкин Б.И., Экман И.М. Голоценовые трансгрессии Ладожского озера // Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера. СПб.: РГО, 1993. С. 49–60.

17. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья [Атлас] / под ред. В.А. Румянцева, СПб.: Нестор-История, 2015. 200 с.
18. Лак Г.Ц., Экман И.М. О трансгрессиях Ладожского озера в голоцене // Доклады Академии Наук СССР. 1975. Т. 222, № 1. С. 175–178.
19. Лудикова А.В. Свидетельства среднеголоценовой трансгрессии Ладожского озера по данным диатомового анализа // Известия Русского географического общества. 2015. Т. 147, вып. 4. С. 38–51.
20. Малаховский Д.Б., Арсланов Х.А., Гей Н.А., Джиноридзе Р.Н., Козырева М.Г. Новые данные по голоценовой истории Ладожского озера // Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера. СПб.: РГО, 1993. С. 61–73.
21. Марков К.К. Последленинградская история юго-восточного побережья Ладожского озера // Вопросы географии. 1949. № 12. С. 213–220.
22. Марков К.К., Порецкий В.С., Шляпина Е.В. О колебаниях уровня Ладожского и Онежского озер в последленинградское время // Труды комиссии по изучению Четвертичного периода. 1934. Т. 4, вып. 1. С. 71–129.
23. Платонова Н.И., Григорьева Н.В., Миляев П.А., Курбатов А.В., Лапшин В.А., Лалазаров С.В., Александровский А.Л., Кулькова М.А., Бурова Н.А., Пономаренко Е.В., Прайс Т.Д., Скрипкин В.В., Шитов М.В., Сениченкова Т.Б. Новое в археологии Старой Ладogi: материалы и исследования. СПб.: ИИМК РАН, 2022. 732 с.
24. Распопов И.М., Вилинбахов В.Б., Горелова Э.М., Кириллова В.А. Ладога. Петрозаводск: Карельское книжное изд-во, 1969. 190 с.
25. Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / под ред. С.А. Кондратьева, Ш.Р. Позднякова, В.А. Румянцева, М.: РАН, 2021. 640 с.
26. Шведов С.Д. Отчет о результатах работ по объекту “ГДП-200 листов Р-36-XXXIII, XXXIV (Южно-Ладожская площадь)”. СПб.: АО “ПКГЭ”, 2015.
27. Шеффер Е.Г. Некоторые черты развития южного Приладожья в голоцене // Вестник Ленинградского университета. Геология. География. 1967. Т. 12, вып. 2. С. 159–162.
28. Шитов М.В., Бискэ Ю.С., Плешивцева Э.С., Мараков А.Я. Позднеголоценовые изменения уровня реки Волхов в районе Старой Ладogi // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2005. вып. 4. С. 3–16.
29. Шитов М.В. Голоценовые трансгрессии Ладожского озера. дис. ... канд. геол.-минер. наук. СПб.: СПбГУ, 2007. 17 с.
30. Шитов М.В., Багдасарян Т.Э., Бобровникова Е.М., Максимов Ф.Е., Потапович А.А., Сумарева И.В. Голоценовая история Ладожского озера // Мат-лы V всероссийской конф. с международным участием “Динамика экосистем в голоцене”. М.: Медиа-ПРЕСС, 2019. С. 348–351.
31. Энман С.В. Современные вертикальные движения земной поверхности на Карельском перешейке и близлежащих территориях // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 2006. Т. 81, вып. 6. С. 23–32.
32. Abakumov E.V., Polyakov V.I., Orlova K.S. Podzol development on different aged coastal bars of Lake Ladoga // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. 2019. No. 48. P. 6–31. <https://doi.org/10.17223/19988591/48/1>
33. Ailio J. Geographische entwicklung des Ladogasees in postglazialer zeit und ihre beziehung zur steinzeitlichen besiedelung // Fennia. 1915. Vol. 45. 157 p.
34. Dolukhanov P.M., Subetto D.A., Arslanov Kh.A., Davydova N.N., Zaitseva G.I., Djinoridze E.N., Kuznetsov D.D., Ludikova A.V., Sapelko T.V., Savelieva L.A. The Baltic Sea and Ladoga Lake transgressions and early human migrations in North-western Russia // Quaternary International. 2009. Vol. 203, No. 1–2. P. 33–51. <https://doi.org/10.1134/S1028334X09020226>

35. Dolukhanov P.M., Subetto D.A., Arslanov Kh.A., Davydova N.N., Zaitseva G.I., Kuznetsov D.D., Ludikova A.V., Sapelko T.V., Savelieva L.A. Holocene oscillations of the Baltic Sea and Lake Ladoga levels and early human movements // *Quaternary International*. 2010. Vol. 220, No. 1–2. P. 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.09.022>
36. Hawker L., Neal J. FABDEM V1-0, 2021. <https://doi.org/10.5523/bris.25wfy0f9ukoge2gs7a5mqpq2j7>
37. Malachovskij D.B., Delusin I.V., Gej N.A., Dginoridze R.N. Evidence from the Neva River Valley, Russia, of the Holocene history of Lake Ladoga // *Fennia*. 1996. Vol. 174(1). P. 113–123.
38. Molodkov A., Bitinas A. Sedimentary record and luminescence chronology of the Lateglacial and Holocene aeolian sediments in Lithuania // *Boreas*. 2006. Vol. 35(2). P. 244–254. <https://doi.org/10.1080/03009480600584915>
39. Naumenko M.A. Lake Ladoga digital bathymetric models: development approaches and insight for limnological investigations // *Limnological Review*. 2020. Vol. 20(2). P. 65–80. <https://doi.org/10.2478/limre-2020-0008>
40. Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E. et al. The IntCal20 Northern HEMISPHERE RADIO-CARBON AGE CALIBRATION CURVE (0–55 cal kBP) // *Radiocarbon*. 2020. Vol. 62(4). P. 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
41. Saarnisto M. Late Holocene land uplift/neotectonics on the island of Valamo (Valaam), Lake Ladoga, NW Russia // *Quaternary International*. 2012. Vol. 260. P. 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.09.005>
42. Saarnisto M., Grönlund T. Shoreline displacement of Lake Ladoga — new data from Kilpolansaari // *Hydrobiologia*. 1996. Vol. 322. P. 205–215. <https://doi.org/10.1007/BF00031829>
43. Virtasalo J.J., Ryabchuk D., Kotilainen A.T., Zhamoida V., Grigoriev A., Sivkov V., Dorokhova E. Middle Holocene to present sedimentary environment in the easternmost Gulf of Finland (Baltic Sea) and the birth of the Neva River // *Marine Geology*. 2014. Vol. 350. P. 84–96.
44. World Imagery [Электронный ресурс]. URL: https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer (дата обращения: 25.10.2024).

New Insight into the Late Holocene Lake-Level Changes of Lake Ladoga in the Southern Ladoga Region

**A.O. Aksenov^{1,2,3,*}, D.Yu. Bolshiyarov¹, S.A. Pravkin¹,
G.B. Lebedev¹, Z.V. Pushina^{1,4}, P.S. Zubkova⁵**

¹*Arctic and Antarctic Research Institute, Saint-Petersburg, Russia*

²*St Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia*

³*A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, Saint-Petersburg, Russia*

⁴*FSBI “VNIIOkeangeologia”, Saint-Petersburg, Russia*

⁵*Nizhnesvirsky Nature Reserve, Lodeynoe Pole, Saint-Petersburg, Russia*

*E-mail: aksenov2801@gmail.com

Received 04.12.2024

Revised 28.04.2025

Accepted 13.05.2025

This study presents the results of research detailing the fluctuations of the Lake Ladoga relative water-level in the southern Ladoga region during the period following the conclusion of the Ladoga transgression. Fieldwork was conducted on the Storozhno Peninsula and in the Nizhnesvirsky Nature Reserve. The methodology includes geomorphological profiling, peat coring, diatom analysis, infrared stimulated luminescence, and radiocarbon dating of collected sediments. It was established that

during the maximum stage of the transgression, 2900 cal. yrs BP, the lake's level in this area reached an absolute elevation of 16.5 meters, marked by beach ridges located at this height. Between 2100 and 1200 cal. yrs BP, the average level stabilized at 6–8 meters, resulting in the formation of an accumulative strandplain with numerous beach ridges. It is hypothesized that between 1200 and 500 cal. yrs BP, a low-amplitude rise in the lake's level occurred, leading to the formation of a barrier ridge at the 7.6 m altitude.

Keywords: Lake Ladoga, Late Holocene, level fluctuations, Ladoga transgression, coastal landforms, IR-OSL dating, radiocarbon dating, diatom analysis

References

1. Abramova S.A., Davydova N.N., Kvasov D.D. Istorija Ladozhskogo ozera v golocene po dannym sporovo-pyl'cevoego i diatomovogo analizov // Istorija ozer Severo-zapada. L.: Nauka, 1967. S. 113–132.
2. Aleksandrovskii A.L., Arslanov Kh.A., Davydova N.N., Doluchanov P.M., Zaitseva G.I., Kirpichnikov A.N., Kuznetsov D.D., Lavento M., Ludikova A.V., Nosov E.N., Savel'eva L.A., Sapelko T.V., Subetto D.A. New data on the Ladoga transgression, the Neva River formation, and agricultural development of northwestern Russia // Doklady Earth Sciences. 2009. Vol. 425, N 2. P. 274–278. <https://doi.org/10.1134/S1028334X09020226>
3. Amantov A.V., Spiridonov M.A. Geologija Ladozhskogo ozera // Sovetskaja geologija. 1989. № 4. S. 83–86.
4. Anohin V.M., Vinogradova O.M., Pjatov I.M., Dudakova D.S. Vdol'beregovoe peremeshhenie nanosov v Ladozhskom ozere po dannym analiza tjazhelej frakcii peskov v pribrezhnyh otlozhenijah // Izvestija Russkogo geograficheskogo obshhestva. 2023. T. 155, vyp. 3–4. S. 3–16.
5. Arslanov H.A. Radiouglerod: geohimija i geohronologija. L.: Izdatel'stvo Leningradskogo gosudarstvennogo universiteta, 1987. 300 s.
6. Badjukova E.N., Kaplin P.A. Beregovye bary // Geomorfologija. 1999. № 3. S. 3–15.
7. Bobrovnikova E.M., Shitov M.V. Svirskaja lagunno-barovaja sistema (pozdnij golocen, jugo-vostochnoe Priladozh'e) // Trudy Kol'skogo nauchnogo centra. 2019. T. 6, vyp. 1. S. 42–51.
8. Verzilin N.N., Klejmenova G.I. Osobennosti biogennogo osadkonakoplenija v golocene na territorii Leningradskoj oblasti // Izvestija Russkogo geograficheskogo obshhestva. 2005. T. 137, vyp. 1. S. 35–46.
9. Voloshko L.N. Zolotistye vodorosli severa: jekologicheskie uslovija obitanija // Astrahanskij vestnik jekologicheskogo obrazovanija. 2017. T. 42, № 4. S. 45–56.
10. Geomorfologija i chetvertichnye otlozhenija severo-zapada evropejskoj chasti SSSR (Leningradskaja, Pskovskaja i Novgorodskaja oblasti) / pod red. D.B. Malahovskogo, K.K. Markova L.: Nauka, 1969. 256 s.
11. Davydova N.N. Diatomovaja flora golocenovyh otlozhenij Ladozhskogo ozera M.: Nauka, 1968. S. 97–102.
12. Davydova N.N. Diatomovye vodorosli — indikatory jekologicheskikh uslovij vodoemov v golocene, L.: Nauka, 1985. 244 s.
13. Diatomovye vodorosli (iskopaemye i sovremennye). T. 1 / pod red. A.I. Proshkinov-Lavrenko. L.: Nauka, 1974. 403 s.
14. Istorija Ladozhskogo, Onezhskogo, Pskovsko-Chudskogo ozer, Bajkala i Hanki (Serija: Istorija ozer SSSR) / pod red. D.D. Kvasova, G.G. Martinsona, A.V. Raukas. L.: Nauka, 1989. 280 s.
15. Koshechkin B.I., Adamenko I.V., Arslanov H.A., Dzhinoridze R.N., Homutova V.I. Beregovye obrazovanija golocenovoj transgressii v Juzhnom Priladozh'e // Izvestija Russkogo geograficheskogo obshhestva. 1992. T. 124, vyp. 6. S. 541–547.

16. Koshechkin B.I., Jekman I.M. Golocenovyje transgressii Ladozhskogo ozera // *Jevoljucija prirodnyh obstanovok i sovremennoe sostojanie geosistemy Ladozhskogo ozera*. SPb: RGO, 1993. S. 49–60.
17. Ladozhskoe ozero i dostoprimechatel'nosti ego poberezh'ja [Atlas] / pod red. V.A. Rumjanceva, SPb: Nestor-Istorija, 2015. 200 s.
18. Lak G.C., Jekman I.M. O transgressijah Ladozhskogo ozera v golocene // *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1975. T. 222, № 1. S. 175–178.
19. Ludikova A.V. Svidetel'stva srednegolocenovoj transgressii Ladozhskogo ozera po dannym diatomovogo analiza // *Izvestija Russkogo geograficheskogo obshhestva*. 2015. T. 147, vyp. 4. S. 38–51.
20. Malahovskij D.B., Arslanov H.A., Gej N.A., Dzhinoridze R.N., Kozyreva M.G. Novye dannye po golocenovoj istorii Ladozhskogo ozera // *Jevoljucija prirodnyh obstanovok i sovremennoe sostojanie geosistemy Ladozhskogo ozera*. SPb: RGO, 1993. S. 61–73.
21. Markov K.K. Poslednikovaja istorija jugo-vostochnogo poberezh'ja Ladozhskogo ozera // *Voprosy geografii*. 1949. № 12. S. 213–220.
22. Markov K.K., Poreckij V.S., Shljapina E.V. O kolebanijah urovnja Ladozhskogo i Onezhskogo ozer v poslednikovoe vremja // *Trudy komissii po izucheniju Chetvertichnogo perioda*. 1934. T. 4, vyp. 1. S. 71–129.
23. Platonova N.I., Grigor'eva N.V., Miljaev P.A., Kurbatov A.V., Lapshin V.A., Lalazarov S.V., Aleksandrovskij A.L., Kul'kova M.A., Burova N.A., Ponomarenko E.V., Prajs T.D., Skripkin V.V., Shitov M.V., Senichenkova T.B. Novoe v arheologii Staroj Ladogi: materialy i issledovanija. SPb.: IIMK RAN, 2022. 732 s.
24. Raspopov I.M., Vilibahov V.B., Gorelova Je.M., Kirillova V.A. Ladoga. Petrozavodsk: Karel'skoe knizhnoe izd-vo, 1969. 190 s.
25. Sovremennoe sostojanie i problemy antropogennoj transformacii jekosistemy Ladozhskogo ozera v uslovijah izmenjajushhegosja klimata / pod red. S.A. Kondrat'eva, Sh.R. Pozdnjakova, V.A. Rumjanceva, M.: RAN, 2021. 640 s.
26. Shvedov S.D. Otchet o rezul'tatah rabot po ob'ektu "GDP-200 listov P-36-XXXIII, XXXIV (Juzhno-Ladozhskaja ploshhad')". SPb: AO "PKGJe", 2015.
27. Sheffer E.G. Nekotorye cherty razvitija juzhnogo Priladozh'ja v golocene // *Vestnik Leningradskogo universiteta. Geologija. Geografija*. 1967. T. 12, vyp. 2. S. 159–162.
28. Shitov M.V., Biskje Ju.S., Pleshivceva Je.S., Marakov A.Ja. Pozdnegolocenovyje izmenenija urovnja reki Volhov v rajone Staroj Ladogi // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Serija 7. Geologija. Geografija*. 2005. vyp. 4. S. 3–16.
29. Shitov M. V. Golocenovyje transgressii Ladozhskogo ozera. Avtoref. dis. ... kand. geol.-miner. nauk. SPb.: SPbGU, 2007. 17 s.
30. Shitov M.V., Bagdasarjan T.Je., Bobrovnikova E.M., Maksimov F.E., Potapovich A.A., Sumareva I.V. Golocenovaja istorija Ladozhskogo ozera // *Mat-ly V sserossijskoj konf. s mezhdunarodnym uchastiem "Dinamika jekosistem v golocene"*. M.: Media-PRESS, 2019. S. 348–351.
31. Jenman S.V. Sovremennye vertikal'nye dvizhenija zemnoj poverhnosti na Karel'skom pereshejke i blizlezhashhih territorijah // *Bjulleten' Moskovskogo obshhestva ispytatelej prirody. Otdel geologicheskij*. 2006. T. 81, vyp. 6. S. 23–32.
32. Abakumov E.V., Polyakov V.I., Orlova K.S. Podzol development on different aged coastal bars of Lake Ladoga // *Vestnik Tomskego gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*. 2019. No. 48. P. 6–31. <https://doi.org/10.17223/19988591/48/1>
33. Ailio J. Geographische entwicklung des Ladogasees in postglazialer zeit und ihre beziehung zur steinzeitlichen besiedelung // *Fennia*. 1915. Vol. 45. 157 p.
34. Dolukhanov P.M., Subetto D.A., Arslanov Kh.A., Davydova N.N., Zaitseva G.I., Djinoridze E.N., Kuznetsov D.D., Ludikova A.V., Sapelko T.V., Savelieva L.A. The Baltic Sea and Ladoga

Lake transgressions and early human migrations in North-western Russia // *Quaternary International*. 2009. Vol. 203, No. 1–2. P. 33–51. <https://doi.org/10.1134/S1028334X09020226>

35. Dolukhanov P.M., Subetto D.A., Arslanov Kh.A., Davydova N.N., Zaitseva G.I., Kuznetsov D.D., Ludikova A.V., Sapelko T.V., Savelieva L.A. Holocene oscillations of the Baltic Sea and Lake Ladoga levels and early human movements // *Quaternary International*. 2010. Vol. 220, No. 1–2. P. 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.09.022>

36. Hawker L., Neal J. FABDEM V1-0, 2021. <https://doi.org/10.5523/bris.25wfy0f9ukoge2gs7a5mqpq2j7>

37. Malachovskij D.B., Delusin I.V., Gej N.A., Dginoridze R.N. Evidence from the Neva River Valley, Russia, of the Holocene history of Lake Ladoga // *Fennia*. 1996. Vol. 174(1). P. 113–123.

38. Molodkov A., Bitinas A. Sedimentary record and luminescence chronology of the Lateglacial and Holocene aeolian sediments in Lithuania // *Boreas*. 2006. Vol. 35(2). P. 244–254. <https://doi.org/10.1080/03009480600584915>

39. Naumenko M.A. Lake Ladoga Digital Bathymetric Models: Development Approaches and Insight for Limnological Investigations // *Limnological Review*. 2020. Vol. 20(2). P. 65–80. <https://doi.org/10.2478/limre-2020-0008>

40. Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E. et al. The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP) // *Radiocarbon*. 2020. Vol. 62(4). P. 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>

41. Saarnisto M. Late Holocene land uplift/neotectonics on the island of Valamo (Valaam), Lake Ladoga, NW Russia // *Quaternary International*. 2012. Vol. 260. P. 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.09.005>

42. Saarnisto M., Grönlund T. Shoreline displacement of Lake Ladoga — new data from Kilpolansaari // *Hydrobiologia*. 1996. Vol. 322. P. 205–215. <https://doi.org/10.1007/BF00031829>

43. Virtasalo J.J., Ryabchuk D., Kotilainen A.T., Zhamoida V., Grigoriev A., Sivkov V., Dorokhova E. Middle Holocene to present sedimentary environment in the easternmost Gulf of Finland (Baltic Sea) and the birth of the Neva River // *Marine Geology*. 2014. Vol. 350. P. 84–96.

44. World Imagery [Electronic data]. URL: https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer (access date: 25.10.2024).

УДК 911.52(470.56)

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ФИТОПРОДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА В НИЗКОГОРНО-СТЕПНЫХ ЛАНДШАФТАХ ЮЖНОГО УРАЛА К ФЛУКТУАЦИЯМ ГИДРОТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

© 2025 г. А.В. Хорошев

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
Москва, Россия

E-mail: avkh1970@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.02.2025 г.

После доработки 08.05.2025 г.

Принята к публикации 27.05.2025 г.

Выявление естественного диапазона и последовательности состояний ландшафта требуется для оценки реакции фитопродукционного процесса на внешние сигналы, которая может оцениваться в категориях инерционности и восприимчивости. Мы используем динамику пространственного распределения нормализованных разностных вегетационных индексов (NDVI) для ранжирования групп урочищ степного ландшафта заповедника “Оренбургский” по чувствительности функционирования к гидротермическим флуктуациям и климатическим трендам. Использованы данные вегетационного периода 2013–2024 гг. за 82 срока. Методом главных компонент выделены 5 факторов дифференциации, описывающие либо динамику NDVI за ту или иную часть вегетационного периода, либо специфическую реакцию части урочищ на экстремальные погодные события. Выделены 8 классов годового хода, различающихся по времени достижения пика фитомассы и выраженности ее позднелетнего уменьшения. Установлена синхронность внутрисезонных изменений средних NDVI между группами урочищ. Выявлены формы устойчивости урочищ к гидротермическим флуктуациям. Ксеропетрофитные и сухие степи гребней и склонов наиболее инертны в случае летней засухи почти без потери фитомассы, но восприимчивы к обильным осадкам второй половины лета с ростом фитомассы. В случае потепления и иссушения климата они будут наиболее устойчивы. Типичные разнотравно-типчаково-ковыльные степи плато на среднесуглинистых черноземах южных более восприимчивы к позднелетним экстремальным осадкам при условии влажной первой половины лета. Ксеромезофитные и мезофитные сообщества лощин наиболее сильно теряют фитомассу при летней засухе и почти не восприимчивы к дополнительному увлажнению, что делает их наиболее уязвимыми в случае тренда на рост температур и уменьшения осадков.

Ключевые слова: NDVI, степь, гидротермические условия, сезонная динамика, засуха, экстремальные осадки, инертность, рельеф, прогноз

DOI: 10.31857/S0869607125030034, EDN: LTENTV

Введение

Стабильно высокий интерес науки и общества к реакции природной среды на климатические изменения и способам адаптации к ним стимулирует исследования естественного диапазона состояний ландшафтов. Выход за пределы этого диапазона под действием внешних сигналов может означать прекращение стабильного

функционирования. Вопрос в том, в каких случаях природные комплексы адаптируются к флуктуациям новым способом функционирования и потом восстанавливаются (эластичность), “не замечают” внешнего сигнала (пассивность), реагируют с запозданием (инерционность) или реагируют только после “накопления” эффектов в каком-либо геокомпоненте [4].

Современный уровень информационного обеспечения позволяет получать информацию не только эпизодически в “точках описания” (т.е. о “мгновенном снимке” одного из множества возможных состояний “репрезентативного” участка пространства), но и в постоянном режиме с полным площадным охватом. Материалы космической съемки обеспечивают возможность выявления режима функционирования, т.е. повторяемости характерных состояний, “поведения” ландшафта [3], с представлением пространственной структуры, хотя и, разумеется, с некоторой потерей детальности. Полевые исследования превращаются в способ верификации непрерывных в пространстве и во времени данных о функционировании.

Среди наиболее эффективных косвенных источников информации о функционировании ландшафта в последние десятилетия по мере накопления многолетних архивов спутниковых изображений стали вегетационные индексы. В степной зоне режим фитопродукционного процесса особенно четко увязывается с режимом увлажнения [1, 6, 7, 8, 12] и, следовательно, может индизировать режим такого “невидимого” геокомпонента, как подземные и грунтовые воды. Перераспределение тепла и влаги, как хорошо известно, — функция рельефа. Поэтому пространственное распределение фитопродукционного процесса может рассматриваться как важнейшая характеристика функционирования ландшафта в целом. Основным источником информации о фитопродукции в настоящее время служат не только данные трудоемких «точечных» измерений, но и вегетационные индексы.

Литературные материалы [2, 15, 19, 21] и наши уточнения с учетом региональной специфики уральских и предуральских степей [9, 11] об информативности нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) свидетельствуют о том, что он: 1) в целом нарастает с увеличением зеленой фитомассы; 2) может иметь разные значения при одинаковой зеленой фитомассе в зависимости от отражения сигнала открытой почвы; 3) нарастает с ростом проективного покрытия, причем часто сильнее, чем с ростом зеленой массы; 4) при наличии подстилки принимает большие значения, чем при открытой почве при одинаковом проективном покрытии; 5) убывает при значительной доле ветоши, экранирующей живые органы; 6) может убывать в период массового цветения; 7) менее корректно отражает зеленую массу при больших ее значениях за счет экранирования части живых органов верхними ярусами фитоценоза; 8) информативность относительно фитомассы варьирует в зависимости от фазы вегетации с максимумом в начале лета и минимумом в начале осени; 9) большой вклад в первой половине лета вносит разнотравье, который может превышать вклад злаков; 10) показывает не зеленую фитомассу как таковую, а баланс живой и мертвой фитомассы.

В современной литературе о фитопродукционном процессе наибольшее внимание привлекают широкоохватные исследования, нацеленные на многолетние тренды как реакцию на климатические изменения в региональном масштабе. Значительно меньше внимания уделяется детальному (крупному) масштабу в пространстве и времени, в котором можно сравнить чувствительность групп урочищ и даже фаций к гидротермическим флуктуациям как при кратковременных событиях, так и с учетом накопленных эффектов. Для ландшафтов бореального экотона Восточно-

Европейской равнины пионерное исследование локальных откликов продукционного процесса на глобальные изменения провел Э.Г. Коломыц [5]. Интерес к изменчивости сезонного хода фитомассы обусловлен как актуальностью вопроса об устойчивости в условиях климатических изменений, так и необходимостью корректного распознавания растительных сообществ и их модификаций [12, 18]. Чувствительность фитопродукционного процесса к гидротермическим изменениям может рассматриваться как полезный индикатор для определения видов устойчивости ландшафта, в том числе способности сопротивляться (*resistance*) и способности восстанавливаться (*resilience*) после внешнего воздействия [16, 19, 20].

В данном исследовании поставлена цель установить различия в чувствительности фитопродукционного процесса ландшафтных комплексов к внутрисезонным и межгодовым гидротермическим флуктуациям. Решались следующие задачи: 1) выявить классы годового хода фитомассы по NDVI; 2) оценить синхронность внутрисезонных изменений NDVI между видами урочищ; 3) выявить формы устойчивости урочищ к гидротермическим флуктуациям.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран низкогорно-степной ландшафт участка “Айтуарская степь” государственного заповедника “Оренбургский” и смежных с ним пастбищных территорий (рис. 1).

Ландшафт представляет собой структурно-эрозионное складчатое грядово-балочное низкогорье, сложенное чередующимися пластами карбоновых и пермских песчаников, конгломератов, известняков и алевролитов, с останцами эоценовых поверхностей выравнивания, с петрофитными разнотравно-ковыльно-типчакowymi степями на черноземах южных маломощных сильнокаменистых поверхност-



Рис. 1. Положение территории исследования (Айтуарская степь) в Кувандыкском районе Оренбургской области. Источник — Google Earth.

Fig. 1. Location of the study area (Aituar steppe) in the Kuvandyk district of the Orenburg region. Source: Google Earth.

но-карбонатных [10]. Район исследования обеспечен ландшафтной картой на уровне урочищ, 216 комплексными описаниями, охватывающими 33 видами урочищ, объединенных в 8 групп (плато, гребни и останцовые сопки, крутые астректурные склоны, покатые и пологие структурные склоны, делювиальные шлейфы, лощины, днища балок, амфитеатрообразные водосборные понижения). По 68 измерениям наземной фитомассы на площадках 0.5×0.5 м на пике вегетации коэффициент корреляции с NDVI в июне 2019 г. составил 0.62 [9]. Для исследования динамики вегетационных индексов использовано 82 безоблачных космических снимка Landsat 9 с радиометрической и геометрической коррекцией (табл. 1) с самой ранней датой 5 апреля (2014 и 2023 гг.), самой поздней — 21 октября (2020 г.). Интервал между датами съемки без учета года составляет от 1 до 8 суток, причем в 81% случаев — не более 4 суток, а 49% — 1 сутки; в 5 случаях интервал между датами составляет 7 или 8 дней. Таким образом, использованный ряд достаточно равномерно охватывает вегетационный период. Для получения NDVI использована платформа Google Earth Engine. Расчет проводился по 80410 пикселям с разрешением 30 м. Для визуализации годового хода использованы как простые линейные графики в порядке номеров суток с начала года, так и кривые аппроксимации, построенные методом локально взвешенной регрессии (Lowess).

Для каждого срока по 33 видам урочищ, выделенных на ландшафтной карте для заповедной части территории (85%), проведен расчет среднего значения NDVI и среднеквадратичного отклонения. Эти данные использованы для исследования по линейным графикам годового хода внутриурочищной (фациальной)

Таблица 1. Даты и количество сцен космических снимков Landsat 9, использованных для расчета и анализа динамики вегетационных индексов NDVI

Table 1. Dates and number of scenes of Landsat 9 space images used to calculate and analyze the NDVI dynamics

Год	Количество сцен							
	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	год
2013	1			1	3			5
2014	1	1	1	1	2	2		8
2015	1	1	1	2	1	1		7
2016				1	3			4
2017	2				1	1		4
2018	1				3	1		5
2019	2	1	3		1		1	8
2020	1	2	1	2		1	3	10
2021		3	1	1	3		2	10
2022	2		1	1	1	1	1	7
2023	2	2		1	1	1		7
2024	1	1		1	1	2	1	7
ВСЕГО	14	11	6	11	20	10	8	82

пространственной вариабельности фитопродукционного процесса, а также скорости изменения пространственной вариабельности до и после достижения пика.

Для снижения размерности данных и выявления факторов дифференциации вегетационных индексов применен метод главных компонент с вращением Varimax normalized (программа Statistica 7.0). Каждый из факторов характеризует пространственные различия “поведения” зеленой фитомассы в ту или иную часть сезона. Классификация пикселей по годовому ходу фитомассы проведена по 5 главным факторам дифференциации NDVI методом *к-средних* с выделением 8 классов в каждом варианте. Визуализация пространственного распределения значений NDVI, факторов их дифференциации, классов годового хода проведена в ГИС ArcMap 3.0.

Для каждого из 33 видов урочищ построены кривые годового хода средних значений NDVI за 2013–2024 гг. Рассчитана разность между максимальным значением за теплый сезон (как правило, начало первой или третьей декады июня) и минимальным NDVI лета (как правило, в конце августа).

Исследование синхронности внутрисезонных изменений NDVI между 8 группами урочищ проводилось по коэффициентам корреляции Пирсона и Спирмена по всей совокупности сроков космосъемки. Оценка достоверности различий в приращениях NDVI (с положительным или отрицательным знаком) между группами урочищ проводилась методом дисперсионного анализа в программе Statistica 7.0.

Для описания гидротермических флуктуаций и трендов использованы данные метеостанций Беляевка (95 км к восток-северо-востоку, ряд с 1951 г.) и Кувандык (50 км к северо-востоку, более короткий ряд).

Результаты

По результатам применения метода главных компонент сезонная динамика фитопродукционного функционирования описывается пятью переменными–“факторами” (93% объясненной дисперсии) (рис. 2).

Фактор 1 (27% объясненной дисперсии после вращения методом Varimax normalized) описывает возможность создания и удержания в июле–сентябре макси-

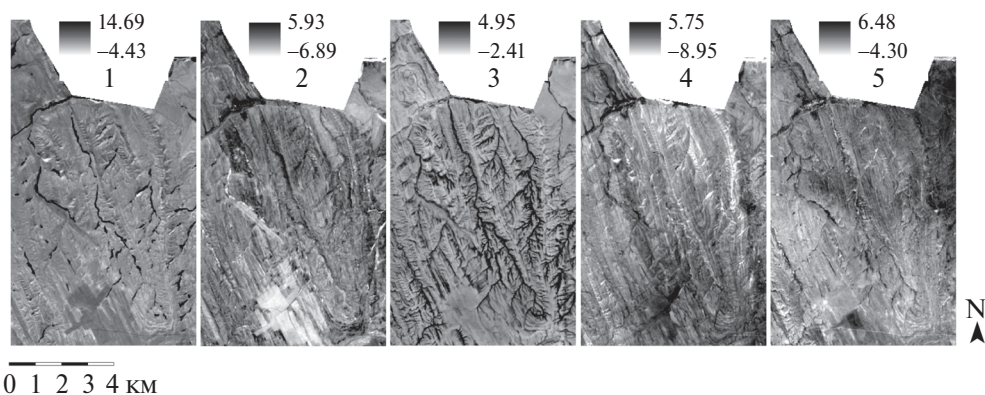


Рис. 2. Значения факторов 1...5 дифференциации NDVI по данным 82 сроков съемки в апреле–октябре 2013–2024 гг. Метод главных компонент с вращением Varimax normalized. Более темный тон соответствует более высоким значениям NDVI в период, описываемый данным фактором.

Fig. 2. Values of NDVI differentiation factors 1...5 based on 82 survey periods in April–October 2013–2024. Principal component analysis with Varimax normalized rotation. Darker tones indicate higher NDVI values in the period described by the factor.

мальной фитомассы при постоянно избыточном увлажнении в приручьевых черно-ольшанниках и отчасти на залежах и пастбищах, в отличие от большинства резко теряющих фитомассу степей. Фактор 2 (11% дисперсии) описывает возможность раннего начала вегетации в мае в петрофитных степях, кустарниковых и лесных сообществах при сильной задержке вегетации в залежных ковыльных степях плоских плато и днищ балок как наследие пахотных режимов. Фактор 3 (45% дисперсии) описывает возможность развития максимальной фитомассы в июне с относительно слабым уменьшением во второй половине лета в лугово-кустарниковых и лесных сообществах при минимальных значениях в петрофитных и сухих степях. Факторы 4 (7% дисперсии) и 5 (2% дисперсии) отражают возможность специфической реакции части урочищ на экстремально влажные условия второй половины лета в отдельные годы (2024 и 2013 гг. соответственно).

Классификация по годовому ходу NDVI приведена на рис. 3, а пространственное распределение классов — на рис. 4. Очевидно, что для всех групп урочищ характерны сильные межгодовые флуктуации в близкие сроки с отклонениями в ту или иную сторону (рис. 3а) относительно преобладающего внутрисезонного тренда с пиком в начале июня и постепенным спадом к осени (рис. 3б).

Для абсолютного большинства видов урочищ характерен раннеиюньский пик среднего NDVI (2–6 июня) (рис. 3б). Исключение составляют приручьевые черно-ольшанники с пиком в начале 3-й декады июня. Замедленный спад NDVI после июньского пика характеризует условия, где саморегулирование ландшафта проявляется в способности поддерживать достаточно высокую зеленую фитомассу после истощения весеннего запаса влаги и/или эффективно использовать максимум осадков, приходящийся обычно на июль, но расходуемый преимущественно на сильное физическое испарение. К группе урочищ со способностью поддерживать относительно большую фитомассу в июле относятся плато с ксерофитными

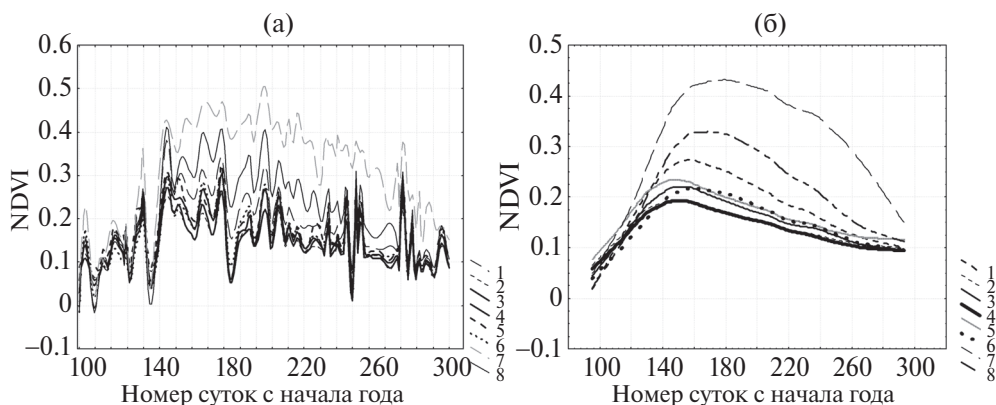


Рис. 3. Классы годового хода NDVI по данным 82 космоснимков Landsat 9 за вегетационный период 2013–2024 гг. (а) — средние значения NDVI для 15 наиболее типичных пикселей каждого класса (с минимальной дистанцией до центра класса); интерполяция на не обеспеченные снимками даты методом Spline. (б) — годовой ход со сглаживанием методом локально взвешенной регрессии (Lowess).

Fig. 3. Classes of the annual NDVI variation based on 82 Landsat 9 satellite images for the 2013–2024 growing season. (a) — average NDVI values for the 15 most typical pixels of each class (with the minimum distance to the class center); interpolation for dates not provided by images using the Spline method. (b) — annual variation with smoothing using the locally weighted regression method (Lowess).

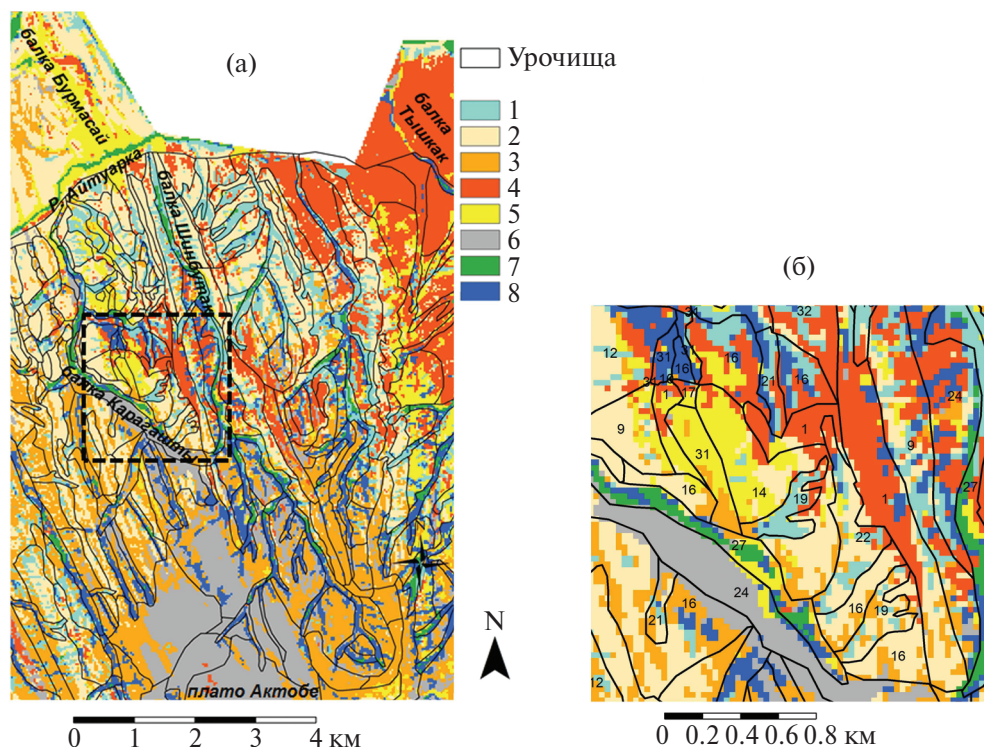


Рис. 4. Классификация пикселей по годовому ходу NDVI за теплый период 2013–2024 гг. на основании значений 5 факторов дифференциации (главных компонент), совокупно объясняющих 93% дисперсии. Содержание классов — см. рис. 3. Линиями показаны границы урочищ в заповедной части территории. Справа — выделенный прямоугольником фрагмент карты; подписаны номера видов урочищ.

Fig. 4. Classification of pixels by the annual NDVI variation for the warm period of 2013–2024 based on the values of 5 principal components, which explain 93% of the variance. The content of the classes — see Fig. 3. The lines indicate the boundaries of the natural landscape units in the protected part of the territory.

степями, пологие приводораздельные склоны на окраине плато с ксерофитными степями, делювиальные шлейфы с ксерофитными и мезоксерофитными степями, поймы с черноольшанниками в днищах балок. Эти группы урочищ объединяет либо возможность развития хорошо дифференцированных глубокогумусированных (30–60 см) средне- или тяжелосуглинистых почв, либо возможность латерального привноса влаги. К группе урочищ с наиболее быстрым спадом NDVI начиная со второй половины июня и до августа относятся преимущественно гребни и останцы с ксеропетрофитными степями, крутые ступенчатые склоны с ксеропетрофитными степями, лощины и днища балок с сочетанием мезоксерофитных и ксеромезофитных степей, кустарников и лугов.

Пик пространственной вариабельности для урочищ плато, гребней, склонов достигается позже, чем пик среднего NDVI. Это происходит в начале 3-й декады июня, когда в одних фациях (как правило, при выпуклом микрорельефе) уже начинается летний перерыв вегетации, а в других еще сохраняется высокая интенсивность фитопродукционного процесса. На 3-ю декаду приходится пик пространственной вариабельности на шлейфах, в лощинах, балках, долинах, где есть дополнительный

латеральный привнос влаги в некоторых фациях, способных сохранять высокий уровень фитомассы до конца июня. Наиболее быстрое сокращение внутриурочищной вариабельности NDVI после позднеиюньского пика к началу августа происходит в автономных видах урочищ с выпуклым рельефом и интенсивным оттоком влаги — гребней, останцовых гряд.

Распределение типов годового хода NDVI по видам урочищ (рис. 4) показывает как случаи почти полного совпадения границ, так и необходимость их корректировки или уточнения внутреннего строения в соответствии с функциональными показателями. Так, урочища округловершинных гребней с ксеропетрофитными степями практически однородны по годовому ходу (рис. 4б, № 1). Урочища лощин (рис. 4б, № 19) могут быть как однородными (класс 1) с закустаренными кострцовыми лугами, так и мозаичными с чередованием фаций кустарниковых ковыльно-разнотравных степей и кострцовых лугов. Днище балки Карагашты (рис. 4б, № 24), монотонно по годовому ходу (класс 6), что индицирует наследие пахотных режимов до 1980-х гг. При этом ареал класса годового хода 6 позволяет уточнить границы урочища, проведенные по весьма постепенному вогнутому перегибу рельефа. В то же время другой контур урочища того же вида (№ 24) в восточной части территории (рис. 4б) сохраняет внутреннее разнообразие фитопродукционного функционирования, предопределенное чередованием фаций с ксерофитными и ксеромезофитными степями в соответствии с микрорельефом. В некоторых случаях карта годового хода четко показывает необходимость дробления контуров на две части в соответствии с достигаемой интенсивностью фитопродукционного процесса. Например, крутые аструктурные склоны с ксеропетрофитными степями (рис. 4б, вид урочища № 14) делятся на два сектора: класс годового хода 2 отличается от класса 5 меньшей фитомассой из-за повышенной каменистости почв, особенно в июне.

Сопряженность изменения средних NDVI между типами геосистем оказалась близка к абсолютной (КК 0.98–0.99) как в целом за вегетационный период (1984–2024), так и отдельно по месяцам. Наиболее высока сопряженность средних NDVI лощин и днищ балок, что свидетельствует о сопряженности латеральных потоков. Отклонения от практически линейной зависимости наблюдались в экстремально сухие годы (2010, 2014, 2016, 2021) за счет большей фитомассы днищ балок, вскрывающих, в отличие от лощин, подземные воды. Сопряженность средних NDVI склонов и лощин чуть ниже, чем между лощинами и балками. В лощинах средняя фитомасса в сухие годы (1995, 2009, 2019) могла быть выше предсказанной. Это свидетельствует о наличии дополнительного источника влаги, помимо атмосферной, — инерционного поступления подземных вод весенних месяцев.

Экстремально влажные условия второй половины лета 2013 и 2024 гг. четко проявили различия фитопродукционного функционирования ряда местностей, что хорошо видно по пространственному распределению значений факторов 4 и 5 (рис. 2). Наибольшей восприимчивостью к позднелетнему избытку влаги (07.07.2013–15.08.2013, 21.07.2024–29.08.2024), проявляющейся в приростах NDVI, отличались группы урочищ: 1) возвышенного плато и седловин с суглинистыми почвами; 2) низменных широких днищ балок; 3) узких гребней и смежных крутых каменистых склонов с ксеропетрофитными сообществами, в том числе южной экспозиции; 4) низменные сектора балок Тышкак и Бурмасай. Граница местностей с противоположной реакцией на экстремально избыточное увлажнение была очень резкой и проходила вдоль днища верхнего сектора балки Карагашты.

Восприимчивость к избыточной позднелетней влаге, способной нейтрализовать обычный летний “перерыв вегетации” многих видов, неодинакова в зависимости от предшествующих условий теплого периода. В прохладном августе (после прохладного июля) экстремально влажного 2024 г. повышенные NDVI были характерны вдоль крупнейших балок и для плато Актобе. Эти урочища отличаются относительно хорошо развитым профилем среднесуглинистых черноземов южных с мощностью гумусового профиля (A + AB) 44–56 см. Однако в 2013 г. с нормативными температурами влажных июля и августа, но с сухим июнем, повышенные NDVI наблюдались только в глубокорасчлененном центральном (междуречье балок Карагашты и Шинбутак) и северо-восточном секторах. Таким образом, усиление вегетации в августе на плато Актобе произошло только в 2024 г., когда экстремально влажным было все лето и зима, но не в 2013 г, когда май и июнь были суше и теплее обычного. В годы с обычными характеристиками второй половины теплого сезона отличия были несущественными.

В июле–августе влажного 2013 г. сокращение фитомассы (т.е. невосприимчивость к аномальному притоку влаги) проявлялось: а) в юго-западном секторе с субвертикальным залеганием верхнепермских пластов и преобладанием покатых и пологих склонов; б) на останцовой поверхности выравнивания; в) в водосборном понижении балки Шинбутак.

Пастбищные угодья балок и останцовых сопок к северу от р. Айтуарка с наибольшей длительностью пребывания скота характеризуются высокой восприимчивостью к экстремальным осадкам июля–августа (2013, 2024), в отличие от аналогичных урочищ заповедника (к югу от р. Айтуарка). По нашим наблюдениям, в это время повышено обилие полыни австрийской, грудницы шерстистой и пасторальных видов (рогач) при резко сократившейся доле злаков и низком проективном покрытии (20%). В засушливые годы (2014, 2019) значения NDVI почти не отличались.

Реакция на экстремально влажные условия 2024 г. мезофитных сообществ водосборных понижений отличалась от реакции ксерофитных сообществ. Уменьшалась фитомасса степномятликово-молочайно-кровохлебово-кострецового луга на мощном выщелоченном черноземе и звездчатково-тростникового луга на лугово-черноземной почве, в отличие от ксерофитных и ксерогалофитных сообществ. Следовательно, даже обильная позднелетняя атмосферная влага не формирует потока подземных вод, которые могли бы увеличить увлажненность почв починенных позиций, где разгрузка вод формирует большую фитомассу в июне. Влага второй половины лета, видимо, полностью потребляется в автономных позициях степными фитоценозами. Во всяком случае, интенсивность формирования ветоши во второй половине лета в лугах превышает интенсивность формирования новой зеленой массы.

Низкая восприимчивость к дополнительной позднелетней влаге свойственна супераквальным урочищам прирусловых врезов и днищ балок, трансакумулятивным урочищам днищ лощин, покатых северных и западных склонов с повышенным обилием кустарников, ксеромезофитов и мезофитов. Баланс фитомассы, несмотря на возможный прирост массы некоторых видов, смещен в сторону усиленного образования ветоши, что снижает NDVI. Следовательно, ксеромезофиты и мезофиты используют для производства фитомассы в основном раннелетний период нормальной влагообеспеченности. Позднелетняя аномалия влажности в отдельные годы мезофитами воспринимается в меньшей степени.

В условиях засушливого лета пространственные закономерности сезонной динамики NDVI иные. Так, в 2019 г. мезофитные сообщества водосборных понижений позднее начинали вегетацию, позднее достигали пика фитомассы и сильнее ее теряли во второй половине лета, чем степные сообщества автономных позиций.

В сухие годы (2019) при июньских NDVI 0.10–0.20 (что соответствует ксерофитным и ксеропетрофитным степям) относительное сокращение фитомассы (в долях 1) за лето было тем более сильным, чем выше были июньские значения (рис. 5). Максимальное падение было характерно для луговых и ксеромезофильно-кустарниковых степей (NDVI июня 0.20–0.30). В мезофитных фациях ложин (с NDVI июня более 0.30) сокращение фитомассы было менее интенсивным (рис. 5б). Среди степных сообществ минимальное сокращение было характерно для сухих типчаковых степей. В более влажных местообитаниях относительное сокращение увеличивалось. В группе урочищ плато с хорошо развитыми среднесуглинистыми черноземами южными под разнотравно-ковыльными или галофитными степями зафиксирована линейная зависимость: чем большая фитомасса накопилась к июню, тем больше были ее относительные потери за оставшийся летний период (рис. 5а), что свидетельствует об отсутствии механизмов инертности (как для заповедных, так и для залежных участков разного возраста).

Помимо межурочищных различий фитопродукционного процесса, в некоторые сроки могут усиливаться или ослабляться контрасты между секторами территории, разделенными крупными балками. Сухой июнь (после сухого мая) 2019 г. не создавал резких контрастов между секторами при обычной дифференциации фитомассы по рельефу с ростом по мере увеличения вогнутости. Во второй половине июня высокими значениями отличалась залежь 1992 г. в южном секторе плато Актобе, проявлявшая устойчивость инертность на фоне истощения запасов почвенной влаги (которое на плато в целом проявлялось меньше, чем в расчлененном секторе). В экстремально жарком и сухом 2010 г. в интервале 22 июля — 8 сентября минимальное сокращение фитомассы было свойственно урочищам плато с хорошо развитыми

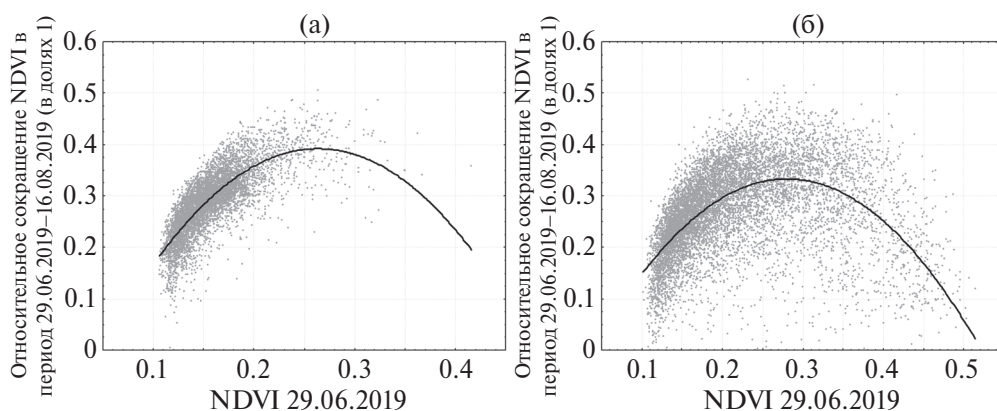


Рис. 5. Относительное сокращение NDVI в период 29 июня — 16 августа жаркого сухого 2019 г. (в долях 1 от NDVI 29.06.2019) в группах урочищ: (а) — на плато (6685 пикселей), (б) — в ложинах (9280 пикселей). Аппроксимация полиномом 2-й степени.

Fig. 5. Relative decrease in NDVI in the period June 29 — August 16 of the hot dry year 2019 (in fractions of 1 from NDVI on June 29, 2019) in groups of units: (a) — on the plateau (6685 pixels), (b) — in gullies (9280 pixels). Quadratic polynomial approximation.

глубокогумусированными черноземами. Сильнее сократилась фитомасса на гребнях с петрофитными степями на маломощных литоземах, еще сильнее — на крутых и покатых склонах с разнотравно-типчаково-ковыльным степями (рис. 6а). Максимальное сокращение фитомассы произошло в урочищах, наиболее сильно зависящих от разгрузки подземных вод: в днищах балок и водосборных понижениях с луговыми степями, лугами и кустарниками с порослью осины на черноземах гидрометаморфизированных. В экстремально влажном 2024 г. в урочищах плато происходило максимальное приращение, на шлейфах и в лощинах — уменьшение (рис. 6б).

Сопоставлены приращения NDVI за интервалы длительностью около 2 недель в начале летней паузы вегетации (июнь—начало июля) и в конце летнего периода (август) для сухих и влажных лет для зон аккумуляции (на склонах, в днищах ложин) грунтовыми водами за счет разгрузки грунтовых вод. В сухой год (2019) в местах разгрузки грунтовых вод в водосборных понижениях в июле еще продолжалось нарастание фитомассы, в отличие от фоновых степей. Проявлялась инерционность латеральной гидрогеологической связи между плато и водосборами. В августе сухого 2014 г. именно в этих урочищах происходило наиболее сильное сокращение фитомассы после прекращения латерального притока влаги и усыхания мезофильного разнотравья. Во влажные годы (2013, 2015, 2024) сокращение фитомассы к началу июля проявляется даже в местах разгрузки грунтовых вод, что индицирует прекращение латеральной подпитки.

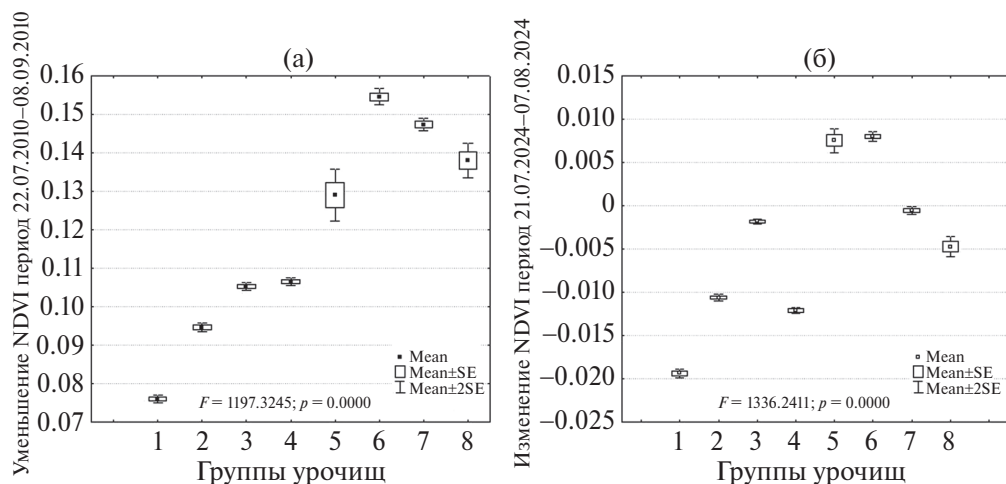


Рис. 6. Изменение NDVI для групп урочищ, в период 22 июля — 8 сентября экстремально жаркого сухого 2010 г. (а) и 21 июля — 29 августа экстремально влажного 2024 г. Положительные значения соответствуют сокращению фитомассы, отрицательные — увеличению. Группы урочищ: 1 — плато, 2 — гребни, 3 — крутые склоны, 4 — покатые и пологие склоны, 5 — делювиальные шлейфы, 6 — лощины, 7 — днища балок, 8 — водосборные понижения. Дисперсионный анализ. Mean — среднее. SE — стандартная ошибка. F — критерий Фишера, p — уровень значимости.

Fig. 6. Changes in NDVI for groups of natural units in the period July 22 — September 8 of the extremely hot and dry year 2010 (A) and July 21 — August 29 of the extremely wet year 2024. Positive values correspond to a decrease in phytomass, negative values — to an increase. Groups of natural boundaries: 1 — plateaus, 2 — ridges, 3 — steep slopes, 4 — gentle slopes, 5 — diluvial trains, 6 — gullies, 7 — valley bottoms, 8 — catchment depressions. Analysis of variance. Mean — average. SE — standard error. F — Fisher's criterion, p — significance level.

Обсуждение

Исследование позволило установить для групп сообществ и урочищ характерные типы сезонного хода фитопродукционного функционирования, индикатором которой служил NDVI. В условиях отсутствия детальных микроклиматических данных сведения об изменчивости фитопродукционного функционирования могут рассматриваться как индикатор метахронности гидротермических режимов.

Мезофитные и ксеромезофитные сообщества формируются при наличии достаточного увлажнения до июня, в том числе за счет позднего снеготаяния в вогнутых и затененных позициях рельефа. Такие урочища выделяются повышенным содержанием илистых частиц и мощными гумусовыми горизонтами почв (до 40–45 см). Такие сообщества эффективно и полностью используют запас почвенной влаги в первой половине июня, наращивая до максимума фитомассу. Затем истощение запасов влаги вызывает сокращение фитомассы, особенно сильное в засушливые годы. В годы с влажной второй половиной лета приращение фитомассы минимальное или отсутствует; дополнительный запас влаги не используется. Уже отмечалось [13], что кустарники (в нашем случае увеличивающие обилие в лучше увлажненных местообитаниях) менее чувствительны к росту увлажнения, чем травы.

Ксерофитные и ксеропетрофитные сообщества на маломощных супесчано-скелетных литоземах и петроземах формируются на выпуклых позициях рельефа, где снегонакопление минимально из-за сдувания в понижения, а снеготаяние начинается наиболее рано и происходит быстро, особенно на южных склонах. Поэтому максимальная фитомасса достигается уже в начале мая, когда еще не произошло иссушение почв. В засушливые периоды второй половины лета сокращение фитомассы существенно меньше, чем в мезофитных и ксеромезофитных сообществах. В отличие от последних, пик вегетации многих доминирующих полукустарничков и трав (прутняк, грудница шерстистая, полынь австрийская и др.) смещен с июня на август. Это проявление инерционности. В случае экстремально влажной второй половины лета дополнительная влага используется эффективно с существенным приращением фитомассы. Этот результат согласуется с литературными сведениями о большей восприимчивости к дополнительным осадкам в более засушливых местообитаниях, чем в увлажненных [13], более высокой сопротивляемости засухам и более высокой восстанавливаемости после избыточного увлажнения, по сравнению с гумидными ландшафтами [16]. Возобновление и усиление вегетации во второй половине теплого периода при комбинировании условия длительно высокой влажности и невысоких температур отмечалось для американских прерий [21] и аргентинской пампы [13]. При этом приращения фитомассы в геохимически сопряженных лощинах не происходит, что свидетельствует о полном потреблении избыточной влаги сообществами склонов и гребней без поступления в латеральный сток. Уже обращалось внимание на важность кумулятивного эффекта накопления влаги за несколько месяцев [13]. Наше исследование показало разную восприимчивость типично-степных плакорных и петрофитно-степных урочищ к экстремальным осадкам второй половины лета в зависимости от гидротермических условий предшествующих месяцев.

Полученные результаты, в том числе о значимости кумулятивных гидротермических эффектов, дают возможность представить наиболее вероятные реакции групп урочищ при разных сценариях климатических трендов. Такой подход считается перспективным для практических целей, в частности для прогнозирования кормовых ресурсов в степях за некоторое время до сезона выпаса [17].

Данные ближайших метеостанций показывают, что в последние 10–15 лет улучшаются условия для ускорения весеннего снеготаяния и более раннего начала вегетационного периода из-за уменьшения мартовских осадков и роста апрельских температур. В мае и июне благодаря снижению температур и, соответственно, испарения, условия стали благоприятны для продления сохранности весенних влагозапасов. Рост июльских осадков, однако, не способствует продлению раннелетней вегетации из-за резкого роста температур и испарения. В летний период с начала XXI в. господствуют засушливые условия при эпизодических сильных флуктуациях (экстремально влажные 2013, 2024 гг., засушливые 2010, 2019–2021 гг.).

При продолжении тренда можно ожидать роста фитопродуктивности мезофитных и мезоксерофитных сообществ, которые обычно достигают пика вегетации в первой декаде июня. Возможно смещение пика вегетации на вторую половину июня, как это происходит в менее петрофитных сообществах Буртинской степи. Однако в то же время не формируется благоприятных условий для улучшения вегетации зональных степных и луговых сообществ в июле и августе из-за роста испарения на фоне повышающихся температур. В случае формирования тренда на рост июльских (уже обозначившегося) и августовских осадков наибольшего роста фитомассы следует ожидать в ксеропетрофитных и сухостепных типчаково-грудницево-австрийскопопынных сообществах глубокорасчлененной местности, а также депрессионных степных сообществ выпасаемой северной части ландшафта.

Совпадение естественного позднелетнего пика вегетации с дополнительным увлажнением приводит в ксеропетрофитных и ксерогалофитных сообществах к росту зеленой фитомассы и, соответственно, расходованию влаги на транспирацию. Однако при этом не приходится ожидать роста продуктивности мезофитных и ксеромезофитных сообществ вогнутых позиций рельефа (лощин, днищ балок, пойм). Сопряженного роста фитомассы в трансаккумулятивных и супераквальных урочищах во влажные годы не происходит. Одной из существенных причин может быть большой расход влаги на создание фитомассы на гребнях, плато и склонах, а не на сток, несмотря на водопроницаемость супесчано-скелетных почв. Мезофитные и ксеромезофитные сообщества в обычных условиях засушливого лета наиболее быстро теряют живую массу и наращивают массу ветоши в августе по сравнению со степными и петрофитными. Эта закономерность не отменяется даже в случае обильных осадков июля и августа. Исследования на другом участке заповедника “Оренбургский”, — Предуральской степи — расположенном западнее на равнине [14], также показали неустойчивость ксеромезофитных сообществ к засухам, но мезофитные сообщества с кустарниками снижали фитомассу гораздо меньше, что расходится с нашими результатами.

Глубокая гумусированность и тяжелый гранулометрический состав почв плато в экстремально влажные годы способствуют удержанию влаги, что благоприятно для активной позднелетней вегетации типичностепных разнотравно-типчаково-ковыльных и старозалежных разнотравно-ковыльных степей. Следовательно, в случае тренда на рост увлажнения второй половин лета можно прогнозировать, как и для ксеропетрофитных сообществ, рост продуктивности и “смягчение” обычного для степей летнего перерыва вегетации. Исследования в Предуральской степи показали неустойчивость к засухам ксеромезофитных сообществ и залежей на месте ксерофитных сообществ [14].

В случае активного роста июльских и августовских температур, т.е. тренда последних 30 лет, и отсутствия роста осадков (что характерно сейчас для августа)

ксеропетрофитные сообщества обладают запасом инерционности, так как способны эффективно использовать скудную влагу и почти сохранять фитомассу в наиболее засушливые годы, в отличие от типичных степей и лугов.

Наше исследование ограничено применением только одного вегетационного индекса, характеризующего соотношение живой и мертвой фитомассы и степень покрытия почвы. Другие стороны изменчивости функционирования ландшафта могут быть охарактеризованы через индексы, отражающие влажность фитомассы, температурный режим приповерхностного слоя, отражающую способность открытой почвы и др. Для развития исследований необходимо применение более широкого набора вегетационных индексов, учитывающих влияние почвы, а также более подробная верификация их содержания с учетом соотношения фракций фитомассы, особенно в наиболее высокопродуктивных многоярусных мезофитных сообществах. Требуется дальнейшей проверки для разных групп урочищ полученный результат о регулирующей роли свойств почв в способности фитоценоза сохранять инерционность при экстремальных гидро-термических условиях.

Заключение

Интеграция режимов функционирования может происходить в экстремальные годы по большим группам урочищ — местностям. Приращение и падение средней интенсивности фитопродукционного процесса происходит синхронно в разных группах урочищ.

Ксеропетрофитные и сухие степи глубокорасчлененного сектора с литоземами и петроземами наиболее восприимчивы к обильным осадкам второй половины лета с ростом фитомассы, но инертны в засушливые периоды без уменьшения фитомассы. Для сильностравленных сообществ, сходных по составу доминантов после сокращения обилия злаков, характерна та же закономерность. В случае потепления и иссушения прогнозируется устойчивое состояние.

Типичные разнотравно-типчаково-ковыльные степи плато на хорошо развитых среднесуглинистых черноземах южных более восприимчивы к позднелетним экстремальным осадкам с ростом фитомассы, чем ксеропетрофитные степи сильнокаменистых местообитаний.

Во второй половине лета во влажные годы сообщества днищ балок, лощин и шлейфов невосприимчивы к дополнительному увлажнению и теряют массу или рост ветоши превышает рост зеленой массы, в отличие от склонов и гребней, которые позитивно реагируют на увлажнение. Ксеромезофитные и мезофитные сообщества лощин наименее устойчивы к засухе.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 24-17-00045).

Список литературы

1. Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. Москва: Наука, 1993. 293 с.
2. Барталев А.С., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. 2016. Спутниковое картографирование растительного покрова России. Москва: ИКИ РАН. 208 с.

3. Беручашвили Н.Л. Этология ландшафта и картографирование состояний природной среды. Тбилиси: Изд-во Тбилисского университета, 1989. 198 с.
4. Гродзинский М. Д. Ландшафтная экология. Київ: Знання, 2014. 550 с.
5. Коломыц Э.Г. Экспериментальная географическая экология. Записки географа-натуралиста. Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2018. 716 с.
6. Мордкович В.Г. 2014. Степные экосистемы. Новосибирск: Акад. изд-во “Гео”, 170 с.
7. Рябинина Н.О. Степноеведение. Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2014. 472 с.
8. Титлянова А.А., Базилевич Н.И., Шмакова Е.И., Снытко В.А., Дубынина С.С., Магомедова Л.Н., Нефедьева Л.Г., Семенюк Н. В., Тишков А.А., Ти Тран, Хакимзянова Ф.И., Шатохина Н.Г., Кыргыс Ч.О., Самбуу А.Д. Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности. Новосибирск: ИПА СО РАН, 2018. 110 с.
9. Хорошев А. В. Пространственная структура как фактор стабильности биопродукционного функционирования степных геосистем (на примере Айтуарской степи, Южный Урал) // Принципы экологии. Т. 9. 2020. № 3. С. 71–86.
10. Хорошев А.В., Леонова Г.М. Реакции при изменении увлажнения в ландшафте Айтуарской степи (Южный Урал) // Вестник Московского университета, серия 5 география. 2015. № 4. С. 95–103.
11. Хорошев А.В., Калмыкова О.Г., Дусаева Г.Х. Оценка индекса NDVI как источника информации о наземной фитомассе в степях // Исследование Земли из космоса. 2023. № 3. С. 27–43. <https://doi.org/10.31857/S020596142303003X>
12. Eastman J.R., Sangermano F., Machado E.A., Rogan J., Anyamba A. Global trends in seasonality of normalized difference vegetation index (NDVI), 1982–2011 // Remote Sensing. Vol. 5. 2013. P. 4799–4818. <https://doi.org/10.3390/rs5104799>
13. Fabricante I., Oesterheld M., Paruelo J.M. Annual and seasonal variation of NDVI explained by current and previous precipitation across Northern Patagonia // Journal of Arid Environments. Vol. 73, Issue 8. 2009. P. 745–753.
14. Fedorov N.I., Zharkikh T.L., Mikhailenko O.I., Bakirova R.T., Martynenko V.B. Forecast changes in the productivity of plant communities in the Pre-Urals steppe site of Orenburg state nature reserve (Russia) in extreme drought conditions using NDVI // Nature Conservation Research. Заповедная наука 2019. 4 (Suppl.2). P. 104–110. <https://doi.org/10.24189/ncr.2019.044>
15. Gilmanov T.G., Tieszen L.L., Wylie B.K., Flanagan L.B., Frank A.B., Haferkamp M.R., Meyers T.P., Morgan J.A. Integration of CO₂ flux and remotely-sensed data for primary production and ecosystem respiration analyses in the Northern Great Plains: potential for quantitative spatial extrapolation // Global Ecology and Biogeography. 2005. Vol. 14. P. 271–292.
16. Hossain L., Li J. NDVI-based vegetation dynamics and its resistance and resilience to different intensities of climatic events // Global Ecology and Conservation. Vol. 30. 2021, e01768. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01768>
17. Jobbagy E.G., Sala O.E., Paruelo J.M. Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: a remote sensing approach // Ecology. Vol. 83(2). 2002. P. 307–319.
18. Klimavicius L., Rimkus R., Stonevicius E. Seasonality and long-term trends of NDVI values in different land use types in the eastern part of the Baltic Sea basin // Earth system changes in marginal seas / Oceanologia. Vol. 65. 2023. P. 171–181. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2022.02.007>
19. Sternberg T., Tsolmon R., Middleton M., Thomas D. Tracking desertification on the Mongolian steppe through NDVI and field-survey data // International Journal of Digital Earth. Vol. 4(1). 2011. P. 50–64. <https://doi.org/10.1080/17538940903506006>

20. Vogel A., Scherer-Lorenzen M., Weigelt A. Grassland resistance and resilience after drought depends on management intensity and species richness // PLoS One. Vol. 7(5). 2012, e36992. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0036992>

21. Wang R., Gamon J.A., Montgomery R.A., Townsend P.A., Zyguelbaum A.I., Bitan K., Tilman D., Cavender-Bares J. Seasonal Variation in the NDVI–Species Richness Relationship in a Prairie Grassland Experiment (Cedar Creek) // Remote Sensing. 2016. Vol. 8, 128. <https://doi.org/10.3390/rs8020128>

Sensitivity of Phytoproduction in Low-Mountain Steppe Landscapes in the Southern Urals to Hydrothermal Fluctuations

A.V. Khoroshev

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

E-mail: avkh1970@yandex.ru

Received 27.02.2025

Revised 08.05.2025

Accepted 27.05.2025

Identification of the natural range and sequence of landscape states is required to assess the response of the phytoproduction process to external signals in terms of inertia and susceptibility. We studied the spatio-temporal dynamics of normalized difference vegetation indices (NDVI) in the steppe landscape of the Orenburgsky Reserve to rank groups of natural units by the sensitivity of functioning to hydrothermal fluctuations and climatic trends. Data for the vegetation period of 2013–2024 for 82 periods were taken. We performed the principal component analysis to identify 5 factors describing either the NDVI dynamics for a particular part of the vegetation period or the specific response of units to extreme weather events. Eight classes of annual variation were identified, differing in the time of reaching the peak of phytomass and the severity of its late summer decrease. We found evidence for the synchronicity of intraseasonal changes in average NDVI between groups of units. Various forms of resistance to hydrothermal fluctuations were distinguished. Xeropetrophytic and dry steppes on ridges and slopes are the most resistant to summer drought almost not losing phytomass. However, they are susceptible to heavy precipitation in the late summer and increase phytomass. In case of climate warming and drying, they will be the most resistant. Typical steppes on the plateau on loamy southern chernozems are more susceptible to late summer extreme precipitation, provided that the first half of summer was wet. Xeromesophytic and mesophytic communities in gullies lose phytomass most strongly during summer drought being almost not susceptible to additional moisture. This makes them the most vulnerable in case of increase in temperature and decrease in precipitation.

Keywords: NDVI, steppe, hydrothermal conditions, seasonal dynamics, drought, extreme precipitation, inertia, relief, forecast

References

1. Bazilevich N.I. Biologicheskaja produktivnost' jekosistem Severnoj Evrazii. Moskva: Nauka, 1993. 293 s.
2. Bartalev A.S., Egorov V.A., Zharko V.O., Lupjan E.A., Plotnikov D.E., Hvostikov S.A., Shabanov N.V. 2016. Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii. Moskva: IKI RAN. 208 s.
3. Beruchashvili N.L. Jetologija landshafta i kartografirovanie sostojanij prirodnoj sredy. Tbilisi: Izd-vo Tbilisskogo universiteta, 1989. 198 s.

4. Grodzins'kij M. D. Landshaftna ekologija. Kiiv: Znannja, 2014. 550 s.
5. Kolomyts Je.G. Jeksperimental'naja geografigheskaja jekologija. Zapiski geografa-naturalista. Moskva: Tovarishestvo nauchnyh izdanij KMK, 2018. 716 s.
6. Mordkovich V.G. 2014. Stepnye jekosistemy. Novosibirsk: Akad. izd-vo "Geo", 170 s.
7. Rjabinina N.O. Stepevedenie. Volgograd: Izd-vo VolGU, 2014. 472 s.
8. Titljanova A.A., Bazilevich N.I., Shmakova E.I., Snytko V.A., Dubynina S.S., Magomedova L.N., Nefed'eva L.G., Semenjuk N. V., Tishkov A.A., Ti Tran, Hakimzjanova F.I., Shatohina N.G., Kyrgys Ch.O., Sambuu A.D. Biologicheskaja produktivnost' travjanyh jekosistem. Geograficheskie zakonomernosti i jekologicheskie osobennosti. Novosibirsk: IPA SO RAN, 2018. 110 s.
9. Khoroshev A. V. Prostranstvennaja struktura kak faktor stabil'nosti bioprodukcionnogo funkcionirovanija stepnyh geosistem (na primere Ajtuarskoj stepi, Juzhnyj Ural) // Principy jekologii. T. 9. 2020. № 3. S. 71–86.
10. Khoroshev A.V., Leonova G.M. Reakcii pri izmenenii uvlazhnenija v landshafte Ajtuarskoj stepi (Juzhnyj Ural) // Vestnik Moskovskogo universiteta, serija 5 geografija. 2015. № 4. S. 95–103.
11. Khoroshev A.V., Kalmykova O.G., Dusaeva G.H. Ocenka indeksa NDVI kak istochnika informacii o nadzemnoj fitomasse v stepjah // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2023. № 3. S. 27–43. <https://doi.org/10.31857/S020596142303003X>
12. Eastman J.R., Sangermano F., Machado E.A., Rogan J., Anyamba A. Global trends in seasonality of normalized difference vegetation index (NDVI), 1982–2011 // Remote Sensing. Vol. 5. 2013. P. 4799–4818. <https://doi.org/10.3390/rs5104799>
13. Fabricante I., Oesterheld M., Paruelo J.M. Annual and seasonal variation of NDVI explained by current and previous precipitation across Northern Patagonia // Journal of Arid Environments. Vol. 73, Issue 8. 2009. P. 745–753.
14. Fedorov N.I., Zharkikh T.L., Mikhailenko O.I., Bakirova R.T., Martynenko V.B. Forecast changes in the productivity of plant communities in the Pre-Urals steppe site of Orenburg state nature reserve (Russia) in extreme drought conditions using NDVI // Nature Conservation Research. Заповедная наука 2019. 4 (Suppl.2). P. 104–110. <https://doi.org/10.24189/ncr.2019.044>
15. Gilmanov T.G., Tieszen L.L., Wylie B.K., Flanagan L.B., Frank A.B., Haferkamp M.R., Meyers T.P., Morgan J.A. Integration of CO₂ flux and remotely-sensed data for primary production and ecosystem respiration analyses in the Northern Great Plains: potential for quantitative spatial extrapolation // Global Ecology and Biogeography. 2005. Vol. 14. P. 271–292.
16. Hossain L., Li J. NDVI-based vegetation dynamics and its resistance and resilience to different intensities of climatic events // Global Ecology and Conservation. Vol. 30. 2021, e01768. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01768>
17. Jobbagy E.G., Sala O.E., Paruelo J.M. Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: a remote sensing approach // Ecology. Vol. 83(2). 2002. P. 307–319.
18. Klimavicius L., Rimkus R., Stonevicius E. Seasonality and long-term trends of NDVI values in different land use types in the eastern part of the Baltic Sea basin // Earth system changes in marginal seas / Oceanologia. Vol. 65. 2023. P. 171–181. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2022.02.007>
19. Sternberg T., Tsolmon R., Middleton M., Thomas D. Tracking desertification on the Mongolian steppe through NDVI and field-survey data // International Journal of Digital Earth. Vol. 4(1). 2011. P. 50–64. <https://doi.org/10.1080/17538940903506006>
20. Vogel A., Scherer-Lorenzen M., Weigelt A. Grassland resistance and resilience after drought depends on management intensity and species richness // PLoS One. Vol. 7(5). 2012, e36992. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0036992>
21. Wang R., Gamon J.A., Montgomery R.A., Townsend P.A., Zygielbaum A.I., Bitan K., Tilman D., Cavender-Bares J. Seasonal Variation in the NDVI–Species Richness Relationship in a Prairie Grassland Experiment (Cedar Creek) // Remote Sensing. 2016. Vol. 8, 128. <https://doi.org/10.3390/rs8020128>

УДК 556.537

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ РАЗМЫВОВ БЕРЕГОВ РЕК ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2025 г. А.А. Куракова

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия**E-mail: a.a.kurakova@mail.ru*

Поступила в редакцию 03.02.2025 г.

После доработки 07.05.2025 г.

Принята к публикации 04.06.2025 г.

Проведена оценка опасности русловых процессов (размывов берегов) на средних, больших и крупнейших равнинных реках Западной Сибири. Анализ основан на данных дистанционного зондирования и их ГИС-обработки, а также информации о степени освоенности прибрежных территорий. Интегральная оценка опасности складывалась из типа и степени опасности. Рассмотрены три типа опасности: реальная, потенциальная и отсутствие опасности, которые определялись с учетом наличия антропогенных объектов и размывов берегов. Степень опасности классифицировалась по скоростям размыва и протяженности фронта размыва берегов. Обь и Иртыш демонстрируют как высокую освоенность прибрежных территорий, так и повышенную интенсивность горизонтальных русловых деформаций, а следовательно, и степень опасности, что ведет к значительным рискам разрушения инфраструктуры. Притоки Оби и Иртыша, а также бассейны северных рек имеют преимущественно низкую степень опасности из-за слабой освоенности территорий и невысокой интенсивности горизонтальных русловых деформаций. Полученные результаты позволяют более детально оценить риски русловых процессов, что может быть использовано при планировании природоохранных и инженерных мероприятий для защиты прибрежных территорий и инфраструктуры Западной Сибири.

Ключевые слова: размывы берегов, русловые процессы, интегральная оценка, опасность

DOI: 10.31857/S0869607125030049, EDN: LTEXXW

Введение

Опасные русловые процессы, прежде всего размывы берегов, — неблагоприятные природные явления, которые приводят к разрушению или угрозе разрушения прибрежных территорий с находящимися на них населенными пунктами, объектами инфраструктуры и инженерными коммуникациями, сельскохозяйственными и лесными угодьями, тем самым создавая аварийные ситуации и неблагоприятные условия для жизни и хозяйственной деятельности людей, судоходства, а также экологического состояния речных систем.

Оценка опасности русловых процессов является одним из важных направлений в отечественном русловедении, заключающееся в разработке различных подходов и составлении классификаций и карт [1, 2, 6–9]. В первую очередь опасность проявления русловых процессов оценивалась через устойчивость русла, которая характеризуется от абсолютно устойчивых, где опасность отсутствует (0 баллов) до абсолютно неустойчивых с очень высокой степенью опасности (6 баллов) [6]. Более детально

подходы к оценке опасности русловых процессов описаны в работах [8, 9]. В них на основе в первую очередь размывов берегов (скоростей и протяженности), а также периодичности проявлений горизонтальных русловых деформаций и скорости смещения форм руслового рельефа вместе с оценкой антропогенно обусловленной опасности русловых процессов через вертикальные деформации для рек разного размера были даны баллы опасности и проведено районирование рек России по полученным результатам. В работе [7] опасность русловых процессов уже рассмотрена с точки зрения сложности для безопасного транспортного и водохозяйственного использования реки на примере Оби: через изменение по длине реки устойчивости русла, морфодинамического типа, интенсивности и закономерностей проявлений русловых деформаций.

В США и ряде англоязычных стран для оценок скоростей размыва берегов, а соответственно, опасности и их прогнозирования используют различные индексы. Наиболее распространенными являются БЕНІ (Bank Erosion Hazard Index — индекс опасности береговой эрозии), рассчитывающийся в отдельных створах реки, и NBS (Near Bank Stress — индекс воздействия касательного напряжения) для русловых форм [10–12]. В каждом из индексов назначаются классы опасности, наивысшим из которых является экстремальное развитие русловых деформаций. Изначально индексы использовались в программах для рекультивации участков рек с целью восстановления естественного баланса наносов и улучшения экологического состояния водной среды. Для расчета используется большой объем данных: морфометрия русла, тип береговых отложений растительности, уровень руслонаполняющего расхода и т.п. Все это часто требует масштабных полевых работ, но тем не менее данные индексы хорошо зарекомендовали себя при разработке региональных зависимостей скорости отступления берегов в разных природных условиях и разделении их по степени опасности.

Проведенное исследование является продолжением выполненных ранее работ в этом направлении, посвященных лесной части Обь-Иртышского бассейна [3, 5]. Но в данной работе не только была расширена география, включив в себя всю Обь, Иртыш в пределах России и их некоторые новые притоки, а также бассейны северных рек — Надыма, Пура и Таза, но и несколько переработан подход к оценке опасных русловых процессов (размывов берегов), включающий определение не только ее степени через баллы, но и типа опасности. Предлагаемый подход позволяет не только проводить оценку рек разного размера на значительном их протяжении, но и использовать легко доступные данные дистанционного зондирования Земли и различных баз данных, обрабатываемых при помощи ГИС, без проведения порой трудоемких полевых работ.

Объекты и методика

Определение опасности русловых процессов проводилось на средних, больших и крупнейших равнинных реках Западной Сибири (табл. 1)

Для исследуемых рек характерно широкое распространение размываемых берегов, обусловленное свободными условиями развития русловых деформаций за счет повсеместного распространения рыхлых, легкоразмываемых отложений, слагающих берега.

Размывы берегов были получены на основе обработки и дешифрирования космических снимков при помощи ГИС-инструментов. Подробно методика определения размывов берегов представлена в работе [3].

Таблица 1. Основные характеристики рек Западной Сибири**Table 1.** Main characteristics of rivers in Western Siberia

Река	Участок	L, км	F, тыс. км ²	W, км ³ /год	R+G, млн т/год
Обь	от слияния Бии и Катунь до г. Салехарда	3660	2 990	411	20.69
Иртыш	от гос. границы до слияния с Обью	4212	1 643	90.0	17
Надым	208-0 км	545	64	14.6	R = 0.33–0.4
Пур	395-0 км	389	112	28.4	R = 0.715
Таз	405-0 км	1401	150	33.5	R = 0.507
Томь	379-0 км	798	61.03	34.7	3.83
Чулым	400-0 км	1799	134	24.8	R = 2.14
Кеть	556-0 км	1621	94.2	17.7	н/д
Тым	311-0 км	930	47.6	7.57	н/д
Вах	771-0 км	964	76.7	16.6	н/д
Тромъеган	389-0 км	581	55.6	13.4	н/д
Аган	373-0 км	544	32.2	8.2	н/д
Лямин	277-0 км	420	14.0	3.2	н/д
Назым	91-0 км	422	15.2	2.7	н/д
Казым	444-0 км	710	35.6	9.4	н/д
Куноват	49-0 км	362	12.3	3.5	н/д
Полуй	397-0 км	635	21.0	5.4	н/д
Парабель	246-0 км	308	25.5	3.9	н/д
Васюган	470-0 км	1082	61.8	10.9	н/д
Большой Юган	294-0 км	1063	34.1	4.7	н/д
Северная Сосьва	153-0 км	754	98.3	27.0	н/д
Демьянка	311-0 км	1160	38.4	5.0	н/д
Ишим	224-0 км	2450	177	2.6	R = 0.6
Тобол	434-0 км	1591	426	25.6	1.6
Тура	659-0 км	1030	80.4	5.58	н/д
Тавда	730-0 км	719	91.0	14.6	н/д
Конда	735-0 км	1097	73.4	10.4	н/д
Хейгияха	89-0 км	243	7.9	2.2	н/д
Левая Хетта	88-0 км	357	11.3	3.3	н/д
Евояха	96-0 км	201	3.9	н/д	н/д
Русская	104-0 км	280	5.1	н/д	н/д

Все реки были разделены на равные участки (длина участка колебалась в зависимости от протяженности реки, но в основном составляла от 9.7 до 11.1 км), для которых рассчитывалась интегральная оценка опасности русловых процессов. Интегральная оценка включала в себя тип и степень опасности. Тип опасности определялся по наличию или отсутствию различных антропогенных объектов в пределах приречных территорий (ширина рассматриваемой территории слева и справа от русла варьировалась от 500 м для средних рек и до 2 км для Оби) и размывов берегов. На основе этого могло быть три варианта типа опасности: реальная (в пределах участка реки наблюдаются размывы берегов и есть площадные или линейные объекты, которые подвергаются или могут быть подвержены разрушению); потенциальная (в пределах участка реки есть размывы берегов, но нет никакой инфраструктуры, но может быть в будущем построена; либо имеют объекты, но размывов берегов не обнаружено, но которые также могут проявиться в будущем); отсутствие опасности ввиду и ограниченных условий развития русла, и какого-либо освоения территории.

Степень опасности была определена на основе характеристик размыва берегов в пределах участка реки: средняя скорость (C_{cp} , м/год), максимальная скорость (C_{max} , м/год) и относительная протяженность фронта размыва ($L_{фр}$, %). Каждая из характеристик имеет свою градацию в зависимости от степени негативного влияния (табл. 2): от 0 (отсутствие размывов) до 5 (интенсивные и протяженные размывы). Унифицированные градации разделения средних и максимальных скоростей, а также относительной протяженности размыва берегов на равные интервалы для разных по размеру рек Западной Сибири были проведены на основе полученных данных о размывах их берегов. Дополнительно было учтено, что в большинстве случаев скорости размыва берегов средних рек относительно невелики, в то время как на больших и крупнейших реках исследуемой территории они могут быть достаточно высоки и даже иметь экстремальные значения, в то же время в раздвоенном русле Оби рукава могут быть по водности и интенсивности проявлений русловых деформаций сопоставимы со одной из ее притоков. Все это позволяет сопоставлять их между собой. Нулевой балл присваивался тем участкам, где скорости размыва берегов отсутствуют либо в силу геолого-геоморфологических условий (например, врезанное русло), либо не определяются ввиду пространственного (от 1.8 до 30 м) и временного разрешения (от 30 до 50 лет), а следовательно, они настолько незначительны, что не могут быть выявлены. От 1 до 4 баллов присваивалось при последовательном возрастании средних и максимальных скоростей, а также относительной протяженности размыва берегов. Максимальный балл (5) обычно присваивался тем участкам, где проявлялись экстремальные размывы берегов или значительные по протяженности, как, например, в районе г. Колпашево или с. Сытомино на средней Оби, или на излуцинах Иртыша выше и ниже впадения р. Конды.

Полученные по каждой характеристике баллы складываются, после чего в зависимости от их итоговой суммы участку присваивается степень опасности: до 3 баллов — очень низкая, от 4 до 6 баллов — низкая, от 7 до 9 баллов — умеренная, от 10 до 12 баллов — высокая, от 13 до 15 баллов — очень высокая.

Для определения степени освоенности приречных территорий выделялись следующие категории антропогенных объектов на основе данных OpenStreetMap: линейный объекты (ж/д дороги, ЛЭП, трубопроводы и автомобильные дороги) и площадные объекты (ООПТ, населенные пункты, аэропорты и территории землепользования, к которым относятся земли как с/х назначения, промышленные территории, зоны отдыха и т.д.). Данные представлены в табл. 3.

Представленный подход к интегральной оценке опасности русловых процессов (размывов берегов) с одной стороны отличается от уже существующих тем,

Таблица 2. Характеристики степени опасности русловых процессов на реках Западной Сибири**Table 2.** Characteristics of the level of dangerous channel processes in the rivers of Western Siberia

Балл	Характеристика размыва берегов		
	$C_{\text{ср}}$, м/ГОД	$C_{\text{макс}}$, м/ГОД	$L_{\text{фр}}$, %
0	<1	<1	0
1	1–2	1–4	0–10
2	2–3	4–7	10–20
3	3–4	7–10	20–30
4	4–5	10–13	30–40
5	>5	>13	>40

Таблица 3. Освоенность приречных территорий Западной Сибири**Table 3.** Economic facilities within the riverine territories of Western Siberia

№	Категория	Протяженность, км / площадь, км ²
1	Ж/д дороги	464 км
2	ЛЭП	1818 км
3	Трубопроводы	798 км
4	Автомобильные дороги	18668 км
5	ООПТ	605 км ²
6	Аэропорты	2 км ²
7	Населенные пункты	1148 км ²
8	Территории землепользования	550 км ²

что наравне со степенью опасности предлагает включать и ее тип, в то же время оценка опасности, основанная только на скорости и протяженности размыва берегов, обусловлена относительной простотой получаемых данных характеристик и их дальнейшей обработкой и расчетов.

Результаты

Анализ освоенности приречных территорий рек Западной Сибири показал, что из линейных объектов в пределах приречных пространств самыми протяженными являются автомобильные дороги (почти 19 тыс. км), им значительно уступают по протяженности ЛЭП (почти 2 тыс км), трубопроводы (около 800 км), меньше всего распространены ж/д дороги (менее 500 км). Из площадных объектов больше всего распространены населенные пункты (более 1100 км²), на втором месте — ООПТ (более 600 км²) и земли различных категорий (более 500 км²), реже встречаются территории, относящиеся к аэропортам (2 км²). Наибольшая плотность рассматриваемых объектов хозяйственной деятельности человека приурочена к Оби (особенно выше Новосибирского гидроузла, а также ее широтный участок) и Иртышу, а также некоторым их притокам (Томь, Васюган, реки бассейна Тобола, Конда, Тромъеган, Аган, Полуй). К северу освоенность территории значительно снижается.

Для равнинных рек Западной Сибири средние скорости размыва берегов колеблются в широких пределах: от 1 м/год на средних реках до 7 м/год и более на крупнейших (Обь и Иртыш) и в низовьях некоторых больших рек (Томь, Чулым, Тобол и т.д.) [4].

Совокупный анализ проявлений горизонтальных русловых деформаций и освоённости территории по вышеприведенным подходам позволил получить данные об опасности русловых процессов на реках Западной Сибири (рис. 1).

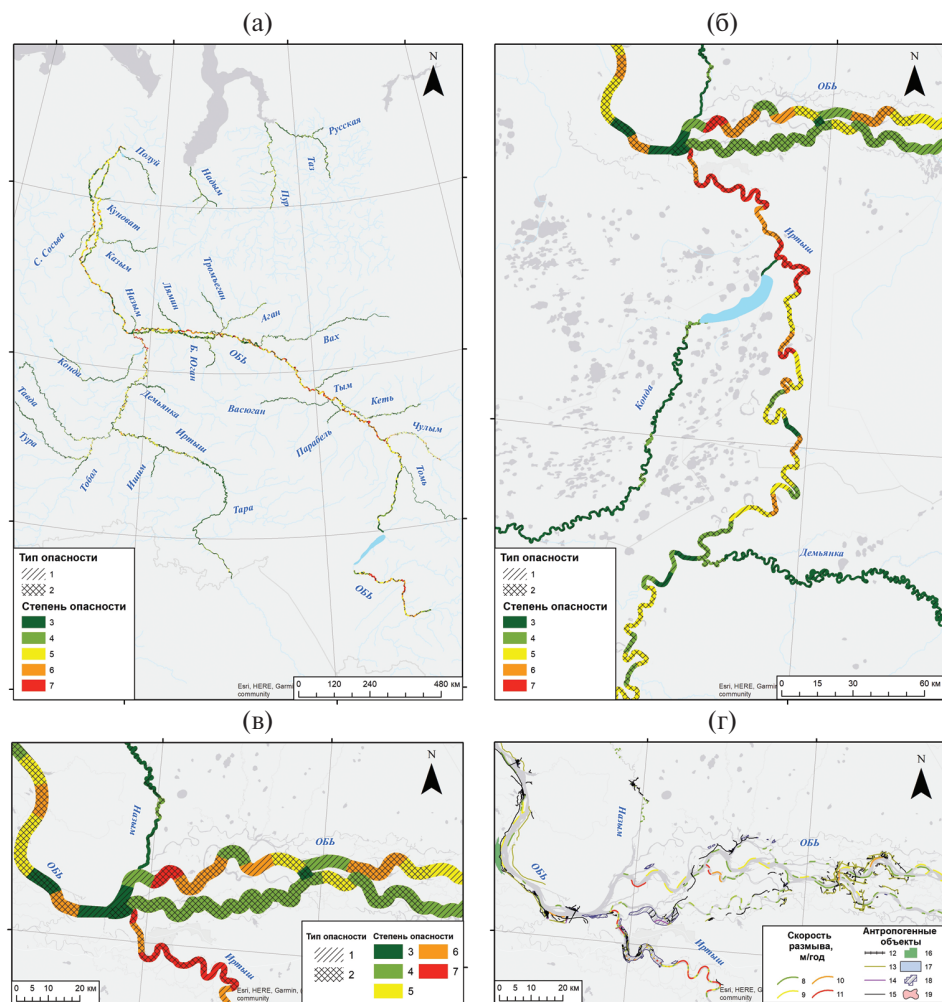


Рис. 1. Интегральная оценка опасности русловых процессов на реках Западной Сибири: а — вся территория, б, в, г — фрагменты. Тип опасности: 1 — потенциальная, 2 — реальная; степень опасности: 3 — очень низкая, 4 — низкая, 5 — умеренная, 6 — высокая, 7 — очень высокая; скорость размыва берегов: 8 — 1–3 м/год, 9 — 3–5 м/год, 10 — 5–7 м/год, 11 — > 7 м/год; антропогенные объекты: 12 — ж/д дороги, 13 — ЛЭП, 14 — трубопроводы, 15 — автодороги, 16 — ООПТ, 17 — аэропорты, 18 — населенные пункты, 19 — территории землепользования.

Fig. 1. Integral hazard assessment of channel processes in the rivers of Western Siberia: а — the whole territory, б, в, г — the fragment. Type of hazard: 1 — potential, 2 — real; degree of hazard: 3 — very low, 4 — low, 5 — moderate, 6 — high, 7 — very high; bank erosion rate: 8 — 1–3 m/year, 9 — 3–5 m/year, 10 — 5–7 m/year, 11 — > 7 m/year; anthropogenic objects: 12 — railways, 13 — power lines, 14 — pipelines, 15 — motorways, 16 — protected areas, 17 — airports, 18 — settlements, 19 — land use territories.

Обсуждение

Анализ типа опасности русловых процессов на реках Западной Сибири показал, что на крупнейших реках — Обь и Иртыш — преобладает реальная опасность (69 и 61%) (рис. 2а, б). При этом на Оби почти треть русла характеризуется потенциальной опасностью, тогда как для Иртыша, наоборот, 26% его протяженности безопасны в отношении проявления опасных русловых процессов. На больших реках, таких как Надым, Пур и Таз, широко распространена потенциальная опасность (от 66 до 79%) (рис. 2в), как и на средних реках, например на реках Обь-Иртышского междуречья, имеющих от 50 до 74% своей протяженности с данным типом опасности (рис. 2г), а иногда и более (до 90%). Реальная опасность на средних и больших реках обычно проявляется не более чем на трети их длины.

Степень опасности также различается на разных реках Западной Сибири. На Оби встречается весь диапазон опасности: от очень низкой до очень высокой (рис. 3а). При этом более трети русла характеризуется умеренной степенью опасности. На Иртыше также степень опасности изменяется в широких пределах, но большая часть приходится на очень низкую и низкую степень опасности (более 60%) (рис. 2б). На больших и средних реках бассейна также чаще всего встречается очень низкая и низкая степень опасности (иногда более 90%) (рис. 2в, г), только на больших реках, например Надым, Пур, Таз, Чулым, Тобол, наблюдаются участки с умеренной и даже порой высокой степенью опасности.

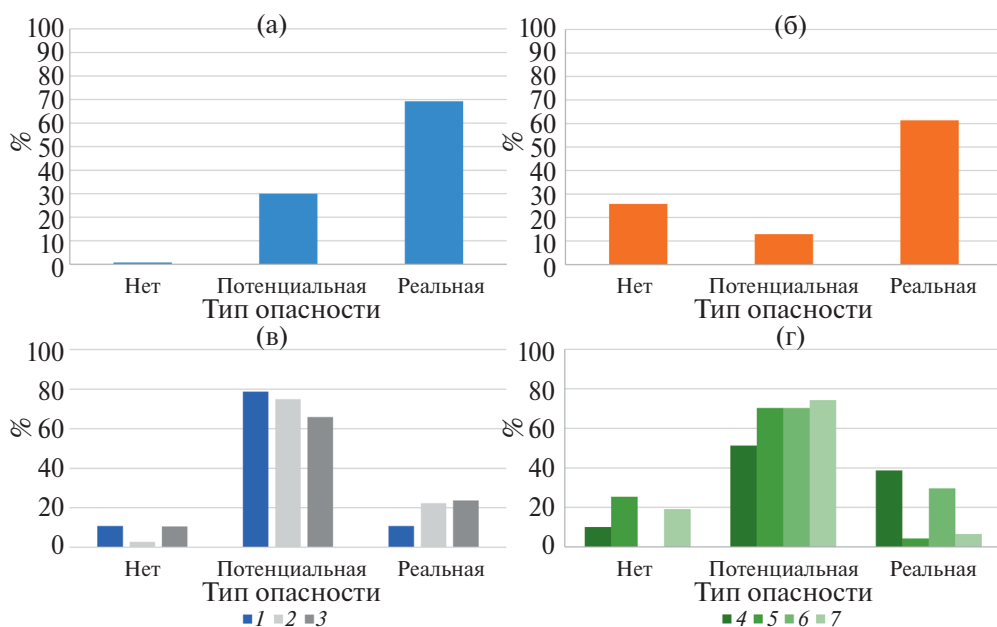


Рис. 2. Распределение типа опасности русловых процессов на реках Западной Сибири: а — Обь, б — Иртыш, в — северные реки (1 — Надым, 2 — Пур, 3 — Таз), г — средние реки Обь-Иртышского междуречья (4 — Большой Юган, 5 — Васюган, 6 — Парабель, 7 — Демьянка).

Fig. 2. Distribution of hazard types of channel processes in the rivers of Western Siberia: а — Ob, б — Irtysh, в — northern rivers (1 — Nadym, 2 — Pur, 3 — Taz), г — middle rivers of the Ob-Irtysh interfluvium (4 — Bolshoy Yugan, 5 — Vasyugan, 6 — Parabel, 7 — Demyanka).

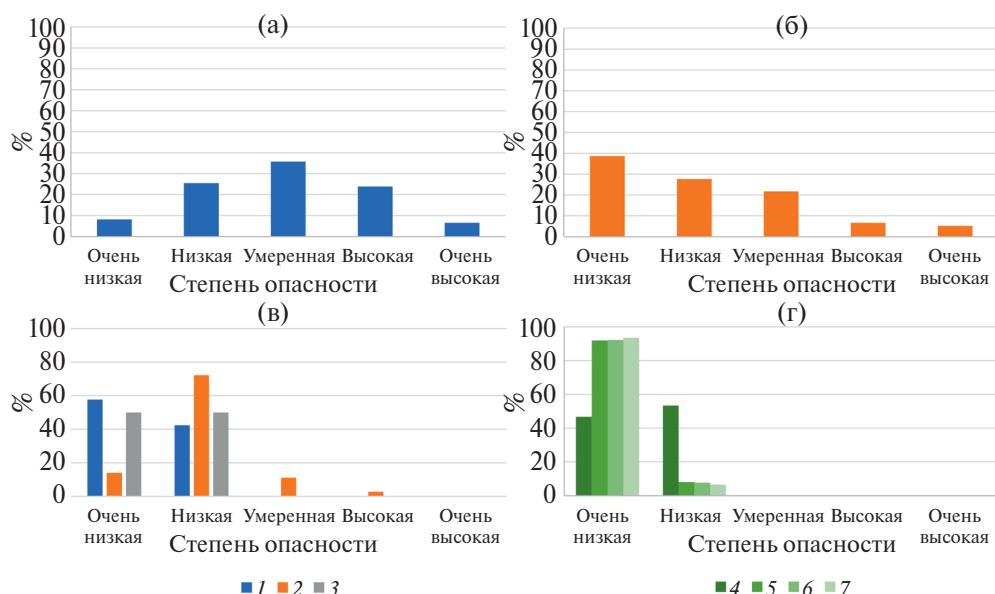


Рис. 3. Распределение степени опасности русловых процессов на реках Западной Сибири: а — Обь, б — Иртыш, в — северные реки (1 — Надым, 2 — Пур, 3 — Таз), г — средние реки Обь-Иртышского междуречья (4 — Большой Юган, 5 — Васюган, 6 — Парабель, 7 — Демьянка).

Fig. 3. Distribution of the degree of hazard of channel processes in the rivers of Western Siberia: а — Ob, б — Irtysh, в — northern rivers (1 — Nadym, 2 — Pur, 3 — Taz), г — middle rivers of the Ob-Irtysh interfluvium (4 — Bolshoy Yugan, 5 — Vasyugan, 6 — Parabel, 7 — Demyanka).

Широкое распространение высоких скоростей размыва берегов (максимальные скорости могут достигать более 20 м/год) на Оби и относительная неустойчивость ее русла ($L = 5-10$), а также достаточно высокая освоенность ее прибрежных территорий обуславливают результаты, полученные в ходе интегральной оценки опасности: более 60% русла Оби имеют реальную опасность со степенью умеренная и выше. При анализе изменения типа и степени опасности русловых процессов по длине Оби нельзя выделить какой-либо направленный тренд. Это объясняется, с одной стороны, постоянными изменениями условий формирования русла: геолого-геоморфологические условия, взаимодействие с коренными берегами, ширина поймы и рассредоточения стока по ней, а также рукавам разветвлений и раздвоенного русла в среднем и нижнем течении, постоянная смена морфодинамического типа Оби и параметров ее форм русла и другие факторы, в том числе и антропогенные, такие как создание Новосибирского водохранилища. Отмечается некоторое снижение степени опасности в рукавах раздвоенного русла средней и нижней Оби за счет рассредоточения стока и резкого расширения поймы, а также при подходе либо рукавов, либо основного русла Оби к коренным берегам. Для нижнего течения также отмечается, ввиду меньшей освоенности, увеличение потенциальной опасности по сравнению со средней и верхней Обью, где преобладает реальная.

Для Иртыша, несмотря на то что более половины (61%) протяженности его русла характеризуется реальной опасностью ввиду хорошей заселенности берегов (против 26%, где опасность вовсе отсутствует), только больше трети (почти 34%) длины име-

ет степень опасности умеренную и выше. Это также объясняется в первую очередь природными условиями формирования русла, влияющими на распространение размывов берегов и их интенсивность. В пределах России среднее и нижнее течение Иртыша характеризуется постоянным изменением геолого-геоморфологических условий (расширение и сужение дна речной долины, периодическое влияние коренных берегов), а также вначале слабым нарастанием водоносности в пределах степи и лесостепи (до впадения р. Тары) и ее более интенсивным ростом ниже по течению в пределах лесной зоны (в том числе за счет впадения таких крупных притоков, как Тобол и Конда). Поэтому, несмотря на некоторое варьирование интенсивности горизонтальных русловых деформаций, в целом прослеживается общий тренд на увеличение средних и максимальных скоростей размыва, а вслед за этим и степени опасности к устью: высокая опасность преимущественно, а очень высокая только встречаются в нижнем течении. Именно здесь ширина поймы достигает максимальных значений, влияние коренных берегов минимально, а Иртыша за счет впадения притоков переходит в ранг крупнейших рек.

Притоки Оби, Иртыша, а также северные реки — Надым, Пур и Таз — ввиду меньшей освоенности их бассейнов характеризуются преимущественно потенциальной опасностью, исключение составляет рассмотренный участок Тобола (от устья Исети до устья), где почти 70% длины — реальная опасность. Отмечается также, что различие в долях типов опасности между северными и южными реками отсутствует. Сниженные по сравнению с крупнейшими реками скорости размыва берегов, которые редко превышают 3 м/год, обуславливают преобладание очень низкой и низкой степени опасности. Анализ изменения степени опасности по длине рек показывает две закономерности. Для одних рек (Кеть, Большой Юган, Казым, Тавда, Тура) характерно на фоне увеличения интенсивности горизонтальных русловых деформаций к устью возрастание и степени опасности русловых процессов в том же направлении. Другие — Чулым, Тобол, Пур, Аган, Таз — из-за проявления по их длине интенсивных размывов берегов характеризуются локальным повышением степени опасности.

Заключение

Анализ опасных русловых процессов (размывов берегов) на средних, больших и крупнейших равнинных реках Западной Сибири показал их изменчивость по территории и значительное влияние на прибрежные территории. Результаты интегральной оценки степени опасности свидетельствуют о существенных различиях в развитии опасных русловых процессов на разных реках. Обь и Иртыш демонстрируют как высокую освоенность прибрежных территорий, так и повышенную интенсивность горизонтальных русловых деформаций, а следовательно, и степень опасности, что ведет к значительным рискам разрушения инфраструктуры. В то же время северные реки и большинство притоков Оби и Иртыша характеризуются более низкой степенью опасности вследствие меньшей освоенности и сниженных скоростей размыва берегов. На крупнейших реках, таких как Обь и Иртыш, преобладает реальная опасность, тогда как для средних и больших рек характерна преимущественно потенциальная опасность. Проведенная оценка опасности русловых процессов и полученные результаты показывают возможность ее использования, а полученные данные могут быть использованы для оценки рисков и планирования мероприятий по защите берегов и инфраструктуры в пределах рек Западной Сибири.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда № 23-77-01006.

Список литературы

1. Беркович К.М., Чалов Р.С., Чернов А.В. Экологическое русловедение // М.: ГЕОС, 2000. 332 с.
2. Завадский А.С., Чалов С.Р., Чернов А.В., Головлев П.П., Морейдо В.М., Белякова П.А. Морфодинамика русел и баланс наносов рек бассейна Селенги (Монголия—Россия) // Эрозия почв и русловых процессов. М.: Географ. ф-т МГУ, 2019. Вып. 21. С. 149—170.
3. Куракова А.А. Гидролого-морфодинамический анализ русел и опасные проявления русловых процессов на равнинных реках Обь-Иртышского бассейна (лесная зона): автореф. дис. ... кан. геогр. наук. М, 2022. 28 с.
4. Куракова А. А. Ландшафтно-гидрологическое районирование равнинной территории Западной Сибири и его применение для анализа размывов берегов рек // География и природные ресурсы. 2024. № 4. С. 99—110. <https://doi.org/10.15372/GIPR20240410>
5. Куракова А. А. Оценка опасных проявлений горизонтальных русловых деформаций на реках Обь-Иртышского бассейна // Водные ресурсы. 2023. Т. 50, № 6. С. 686—700. <https://doi.org/10.31857/S0321059623600254>
6. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 3. Антропогенные воздействия, опасные проявления и управление русловыми процессами // М.: КРАСАНД, 2019. 640 с.
7. Чалов Р.С., Рулева С.Н., Камышев А.А., Беркович К.М., Завадский А.С., Михайлова Н.М. Верхняя и средняя Обь: русловые процессы и оценка условий управления ими // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Географ. ф-т МГУ, 2018. Вып. 20. С. 149—195.
8. Чалов Р.С., Чернов А.В., Беркович К.М., Михайлова Н.М. География опасных проявлений русловых процессов на реках России // Изв. РГО. 2017. Т. 149. № 4. С. 13—32.
9. Чалов Р.С., Чернов А.В., Михайлова Н.М. Опасность русловых процессов на реках России: критерии оценки, картографирование, региональный анализ // Географический вестник. 2021. № 1 (56). С. 53—67. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2021-1-53-67>
10. Rosgen D.L. A practical method of computing streambank erosion rate // Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference. 2001. Vol. 2. P. 9—15.
11. Sapkota S., Tamrakar N.K. Bank erosion and lateral instability hazard status of Kodku Khola, southeast Kathmandu, central Nepal // Journal of Nepal Geological Society. 2016. № 50(1). P. 95—103. <https://doi.org/10.3126/jngs.v50i1.22869>
12. Simpson A., Turner I., Brantley E., Helms B. Bank erosion hazard index as an indicator of near-bank aquatic habitat and community structure in a southeastern Piedmont stream // Ecological Indicators. 2014. Vol. 43. P. 19—28. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.02.002>

Methodology of assessment of dangerous channel processes in rivers of Western Siberia**A.A. Kurakova***Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia**E-mail: a.a.kurakova@mail.ru*

Received 03.02.2025

Revised 07.05.2025

Accepted 04.06.2025

An integral assessment of the hazard of channel processes on medium, large and largest lowland rivers of Western Siberia has been carried out. The analysis is based on remote sensing data and their GIS processing, as well as information on the level of development of coastal areas. The integral hazard assessment was based on the type and degree of hazard. Three types of hazard were considered: real, potential and no hazard, which were defined taking into account the presence of anthropogenic objects and bank erosion. The degree of hazard was classified according to scour rates and the length of the bank failure front. The Ob and Irtysh Rivers show both a high level of coastal development and an increased intensity of horizontal channel deformation, and hence the level of hazard, leading to a significant risk of infrastructure failure. The Ob and Irtysh tributaries, as well as the northern river basins, have a predominantly low hazard level due to low development of the areas and low intensity of horizontal channel deformations. The results obtained allow for a more detailed assessment of the risks of channel processes, which can be used in the planning of environmental and engineering measures for the protection of the coastal territories and infrastructure of Western Siberia.

Keywords: bank erosion, fluvial processes, integral assessment, hazard

References

1. Berkovich K.M., Chalov R.S., Chernov A.V. Ecological channel science // M.: GEOS, 2000. 332 p. (in Russian)
2. Zavadsky A.S., Chalov S.R., Chernov A.V., Golovlev P.P., Moreido V.M. Morphodynamics of riverbeds and sediment balance of rivers of the Selenga basin (Mongolia-Russia) // Soil erosion and channel processes. Moscow: Geograf. faculty of Moscow State University, 2019. Vy. 21. P. 149–170. (in Russian)
3. Kurakova A.A. Hydrological and morphodynamic analysis of riverbeds and dangerous processes of fluvial processes in the wide floodplain rivers of the Ob-Irtysh basin (forest zone): PhD thesis in Geography, Moscow, 2022, 28 p. (In Russian).
4. Kurakova A.A. Landscape-hydrological zoning of the flat areas of Western Siberia and its application in the analysis of river bank erosion // Geography and Natural Resources. 2024. Vol. 45, no. 4. P. 397–409. <https://doi.org/10.1134/S1875372824700720>
5. Kurakova A.A. Assessing hazardous manifestations of horizontal channel deformations in rivers of the Ob–Irtysh basin. Water Resources. 2024. Vol. 50. P. 828–84. <https://doi.org/10.1134/S0097807823700124>
6. Chalov R.S. Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. T. 3. Anthropogenic impacts, hazardous manifestations and management of channel processes // M.: KRASAND, 2019. 640 p. (in Russian)
7. Chalov R.S., Rulyova S.N., Kamyshev A.A., Berkovich K.M., Zavadsky A.S., Mikhailova N.M. Upper and Middle Ob: channel processes and assessment of their management conditions. Soil erosion and channel processes. Moscow: Geograf. faculty of Moscow State University, 2018. Vy. 20. P. 149–195. (in Russian)

8. Chalov R.S., Chernov A.V., Berkovich K.M., Mikhailova N.M. Geography of hazardous channel processes on Russian rivers. *Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2017. Vol. 149, no. 4. P. 13–33. (in Russian)
9. Chalov R.S., Chernov A.V., Mikhailova N.M. Danger of channel processes on the rivers of Russia: assessment criteria, mapping, regional analysis. // *Geographical bulletin*. 2021. No. 1 (56). P. 53–67. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2021-1-53-67>
10. Rosgen D.L. A practical method of computing streambank erosion rate // *Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference*. 2001. Vol. 2. P. 9–15.
11. Sapkota S., Tamrakar N. K. Bank erosion and lateral instability hazard status of Kodku Khola, southeast Kathmandu, central Nepal // *Journal of Nepal Geological Society*. 2016. № 50(1). P. 95–103. <https://doi.org/10.3126/jngs.v50i1.22869>
12. Simpson A., Turner I., Brantley E., Helms B. Bank erosion hazard index as an indicator of near-bank aquatic habitat and community structure in a southeastern Piedmont stream // *Ecological Indicators*. 2014. Vol. 43. P. 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.02.002>

УДК 556

МОРФОДИНАМИКА РУСЛА Р. СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ, ЕГО ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ ТРАНСФОРМАЦИИ В XX–НАЧАЛЕ XXI В.

© 2025 г. Р.С. Чалов^{1,2}, Г.Б. Голубцов^{1,2}, А.А. Куракова¹,
В.А. Семаков¹, Е.Д. Панченко^{1,3,*}

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

²Российский университет транспорта, Москва, Россия

³Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

*E-mail: panchenko.zhe@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.03.2025 г.

После доработки 30.05.2025 г.

Принята к публикации 09.06.2025 г.

В статье показаны основные направления и условия трансформации русла Северной Двины (от слияния с р. Вычегдой), происходящие под влиянием почти вековых техногенных воздействий, русловых деформаций и гидроклиматических изменений, определен вклад каждого из факторов и их взаимосвязь. Исследование основано на анализе данных полевых измерений (расходов воды в разветвлениях, скоростных полей потока, мутности воды и состава руслообразующих наносов), выполненных на спаде половодья в 2024 г., а также карт реки, зафиксировавших состояние русла в различные временные этапы начиная с 1960-х гг., космических снимков и планов перекатов и перекатных участков. Показано, что переформирования русла Северной Двины происходят в широкопойменном, адаптированном русле и на тех участках врезанного, где оно сформировано в моренных или пермско-триасовых отложениях. Основным фактором трансформации является антропогенное воздействие, а именно проведение дноуглубительных и выправительных работ для обеспечения необходимых для водного пути габаритов (в первую очередь, глубины русла). Из-за объемов выполненных работ их влияние значительно превосходит роль изменений водного стока, проявляющихся для Северной Двины в повышении годового стока при снижении водности половодья и повышении ее в межень. В условиях широкопойменного и адаптированного русла на большинстве участков русла выполнение дноуглубительных и выправительных работ привело к усложнению разветвлений. Однако возведение дамб, в том числе перекрывающих рукава, наоборот, привело к упрощению разветвленности русла на некоторых участках как врезанного, так и широкопойменного русла.

Ключевые слова: русловые процессы, дноуглубление, выправительные работы, широкопойменное, адаптированное, врезанное русло, разветвления

DOI: 10.31857/S0869607125030052, EDN: LTGUUZ

Введение

Северная Двина — одна из немногих рек, русловой режим которых изучен достаточно хорошо и многие теоретические положения русловедения были получены на основе их исследований. Это отражено в многочисленных статьях, опубликованных со 2-й половины XX в. до настоящего времени, посвященные анализу

условий и закономерностям проявления русловых процессов, в том числе имеющих прикладную направленность [1, 6, 10, 13, 14, 15, 16 и многие другие], и обобщающей многолетние исследования монографии [18], содержащей детальную характеристику морфологии и переформирований русла и основанную на ней оценку опыта управления русловыми процессами при освоении реки как водного пути. С другой стороны, Северная Двина — река, сохранившаяся в естественном состоянии, т.е. на ней отсутствуют гидроузлы с водохранилищами и не проводится крупное гидротехническое строительство. Однако русло реки уже с конца XIX в. и особенно во второй половине XX в. подвергалось на большей части своей длины массовому техногенному воздействию — на реке проводились выправительные и дноуглубительные работы для обеспечения нормальных условий судоходства. Опираясь на специальные изыскания или результаты научных исследований, эти работы обеспечили не только техническую эффективность выправления русла, но и гидроэкологическую безопасность, поскольку при их выполнении максимально использовалась руслоформирующая деятельность самого речного потока. Таков ведущий принцип выправления русел рек как водных путей, заложенный еще основоположниками современного учения о русловых процессах В.М. Лохтиным [9], Н.С. Лелявским [8] и получивший окончательное обоснование в трудах Н.И. Маккавеева [11, 17]. В результате, несмотря на многочисленность таких воздействий, русла рек и сами реки, в том числе Северная Двина, на которых эти принципы соблюдались, сохранили свой естественный облик.

Однако в исследованиях руслового режима Северной Двины оставались в основном “за скобками” происходящие трансформации русла, обусловленные проведением выправительных мероприятий. Техногенные воздействия рассматриваются лишь в контексте их соответствия русловому режиму реки, но не дается их оценка как фактора возможных изменений морфодинамики русла и, соответственно, последствий выполнения. Более того, антропогенно обусловленные изменения осуществлялись на фоне происходящих естественных деформаций русла, его саморазвития, с одной стороны, и накладывающихся на них со второй половины (а возможно, и раньше?) XX в. изменения водности реки (годового стока и его внутригодового распределения) как следствия потепления климата.

С 1990-х г. на Северной Двине прекратились выправительные работы, а дноуглубление (землечерпание) сильно сократилось и стало сводиться к эксплуатационному на отдельных перекатах для поддержания на них в низкую межень гарантированных глубин (1.6 м от устья Вычегды до п. Двинской Березник ниже устья р. Ваги, 1.7 м — ниже по течению). Это неизбежно должно сказаться в проявлении тенденции к постепенному восстановлению (релаксации) исходного (до техногенных воздействий) состояния русла, если происшедшие под их влиянием изменения не получили необратимый характер.

Трансформации русла (естественные и техногенные) характерны для многих судоходных рек и в разной степени и по-разному на них проявляются [2]. Северная Двина в этом отношении является рекой, на которой и техногенные особенно, и естественные изменения проявились в наиболее полной мере, первые — из-за их массовости по длине реки, вторые — вследствие очень слабой устойчивости русла. Поэтому задача настоящей статьи — на примере русловых процессов на Северной Двине (от слияния с р. Вычегдой) показать основные направления и условия трансформации русла, происходящие в результате почти вековых техногенных воздействий, постоянно происходящим деформациям и гидроклиматическим изменениям, выявить роль каждого из них и соотношения между ними.

Объект и методы исследований

Северная Двина — крупнейшая река на севере Европейской части России, начинающаяся от слияния рек Сухоны и Юга и при слиянии с р. Вычегдой увеличивающая водность более чем в 2 раза (среднегодовой расход воды по г.п. Великий Устюг $Q_{\text{ср}} = 750 \text{ м}^3/\text{с}$, по г.п. Федяково на Вычегде в 70 км от устья $Q_{\text{ср}} = 1030 \text{ м}^3/\text{с}$; в среднем течении (г.п. Абрамково $Q_{\text{ср}} = 1950 \text{ м}^3/\text{с}$, после впадения р. Ваги (г.п. Звоз) — $Q_{\text{ср}} = 2600 \text{ м}^3/\text{с}$, после слияния с р. Пинегой в устьевой области — $Q_{\text{ср}} = 3960 \text{ м}^3/\text{с}$. Между устьями Вычегды и Ваги русло сначала широкопойменное (135 км) до с. Ягрыш, формирующееся в свободных условиях развития русловых деформаций, а затем адаптированное или врезанное в моренные валунные суглинки, но на всем протяжении преимущественно разветвленное, слабо устойчивое. При этом здесь практически повсеместно до 1990 г. производились выправительные и дноуглубительные работы, и сейчас разрабатываются на отдельных перекатах эксплуатационные прорезы.

Ниже устья р. Ваги русло врезанное, большей частью протекающее в скальных грунтах, среди известняков и гипсов, устойчивое, неразветвленное, относительно прямолинейное или образующее врезанные излучины, и лишь в отдельных местных расширениях днища долины — адаптированное, разветвленное и расширенное в 1.5–2 раза по сравнению с участками выше и ниже по течению, слабо устойчивое и только здесь требующее проведения выправительных работ. Ниже п. Брин-Навлок русло сужается до 500–700 м, образуя врезанные пологие, иногда крутые сегментные излучины. Ниже слияния с р. Пинегой и до г. Архангельска (до дельты) — устьевая область реки, характеризующаяся устойчивым, глубоким, хотя и образующим сложное структурно предопределенное раздвоенное русло, находится под влиянием приливов и сгонно-нагонных колебаний уровня.

Первые русловые исследования на Северной Двине были выполнены в 1957–1958 гг. под руководством и при участии Н.И. Маккавеева [13] и впоследствии неоднократно, но с перерывами в десятки лет, повторялись. Последние натурные исследования с измерениями расходов воды в разветвлениях, скоростных полей, мутности воды и состава руслообразующих наносов состоялись в мае 2024 г. Одновременно при всех работах производился анализ карт реки (ранее они назывались лоцманскими), зафиксировавших состояние русла в различные временные этапы, космических снимков и планов перекатов и перекатных участков, регулярно получаемых изыскательскими партиями на водных путях, предоставленных (как и лоцманские карты) в распоряжение авторов Администрацией Двинско-Печорского бассейна внутренних водных путей (для исследований 2024 г. — по съемкам с 2019 г.).

Результаты и обсуждение

Морфодинамические типы русла и их распространение (современное состояние)

По распространению типов русла 600-километровый участок Северной Двины от г. Котласа до г. Архангельска разделяется на семь основных участков, различающихся по геолого-геоморфологическим условиям их формирования, неодинаковые по своей длине (от 29 до 213 км), различающиеся по развитию в их пределах морфодинамических типов русла, широким разнообразием форм русла одного и того же типа, плесовым или перекатным характером, сложностью русловых переформирований (рис. 1, табл. 1).

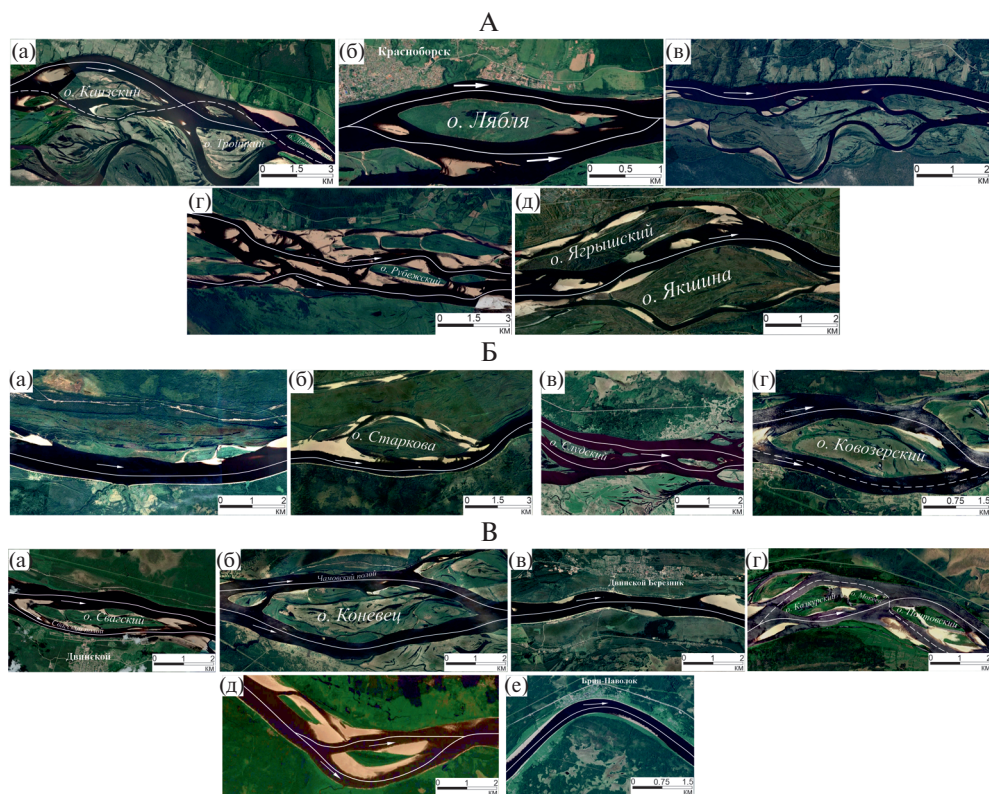


Рис. 1. Основные морфодинамические типы русла Северной Двины. А — широкопойменные: а — сопряженные разветвления (Канзкое-Лобановское), б — одиночное разветвление (Красноборское), в — прямолинейное неразветвленное русло (Пермогорское), г — параллельно-рукавные разветвления (Паячные), д — двусторонние и вынужденная излучина (Ягрышский участок); Б — адаптированные: а — прямолинейное неразветвленное русло (Коповский участок), б — одностороннее разветвление (Старковское), в — параллельно-рукавные разветвления (Слудские), г — одиночное разветвление (Ковозерское); В — врезанные: а — односторонние разветвления (Свагские), б — параллельно-рукавное разветвление (Концевское), в — прямолинейное неразветвленное русло (Двинской Березник), г — сопряженные разветвления (Калкурское-Почтовское), д — врезанная излучина с одиночным разветвлением (Шеньга), е — врезанные излучины (Брин-Наволоч).

Fig. 1. Main morphodynamic channel types of the Northern Dvina River. “A” — wide floodplain: a — conjugated branches (Kanzkoe-Lobanovskoe), b — single branch (Krasnoborskoe), c — straight and undivided channel (Permogorskoe), d — parallel-sleeve branches (Payachnye), e — bilateral branches and forced bend (Yagryshchy section), B — adapted: a — straight and undivided channel (Kopovskiy section), b — unilateral branch (Starkovskoe), c — parallel-sleeve branches (Sludskie), d — single branch (Kovozerkoye); C — incised: a — unilateral branches (Svagskie), b — parallel-sleeve branch (Konecgorskoe), c — straight and undivided channel (Dvinskoiy Bereznyk), d — conjugated branches (Kalkurskoye-Pochtovskoye), e — incised bend with a single branch (Shenga), f — incised bends (Brin-Navolok)

На первом участке длиной 135 км (610–475 км) русло широкопойменное (ширина поймы B_{Π} повсеместно намного больше 2–3 ширины русла b_p , постепенно сужаясь к концу участка), на большей части своего протяжения разветвленное при преимущественном его расположении вдоль или вблизи левого коренного берега. Непосредственно ниже слияния с Вычегдой русло объединенной реки подходит к левому коренному берегу, образуя вынужденную излучину с осередковым разветвлением

Таблица 1. Морфологически однородные участки и морфодинамические типы русла
Table 1. Morphologically homogeneous sections and morphodynamic types of the channel

№	Участок		Длина, км	Тип русла
	км от устья	название		
<i>Широкопойменное разветвленное русло</i>				
1	610-606.5	Усть-Вычегодский	3.5	Вынужденная излучина
2	606—596	Усть-Курский	10	Пойменно-русловое разветвление (о-ва Марковский и б/н)
3	596—588	Туровецкий	7.5	Прямолинейное неразветвленное русло
4	588-574.5	Канзско-Лобановский	14	Сопряженные разветвления
5	574.5-567	Телеговский	7	Двусторонние разветвления
6	567-559.5	Усть-Евдский	8	Прямолинейное неразветвленное русло
7	559.5-552	Красноборский	7.5	Одиночное разветвление (о. Лябля)
8	552—534	Пермогорье	18	Прямолинейное неразветвленное русло с единичными правобережными разветвлениями
9	534—524	Шиловский	9.5	Односторонние и одиночное разветвления
10	524-518	Толоконский	6.5	Вписанная излучина
11	518—511	Ботовский	7	Разветленно-извилистое русло (о-ва Мал. Ботовский, Бол. Ботовский) — спрямленная излучина
12	511—501	Ракульский	10	Пологая вписанная излучина
13	501-481.5	Паячный-Рубежский	19.5	Параллельно-рукавное русло (о-ва Паячный, Голодай, Рубежский, Овечий и др.) с односторонними разветвлениями (о. Авнюгский и др.)
14	481.5-475	Ягрышский	6,5	Прибрежные двусторонние разветвления (о-ва Ягрышский, Якшина) и вынужденная излучина основного рукава
<i>Врезанное русло</i>				
15	475—453	Свагско-Верхнотоймский	23	Правобережные односторонние разветвления (о-ва Ильинский, Шоромский, Свагский, Лобановский, Варзенский, Мелетеевский и др.
16	453—438	—	15	Большая врезанная излучина
<i>Адаптированное русло</i>				
17	438—422	—	16	Прямолинейное неразветвленное русло
18	422-417.5	Ромбовский	4.5	Одиночное разветвление (о. Ромбовский)

Таблица 1. Продолжение

№	Участок		Длина, км	Тип русла
	км от устья	название		
19	417.5–413	Коповский	4.5	Прямолинейное неразветвленное русло
20	413–400	Старковский	13	Одностороннее разветвление (о. Старкова)
21	400–395	Пальниковский	5	Прямолинейное неразветвленное русло
22	395–370	Слудский-Липовецкий-Селецкий	25	Параллельно-рукавное русло (о-ва Слудский, Средний Песок) с односторонними разветвлениями (о-ва Кодимский, Телячий)
23	370–364	Троицкий плес	6	Прямолинейное неразветвленное русло

Врезанное русло

24	364–349	Тулгасский	15	Параллельно-рукавное русло (о-ва Тулгасский, Лоза, Окулков)
25	349–344	Рочегда	5	Прямолинейное неразветвленное русло
26	344–330	Конешгорский	14	Параллельно-рукавное русло (о-ва Коневец, Прозоровский)
27	330–326	Чамовский	4	Односторонние разветвления
28	326–321	Ростовский	5	Одиночное разветвление (о. Могучий)
29	321–309	Шилингский	12	Пойменно-русловое разветвление (о. Шилингский)
30	309–299	Двинской Березник	10	Прямолинейное неразветвленное русло
31	299–289	Пяндский	10	Врезанная излучина с одионым разветвлением в привершинной части
32	289–280	Усть-Ваеньгский	9	Прямолинейное неразветвленное русло
33	280–274	Шеньга	6	Врезанная излучина с одиоными разветвлениями в привершинной части (о. Богачев)
34	274–268	Репановский	6	Одионое разветвление (о. Репановский)
35	268–260	Вятский	8	Параллельно-рукавное разветвление (о-ва Вятский, Зеленый)
36	260–257	—	3	Прямолинейное неразветвленное русло
37	257–245	Калкурский-Почтовый	12	Сопряженные разветвления (о-ва Калкурский-Мокеев, Новый Мокеев-Почтовый)
38	245–240	Ниж. Почтовский	5	Прямолинейное неразветвленное русло
39	240–225	Звозский	15	Врезанные излучины с прибрежными разветвлениями на нижних крыльях и в привершинных частях

Таблица 1. Окончание

№	Участок		Длина, км	Тип русла
	км от устья	название		
Адаптированное русло				
40	225–214	Ковозерский	11	Одиночное разветвление (о. Ковозерский)
41	214–209	Мартушевский	5	Одностороннее разветвление
42	209–196	Усть-Емецкий	13	Прямолинейное русло с односторон- ним разветвлением
Врезанное русло				
43	196–154	Хоробрицкий – Брин-Наволоок	33	Врезанные излучины; первая и чет- вертая — с разветвлениями у вогну- тых берегов (о-ва Репный-Вятский- Пашин, Большой)
44	154–137	Ракульский	17	Прямолинейное неразветвленное русло
45	137–131	мыс Кривое	6	Врезанная крутая излучина
46	131-121.5	Копачевский	9	Прямолинейное неразветвленное русло
47	121.5-117	Орлецы	4.5	Врезанная крутая структурная излу- чина
48	117–112	мыс Пангал	9	Врезанная излучин
49	112–106	плес Товренский	6	Прямолинейное неразветвленное русло
50	106–88	Усть-Пинежский	24	Врезанные излучины с разветвлени- ями в привершинных частях у выпу- клых берегов (о-ва Марилов, Анту- шевский)
Врезанное структурное раздвоенное русло и разветвления (устьевая область)				
51	88–52	Холмогрский	36	Раздвоенное русло (скульптурно-ак- кумулятивные межукавья) с развет- вленными левыми рукавами и обте- кающими излучинами правого рукава
52	52–50	—	2	Прямолинейное неразветвленное русло
53	50–36	Троицкий- Оброшня	14	Параллельно-рукавное русло (о-ва Троицкий, Мал. Троицкий, Оброшня)
54	36–33	—	3	Прямолинейное неразветвленное русло
56	33–17	Новодвинский	16	Пойменно-русловое скульптур- но-аккумулятивное разветвление (о-ва Красная Кошка, Коневец и др.)
57	17–0	Архангельский	17	Одиночные разветвления (о-ва Турдеевский, Краснофлотский)

в нижнем крыле вдоль коренного берега. Далее на протяжении всего участка чередуются разветвления различного типа, занимающие 81.5 км его длины (прибрежные одно- и двусторонние, одиночные — 30.5 км, параллельно-рукавные — 19.5 км, сопряженные — 14 км, пойменно-русловое — 10 км разветвления и разветвленно-извилистое русло — 7 км), три участка относительно прямолинейного неразветвленного русла (7.5, 8 и 18 км) вдоль левого коренного берега, с единичными небольшими прибрежными островами возле правого пойменного берега, не определяющими морфологический облик русла. Меандрирующее русло, помимо вынужденной Усть-Вычегодской излучины (с шагом $L = 4.4$ км), представлено двумя полугими вписанными излучинами общей протяженностью около 16.5 км, вогнутый правый берег которых образуют легкоразмываемые, особенно верхней Толоконской излучины, песчаные уступы 40-метровой надпойменной террасы. Между ними находится крутая Ботовская излучина, в которой река огибала два больших острова, создавая разветвленно-извилистый участок. В настоящее время он преобразовывается в прямолинейное русло вследствие развития, спрямляющего через островную шпору излучины прямолинейного рукава вдоль правого борта долины. На всем протяжении участка очень широко развита пойменная многорукавность, расчленяющая пойму на отдельные массивы многочисленными протоками (полями), забирающими в совокупности до 20% стока реки.

Весь участок характеризуется сложным режимом деформаций и рассредоточением потока по рукавам и пойменным протокам, многочисленностью следующих друг за другом перекатов (по существу, это единый перекатный участок), слабой устойчивости (местами неустойчивостью) русла и постоянными переформированиями разветвлений и перекатов. Наиболее сложными в этом отношении являются Усть-Курское пойменно-русловое, Канзское-Лобановское сопряженные, Шиловские чередующиеся односторонние (особенно Шиловские перекаты между верхним и нижним их звеньями) и Паячные-Рубежские параллельно-рукавные разветвления.

Следующий 37-километровый участок охватывает врезанное русло, которое характеризуется резким сужением поймы (здесь $B_n < b_p$) или ее отсутствием. Основными его типами здесь являются прибрежные односторонние разветвления (занимающие по длине 23 км) и большая врезанная излучина с шагом 8.5 км и длиной по руслу 15 км. В судоходном, основном по водности левом рукаве имеются перекаты, связанные с отвлечением стока или впадением межостровных протоков и неровностями левого коренного берега.

Промежуточное положение (по соотношению $B_n \sim b_p$) между широкопойменным и врезанным занимает адаптированное русло, которое охватывает участок реки длиной 213 км, представленный сначала чередованием относительно прямолинейного неразветвленного русла вдоль правого коренного берега (по левому берегу развита узкая пойма) с одиночным и односторонним разветвлениями (о-ва Ромбовский, Старкова), 25-километровым участком сложных параллельно-рукавных разветвлений (Слудское—Липовецкое—Селецкое), сформировавшиеся за крутым коленообразным поворотом реки, ниже которого русло резко расширяется (в несколько раз). Здесь русло разделяется сначала широкими о-вами Кодимским и Телячьим (шириной до 2300 м), образующими прибрежные разветвления, а затем левый рукав и русло ниже ухвостья о. Телячьего — цепочкой островов разных размеров и осередков на два параллельных рукава. Их развитию способствует, помимо расширения русла и рассредоточения стока, его сужение

в конце, вызывающее подпор потока и аккумуляцию наносов в половодье. Завершается участок походом реки к правому коренному берегу, возле которого расположился короткий (6 км) прямолинейный плес.

Начиная с 364 км и вплоть до устья русло Северной Двины врезанное, и лишь перед впадением р. Емцы оно разделяется 29-километровым адаптированным участком с левобережной Двинско-Емецкой поймой. Но и на остальном протяжении морфодинамический облик врезанного русла очень изменчив, в том числе из-за различий в геологическом строении коренных берегов, колебаний ширины русла, наличия фрагментов узкой поймы ($B_n < b_p$) и т.д. Выше устья р. Ваги преобладают параллельно-рукавные разветвления (Тулгасские, Конецгорские), представленные двумя участками длиной 15 и 12 км соответственно, и пойменно-русловое (Шилинское, 14 км), что составляет около 75% всего участка (41 из 55 км). Они перемежаются с прямолинейным неразветвленным руслом, образующим плесовый 5-километровый участок у с. Рочега, односторонними и одиночным (о. Могучий) разветвлениями.

Ниже устья р. Ваги и до 225 км (начало Усть-Емецкого расширения) чередуются врезанные излучины (три участка длиной 31 км), осложненные одиночными разветвлениями в привершинных частях, прямолинейное неразветвленное русло (четыре участка длиной 3–10 км, общая длина — 27 км), Вятское параллельно-рукавное и сопряженные Калкурское-Почтовые разветвления, с которыми связаны переформирования русла и перекаты.

Усть-Емецкий адаптированный участок русла (29 км) начинается с большого одиночного разветвления (о. Ковозерский длиной 5.7 км) и односторонних разветвлений вдоль левого пойменного берега (5 км). Ниже вплоть до устья р. Емцы (13 км) русло прямолинейное, очень широкое (до 2.25 км), представляющее собой перекаточный участок с шахматным расположением побочной и сложным режимом деформаций (перекаты Хаврогорский, Емецк-Луг, Сиротинские Гряды, Заход в Репный).

Ниже устья р. Емцы (до 154 км) русло образует на более чем 30-километровом участке выше и ниже п. Брин-Наволоку серию из шести близких по морфометрическим параметрам врезанных излуцин (средний шаг $L = 5.5–6.5$ км), из которых первая и четвертая осложнены островными или осередковыми разветвлениями, формирующимися возле вогнутых берегов, причем большая часть расхода воды проходит в рукавах (или протоках) у выпуклых берегов. На первой излучине у о. Репного в привершинной части и далее в нижнем крыле с осередками при ширине русла около 1600 м находятся сложные Репные перекаты, являющиеся прямым продолжением перекаточного участка выше устья р. Емцы. На нижних двух излучинах (Сийской и Брин-Наволоку) русло сужается до 650 м и образует протяженный плесовый участок. Его продолжением является прямолинейное врезанное русло длиной 48 км (154–106 км), прерываемое двумя врезанными излучинами (Орлецы и мыс Пангал), из которых у с. Орлецы русло сужается до 550 м, образуя крутой структурный колёнообразный изгиб с переуглублением русла (средняя глубина потока в межень — 27–28 м) в его вершине.

Перед и при слиянии с р. Пинегой вновь река образует две врезанные излучины, верхняя из них связана с островом, создающим шпору, в основании которой (по оси пояса меандрирования) проходит спрямляющий рукав. На нижней излучине, со стороны вогнутого берега которой в вершине располагается устье р. Пинеги, у выпуклого берега сформировалось небольшое прибрежное разветвление.

Ниже устья р. Пинеги русло становится раздвоенным, с протяженными (до 25 км) и широкими (до 10 км) структурными и скульптурно-аккумулятивными межукавьями, с разветвленными левыми рукавами и обтекающими излучинами основного по водности правого судоходного рукава. Островные массивы являются незатопляемыми, имеют сложную изометричную форму и достигают длины от 15 до 25 км. Ближе к дельте чередуются прямолинейное врезанное русло со скульптурно-аккумулятивными (о-ва Красная Кошка, Коневец и др.), затем одиночными разветвлениями (о-ва Турдеевский, Краснофлотский), сопрягающимися с обширной дельтой реки ниже г. Архангельска.

Трансформация русла

Распространение (табл. 1) морфологически однородных участков, обусловленное на Северной Двине геолого-геоморфологическими условиями формирования русла (широкопойменных, адаптированных, врезанных), неизменно во времени, но внутри их морфодинамические типы русла претерпели очень существенные трансформации, связанные: 1) с естественными переформированиями русла, приводящими не только к изменению его параметров и гидравлической структуры потока, но и во многих случаях к смене или усложнению типа русла; 2) с изменениями водности реки при потеплении климата; 3) с техногенными воздействиями в течении XX в. на русло, связанными в основном с мероприятиями по совершенствованию водного пути; 4) с резким сокращением дноуглубительных, прекращением выправительных и ремонтно-восстановительных (для ранее возведенных дамб и полузапруд) работ. При этом во многих случаях одни причины трансформации сказываются на фоне других, одновременно, и только при анализе происшедших изменений и при совокупном учете всех факторов возможно выделение ведущих, определивших направленные деформации русла и изменение его типа.

Наиболее яркое проявление трансформаций русла вследствие естественных деформаций дают сведения о развитии и обмелении рукавов разветвлений, спрямлений русла вдоль коренных берегов и появлении мощного источника поступления наносов. Характерным примером первого является Усть-Курское разветвление (рис. 2), в котором с конца XIX в. происходило последовательное развитие левых рукавов и общее смещение русла к левому коренному берегу: сначала у о. Песчанского в 1930–1940-е гг. как следствие развития излучины правого рукава и превышения им критического соотношения $l/L > 1.6$ (l — длина излучины, L — ее шаг) [12, 20], а в 2000-е гг. — у о. Марковского, который стал вторым основным рукавом, водность которого соизмерима (по измерениям в мае 2924 г.) с правым судоходным рукавом (46 и 54% от общего расхода воды в реке соответственно). Еще в 1960-е гг. это был маловодный полый — межостровная протока среди левобережных островов и отмелей; сейчас он — более короткий и прямой рукав пойменно-руслового разветвления, образованного двумя островами, из которых один (без названия) сформировался в последние 20–30 лет благодаря зарастанию крупного осередка перед оголовком о. Марковского. В судоходном правом рукаве побочни располагаются в шахматном порядке, глубины на перекатах в межень сокращаются до 1.5 м; левый рукав — Новинский полый — на всем протяжении более глубокий, перекаты практически отсутствуют.

Выше п. Красноборска между 572 и 588 км (по современному руслу) во время экстремально высокого половодья в 1930-е гг. произошло спрямление в основном вдоль левого коренного берега большой сложной излучины, вершина которой рас-

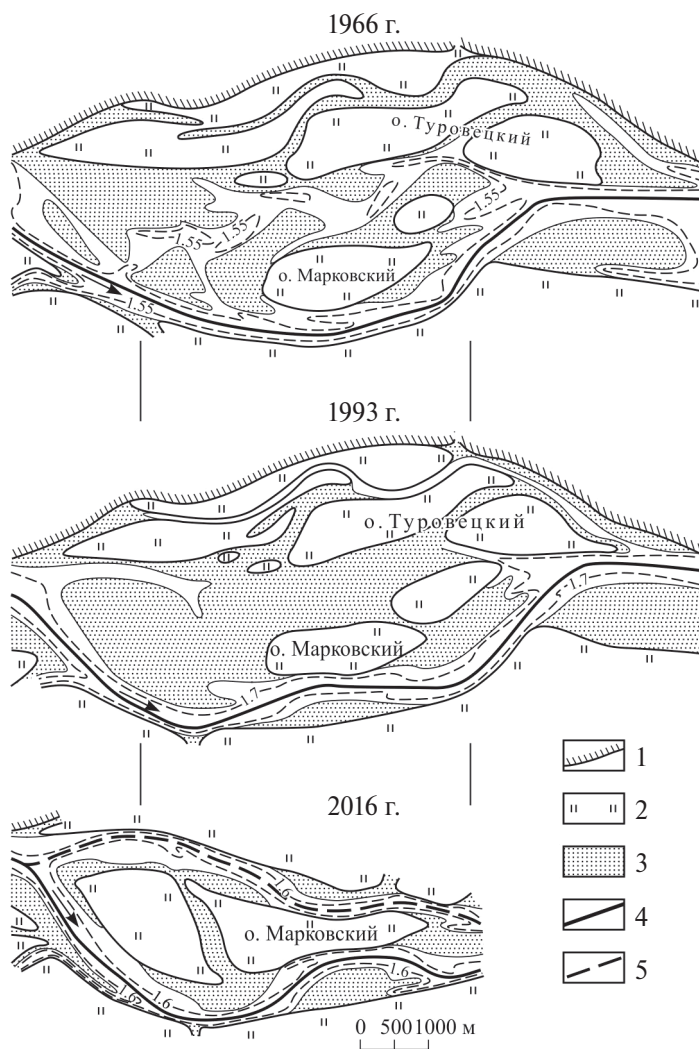


Рис. 2. Многолетние переформирования Усть-Курского разветвления. 1 — коренные берега; 2 — пойма; 3 — прирусловые отмели (побочни, осередки, косы); 4 — динамическая ось основного (по водности) рукава (судовой ход); 5 — второй основной рукав.

Fig. 2. Perennial reformations of Ust-Kurskoe branch. 1 — indigenous coasts; 2 — floodplain; 3 — midstream sandbanks (side bars, central bars, spits); 4 — dynamic axis of the main (in terms of water availability) arm (ship's course); 5 — second base arm.

полагалась у правого борта долины, а крылья по диагонали пересекали широкую пойму (при соотношении $l/L > 1.7$ [7, 18]. Сейчас бывшее русло представляет собой крупную пойменную протоку — полуй, водность которого не превышает 15%.

В обоих приведенных примерах происходящие естественные трансформации русла поддерживались (но не определяли ее) разработкой капитальных дноуглубительных прорезей в развивающихся рукавах при переводе в них трассы судовой хода для обеспечения гарантированных габаритов пути в переходный период. На Красноборском участке закреплению перемещения главного течения реки в спрямляющий

рукав способствовало его расположение в основном вдоль левого коренного берега. В Усть-Курском разветвлении сохранение в настоящее время большей водности правого судоходного рукава поддерживается ежегодным (даже в современных условиях) выполнением дноуглубительных работ на перекатах.

Расположение реки вдоль относительно выровненного в плане высокого коренного берега — условие формирования на широкопойменных участках прямолинейного русла как следствие возникновения специфической гидравлической структуры потока при затоплении в половодье односторонней поймы [20]. Таковы практически все участки Северной Двины с этим типом русла протяженностью от 4.5–5 до 18 км (Пермогорский участок), отличающиеся устойчивостью и неизменностью конфигурации русла в целом. В пределах таких участков рельеф поймы и его палеорусловой анализ свидетельствуют о том, что в прошлом русло здесь было разветвленным, но в ходе его переформирования, подойдя к коренному берегу, его положение стабилизировалось возле него. На их примере Н.И. Маккавеев [17] теоретически обосновал механизм формирования прямолинейного русла, а при проведении мероприятий по улучшению условий судоходства — правило “ведущего берега” как метода выправления русла. Однако наличие небольших неровностей таких берегов приводит к отклонению от него динамической оси потока, образованию ниже них побочной и перекатов; своевременное отторжение побочной (если оно не происходит естественным путем) обеспечивает устойчивое расположение потока и фарватера вдоль коренного берега. На Северной Двине отклонению потока от него нередко способствуют каменистые высыпки в русле как результат подмыва рекой берега, сложенного валунными моренными суглинками. С другой стороны, крупные изгибы коренного берега отклоняют его поток, являются причиной формирования ниже по течению разветвлений (Усть-Курского, Канзского, Красноборского и др.), в которых основным по водности, как правило, является удаленный от него рукав — в перечисленных — правый, в который поток направляется мысом левого коренного берега.

Естественная трансформация русла произошла с Ботовским разветвленно-извилистым руслом, где до 2000-х гг. крутую сегментную излучину образовывали два больших острова, разделенные спрямляющими ее межостровными протоками. К этому времени параметры излучины превысили критические размеры ($l/L > 1.7$), что привело к перераспределению стока, в результате чего бывший судоходный рукав, образующий излучину, обмелел (его водность теперь составляет всего 14.4%), тогда как спрямляющий, относительно прямолинейный Ботовский полый, проходящий возле правого коренного берега, превратился в основной по водности и глубокий на всем протяжении рукав (рис. 3). В известной мере этому способствовали дноуглубительные работы по новому направлению основного потока (и судового хода, перенесенного в развивающийся Ботовский полый).

Паячные-Рубежские-Коптельские параллельно-рукавные разветвления возникли в первую половину XX в. перед сужением днища долины и сменой широкопойменного русла врезанным в зоне подпора и аккумуляции наносов в половодье. Но до конца XIX в. непосредственно перед сужением днища долины было одностороннее разветвление, а выше него — прямолинейное широкое русло со сложным перекатным участком, подстилаемое трудноразмываемыми моренными суглинками. Образование параллельно-рукавного разветвления произошло в 1920-е гг. благодаря тому, что выше по течению стал интенсивно (до 5–10 м/год) размываться правый берег Северной Двины — песчаные Толоконные горы. При протяженности фронта

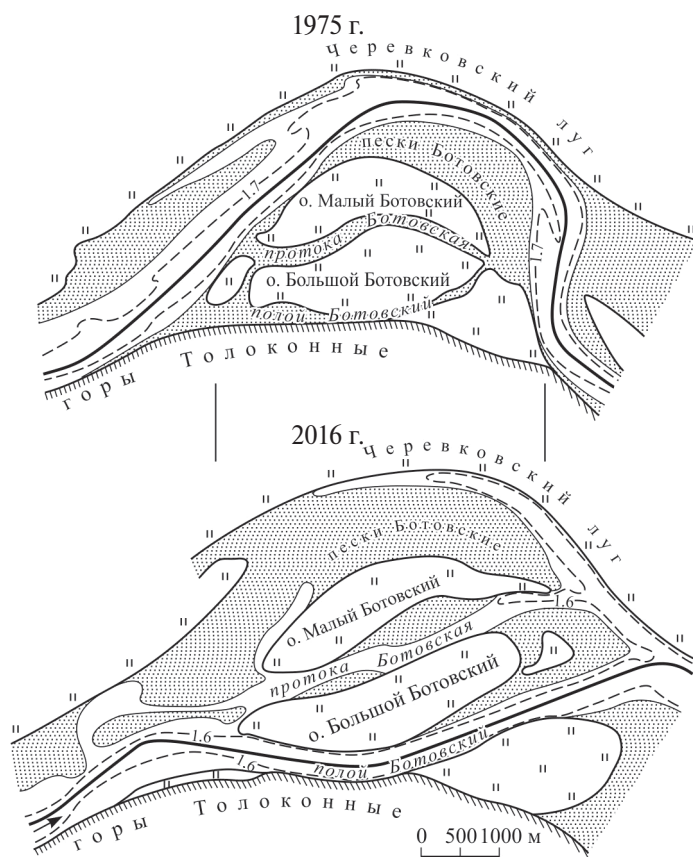


Рис. 3. Спряменение излучины Ботовского разветвленно-извилистого участка русла.

Fig. 3. Bend straightening of Botovskiy branching-meandering section.

размыва 6 км, высоте размываемого берега около 40 м и глубине плесовой лощины возле него до 4–8 м в поток поступало огромное количество наносов, которые аккумуляровались в зоне подпора от сужения долины ниже по течению [18]. В настоящее время участок представляет собой параллельно-рукавное разветвление русла, в котором выделяются два основных рукава между островами посередине реки (нижние из них — о-ва Рубежский и Овечий) и второстепенный левобережный рукав (полый Ягрышский), отделенный от основных рукавов о-вами Авнюгским, Ягрышским и безымянными (рис. 4). Выше по течению (494–501 км) параллельно-рукавное разветвление образовано двумя рукавами: левым — судоходным и правым — полем Тядемским, водность которого перед его слиянием с правым рукавом Паячного-Рубежского участка составляет 22%.

В 1950–1960-е гг. в пределах Паячных-Рубежских разветвлений были выполнены крупные выправительные работы (дноуглубление и сооружение перекрывающих правые рукава дамб), и судовой ход был искусственно закреплен в левом рукаве этих разветвлений, причем углубление произведено отчасти в подстилающие русло моренные отложения. Выбор левого рукава в качестве судоходного был обусловлен

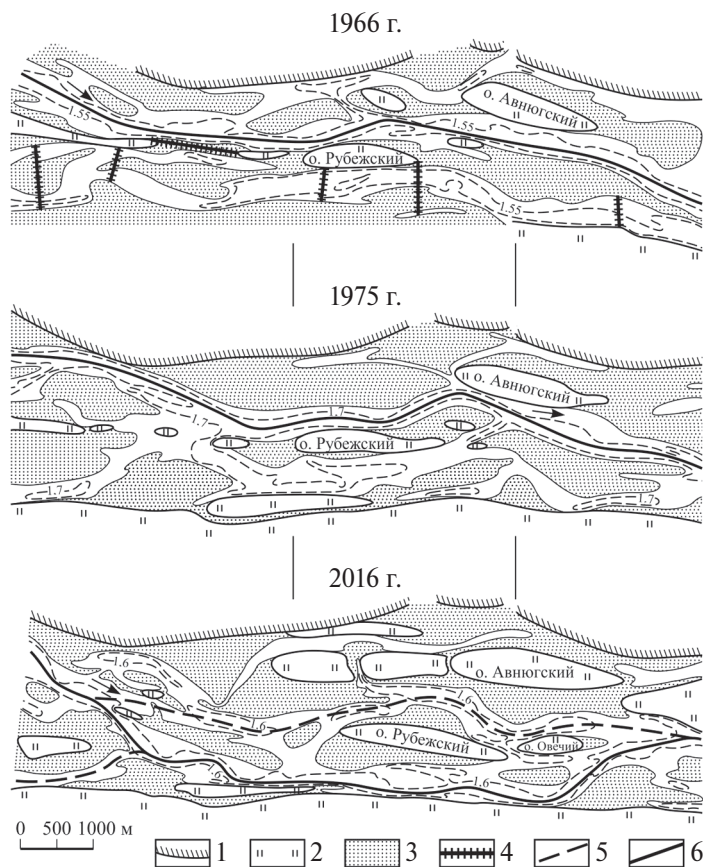


Рис. 4. Переформирования Паячных-Рубежских разветлений. 1 — коренные берега, 2 — пойма, 3 — прирусловые отмели; 4 — выправительные сооружения (дамбы); 5 — динамическая ось основного (по водности) рукава (судовой ход); 6 — второй основной рукав.

Fig. 4. Reformations of Pajachnye-Rubezhskie branches. 1 — indigenous coasts; 2 — floodplain, 3 — midstream sandbanks; 4 — rectification structures (dams); 5 — dynamic axis of the main (in terms of water availability) arm (ship's course); 6 — second base arm.

тем, что продукты размыва Толоконной горы в основном направлялись в правый рукав, вызывая его обмеление. Возведение дамб способствовало обмелению этого рукава и повышению водности левого рукава. Со временем дамбы, перекрывающие правый рукав, разрушались, практически перестали функционировать. Это привело к естественному повышению водности и развитию правого рукава. В это же время выше по течению Толоконная гора оказалась частично перекрытой смещающимися с вышерасположенного участка отмелями, что более чем в два раза сократило длину фронта размыва и, как следствие, существенно уменьшило поступление наносов. В результате произошло на всем протяжении Паячных-Рубежских-Коптельских разветлений развитие правого рукава, который в настоящее время забирает 51% расхода воды в половодье.

Таким образом, Паячные-Рубежские-Коптельские разветвления — пример естественного формирования разветвленного русла сложного типа и последующих его изменений вследствие сначала мощных техногенных воздействий, а затем их пре-

кращения и произошедшего одновременно с этим снижения в ходе деформаций русла значимости местного источника поступления наносов. Возможно, что в определенной мере сказались и гидроклиматические изменения, способствующие превращению осередков в острова и перераспределению стока между рукавами.

Все изменения русла, как естественные, так и техногенные, осуществляются на общем фоне увеличения годового стока реки со 2-й половины XX в. на 8–10% при снижении водности половодий и увеличения ее в межень [4]. При этом в летнюю межень, несмотря на повышение водности, по реке с разветвленным руслом отмечено понижение уровня воды и сокращение вследствие этого затопляемости прирусловых отмелей (побочней и осередков) [18]. Это привело к их массовому зарастанию растительностью и превращению осередков и побочней с развитыми побочневыми протоками в острова, рассредоточению стока по рукавам, изменению параметров русла и обмелению перекатов в многоводную фазу режима (до снижения глубин ниже гарантированных для водного пути 1.6–1.7 м от проектного уровня) и их сложным изменениям на спаде уровней и в межень. Причиной этого противоречия является массовое выполнение дноуглубительных работ на перекатах и вызванное стеснением потока выправительными сооружениями врезание реки.

Действительно, в 1960–1980-е гг. ежегодные объемы землечерпания составили 13 000–18 000 тыс. м³, достигнув максимума в 1975 г. — 20 854 тыс. м³ на участке от г. Котласа (устье р. Вычегды) до п. Двинской Березник (ниже устья р. Ваги) длиной 302 км. Соответственно, в среднем на 1 км длины реки приходится извлечение в среднем около 50 тыс. м³ (максимум — более 60 тыс. м³). Ниже по течению дноуглубление выполнялось на четырех участках адаптированного русла общей длиной 40 км (Шеньга, Калкурском-Почтовском, Усть-Емецком и Хоробойском) в меньших объемах и не столь регулярно. Грунты, извлекаемые из прорезей, укладываются в виде отвалов вдоль них (подобие грунтовых сооружений), что не нарушало баланс наносов на реке. Вместе с многочисленными выправительными сооружениями (дамбами, полузапрудами, число которых на реке к 1990-м гг. достигло 38 единиц; большинство их сейчас разрушены) они способствовали сужению русла или стрежневой зоны потока и, как следствие, его углублению.

На последних 164 км реки ниже п. Брин-Наволоок, где русло врезано в скальные грунты (известняки и гипсы), суженное относительно других участков реки в 1.5–2 раза, глубокое и лишенное обсыхающих в межень отмелей, и в пределах устьевой области выправительные работы и дноуглубление для судоходства никогда не проводились.

Благодаря такому техногенному воздействию на русло (а оно основывалось на анализе и закономерностях проявления русловых процессов) разработка капитальных дноуглубительных прорезей и массовое возведение выправительных сооружений гарантированные глубины на Северной Двине постоянно возрастали от 60–70 см в 1913–1915 гг. до 90 см в 1928 г., 120 см в 1940 г., 145 см в 1960 г. и с 1970 до 1991 г. — до 170 см от слияния с р. Вычегдой до устья р. Ваги (п. Двинской Березник) и 180 см ниже по течению, до слияния с р. Пинегой. В 1990-е гг. выправительные работы на Северной Двине (как и на всех судоходных реках России) были прекращены, большинство ранее построенных сооружений были разрушены или в процессе переформирования русла оказались за пределами его активной зоны и перестали оказывать воздействие на него. Это привело к появлению тенденции релаксации (восстановления) естественного руслового режима и активизации русловых деформаций. При этом гарантированные глубины в общем при минимуме эксплуатацион-

ного землечерпания на наиболее затруднительных перекатах в целом сохраняются на уровне 160 и 170 см, хотя в низкую межень часто не выдерживаются, особенно при снижении уровней воды ниже проектного (например, в 2024 г. — до –1 м). Однако сам факт сохранности повышенных гарантированных глубин свидетельствует о высокой эффективности выполненных в 1960–1980-е гг. работ по созданию современного водного пути.

Согласно исследованиям В.В. Суркова [18], понижение уровней в межень при снижении расходов воды в половодье привело на Северной Двине к сокращению на 20–40 дней продолжительности затопления отмелей, что способствовало зарастанию побочней и осередков. Появление же растительности на отмелях при их затоплении, в свою очередь, благоприятствует накоплению наилка, насыщенного органикой (пойменная фация аллювия), способствуя активизации их зарастания и превращения в пойму. В результате с 1975 по 2016 г. вследствие зарастания осередков на Северной Двине возникло более 50 островов, увеличилась длина и ширина ранее существовавших, возросла рассредоточенность потока по рукавам и протокам.

Характерным примером повсеместного зарастания осередков и побочней, примыкающих к островам, представляет Слудское-Липовецкое-Селецкое параллельно-рукавное разветвление. Еще в 1950-е гг. этот участок представлял собой прямолинейное русло с одиночным разветвлением в его начале (о. Слудский, бывший в несколько раз меньше современного) и маловодными протоками за прибрежными островами вдоль одного или обоих берегов, с шахматным расположением побочней, образующих протяженный перекаточный участок. Зарастание отмелей-осередков и превращение их в острова привело к трансформации русла в параллельно-рукавное, а нижней части участка — в прибрежные двусторонние разветвления (рис. 5).

Подобные трансформации произошли в 1990-е годы на Канзском-Лобановском участке, где образовалось два новых острова, которые вместе со старым о. Канзским, но сильно разросшимся, составили сопряженные разветвления из трех звеньев. Единую сопряженную систему образовал вновь образовавшийся о. Могучий с расположенным против устья р. Ваги о. Щилинским. Этот процесс еще не завершился (на 2024 г.), и поэтому в табл. 1 оба разветвления представлены не сопряженными, а как смежные одиночное и пойменно-рукавное.

Преобладание техногенных воздействий в трансформации русла, приведшее к смене его морфодинамического типа, наиболее наглядно проявилось на Телеговском широкопойменном и на Свагско-Верхнотоймском участке врезанного русла. Первое из них представляло собой в начале 1900-х гг. сопряженную систему рукавов, в которых вследствие выправительных работ судовой ход в верхних звеньях был закреплен возле левого берега, а ниже по течению до середины XX в. сохранялось одиночное разветвление с периодическим (через 5–10 лет) развитием и расположением судового хода то в левом, то в правом рукавах. В 1950-е гг. правый рукав был перекрыт полузапрудами, и основной поток и судовой ход устойчиво расположились в левом рукаве. Таким образом, сопряженные разветвления трансформировались в односторонние (рис. 6), в которых бывшие вторыми основными рукава (полый Свага) превратились в маловодные (доля стока в них суммарно не более 10%), а само преобразование русла приобрело необратимый характер (капитальные дамбы, перекрывающие рукава, сохранились, но они “погребены” под толщей наносов, их заполнивших и образовавших зарастающие отмели).

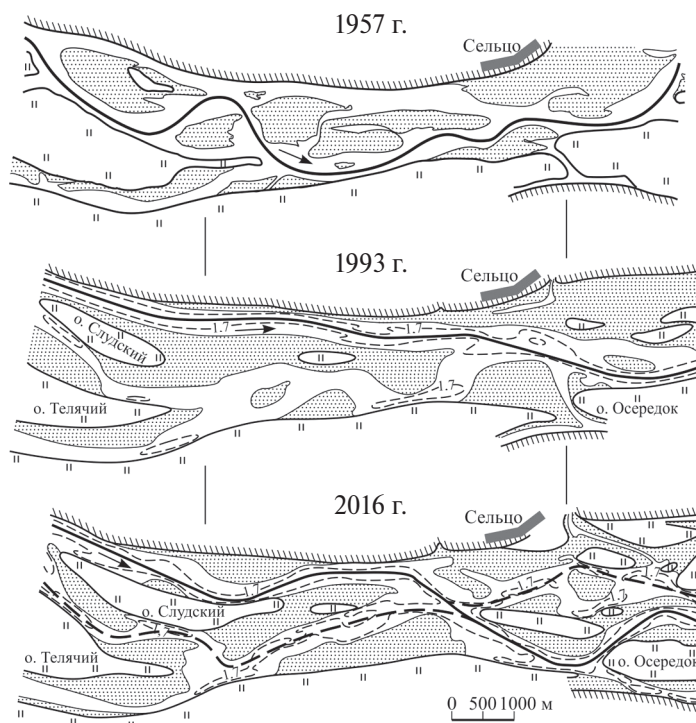


Рис. 5. Трансформация русла на Слудском-Липовецком-Селецком участке (условные обозначения на рис. 4).

Fig. 5. Channel transformation in Sludskoye-Lipovetskiy-Seletskiy section (symbols at fig. 4).

На втором участке с врезанным руслом (береговая пойма отсутствует) трансформация параллельно-рукавных разветвлений в односторонние с расположением основного русла вдоль левого коренного берега обусловлено перекрытием в 1949-е гг. правого рукава (полый Свага) глухими высокими (выше среднего уровня половодья) дамбами в связи с его использованием еще в конце XX в. как плотбище. В нижней части разветвления в связи с его продольным смещением до вершины ниже расположенной врезанной излучины произошло удлинение водного подхода к п. Верхняя Тойма (раньше верхнее крыло излучины было неразветвленным). Поэтому в связи с выносом причалов к судоходному рукаву на вновь образовавшийся остров полый Свага был и здесь в 2000-е гг. перекрыт дамбой, по которой проложена дорога от поселка (райцентр) к причалам, которые обслуживают паромную переправу.

С зарастанием осередков и формированием за последние 50 лет новых островов связано образование на Шиловском участке левобережных односторонних разветвлений ниже отхода реки от Пермогорского коренного берега и затем ниже по течению одиночного разветвления, в котором правый несудоходный рукав забирает 35% расхода воды. Это обуславливает систематическое обмеление перекаатов на перевале основного потока из правого рукава односторонних разветвлений в левый в одиночном из-за снижения водности основного судоходного рукава и развития кос в ухвостьях левобережных островов, искривления стрежня потока, их огигающего, фор-

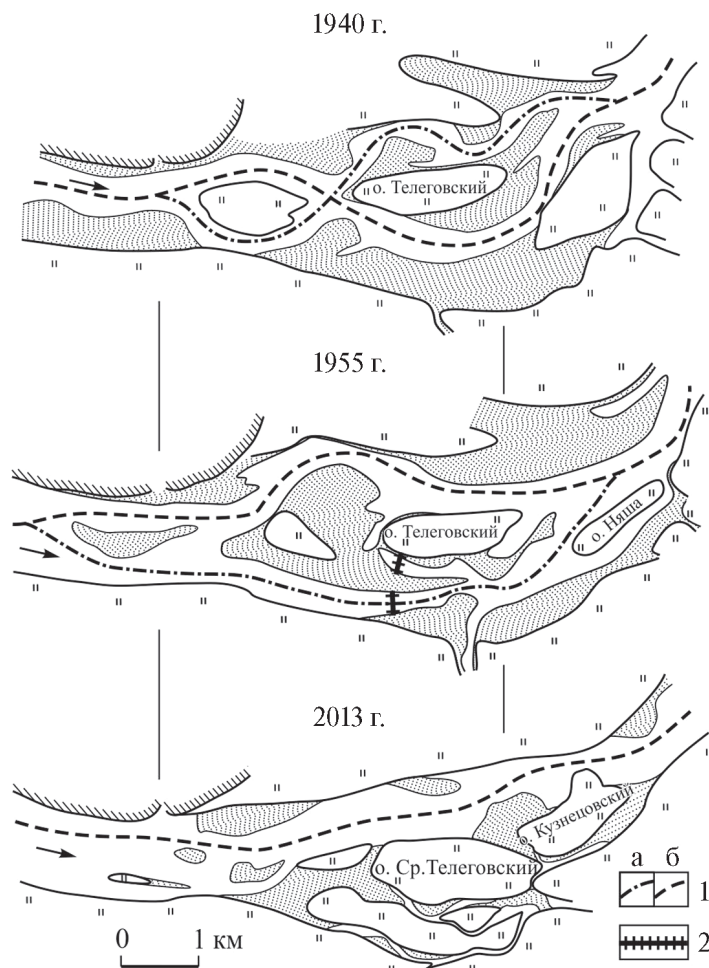


Рис. 6. Трансформация сопряженных разветвлений в одиночное и затем в односторонние как следствие выполнения выправительных работ (Телеговские разветвления). 1 — судовой ход: а — до, б — после их проведения; 2 — дамбы [21].

Fig. 6. Transformation of conjugate branches to single and then to unilateral branches as a consequence of rectification works (Telegovskie branches). 1 — ship's course: a: before; b — after the work is completed; 2 — dams [2].

мирования затонской части вдоль левого берега и периодического отторжения косы, отделяющей ее от основного потока (рис. 7).

Таким образом, в течение XX–XXI столетий на большей части Северной Двины произошли существенные трансформации русла, приведшие к усложнению уже существующих разветвлений, превращению их в параллельно-рукавные и сопряженные, образованию новых, спрямлению больших излучин и сменам морфодинамических типов русла, что явилось следствием проведения на реке различных гидротехнических мероприятий (дноуглубления и строительства выправительных сооружений) на фоне гидроклиматических изменений при одновременных интенсивных русловых переформированиях, свойственных слабоустойчивому руслу. Во всех случаях, когда происходила естественная трансформация русла и для обе-

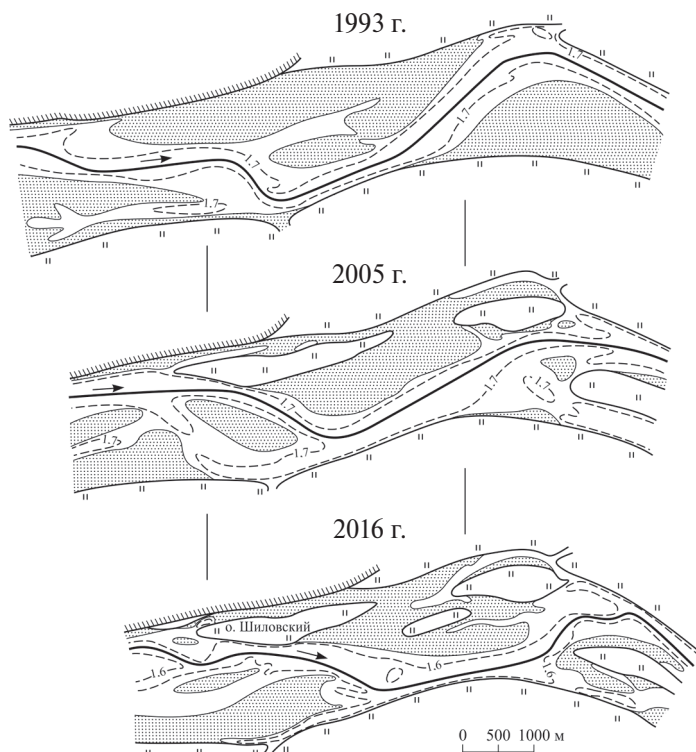


Рис. 7. Образование односторонних и одиночного разветвления на Шиловском участке.

Fig. 7. Formation of unilateral and single branching at Shilovskiy section.

спечения в переходный период нормальных условий судоходства, они поддерживались в той или иной мере разработкой прорезей в развивающемся рукаве. При этом трансформации охватили как широкопойменное русло от слияния с р. Вычегдой (135 км, около $\frac{1}{4}$ протяженности реки), так и большую часть врезанного и адаптированное русло до устья р. Ваги, где оно формируется в основном в моренных валунных суглинках и пермско-триасовых песчаниках и алевролитах. Ниже устья р. Ваги и особенно на нижнем 164-километровом участке, где врезанное русло формируется в известняках и гипсах карбона, его трансформации не проявляются или отмечены только в местных расширениях русла, сопровождающихся появлением узкой поймы ($B_{\text{п}} < b_{\text{р}}$), и на адаптированных участках ($B_{\text{п}} = 2-3b_{\text{р}}$). На этих же не связанных между собой участках выполнялись дноуглубительные работы, но не столь регулярно и в меньших объемах, чем выше устья р. Ваги. Поэтому массовое зарастание прирусловых отмелей и почти повсеместная трансформация русла произошли на Северной Двине от слияния с р. Вычегдой до устья р. Ваги, где русло, независимо от того, широкопойменное оно или врезанное, и от морфодинамического его типа, слабоустойчивое, и на нем в полной мере проявляются как естественные деформации, так техногенные воздействия. Ниже по течению русло относительно устойчивое, а от п. Брин-Наволока до дельты — устойчивое. Соответственно, ширина широкопойменного русла $b_{\text{р}} = 1900-2900$ м, (максимальная на Паячном-Рубежском-Коптельском участке), врезанного и адаптированного выше устья

р. Ваги $b_p = 1100\text{--}1800$ м, тогда как в нижнем течении в основном $b_p = 900\text{--}1100$ м и лишь у адаптированного русла на Усть-Емецком участке $b_p = 1700$ м, в местных расширениях $b_p = 1200\text{--}1600$ м. Ниже п. Брин-Наволоч и до слияния с р. Пинегой b_p сокращается до $500\text{--}550$ м.

Заключение

Обобщая приведенный анализ трансформаций русла Северной Двины, можно прийти к выводу, что все они происходят в широкопойменном, адаптированном русле и на тех участках врезанного, где оно сформировано в моренных или пермско-триасовых отложениях. Врезанное в скальные породы русло в нижнем течении реки с XIX в. практически не изменилось. Основным фактором трансформации является мощное техногенное воздействие, связанное с проведением дноуглубительных и выправительных работ для обеспечения необходимых для водного пути габаритов (в первую очередь, глубины русла). Эти работы из-за их объема и массовости затушевывают влияние повышения годового стока реки при снижении водности половодья и повышения ее в межень. Вследствие вызванного ими углубления почти на 1 м перекатов, являющихся именно в меженный период естественными регуляторами уровней воды [3, 11, 12, 17], и, соответственно, их понижения произошло снижение затопляемости прирусловых отмелей, их массовое зарастание, превращение осередков в острова и увеличение размеров ранее существующих. В большинстве своем в условиях широкопойменного и адаптированного русла это привело к усложнению существовавших разветвлений, формированию морфологически наиболее сложных и возникновению новых. При этом на некоторых участках как широкопойменного, так и врезанного русла возведение дамб, в том числе перекрывающих рукава, привело к упрощению разветвленности русла и концентрации стока в одном рукаве.

Во всех случаях выполнение выправительных и дноуглубительных работ опиралось на естественные тенденции русловых переформирований, что обеспечивало не только техническую эффективность, но и сохранение реки как природного объекта, т.е. гидроэкологическую безопасность мероприятий.

Полученные результаты должны учитываться при разработке прогнозов русловых деформаций, что особенно важно сейчас, когда поднимается вопрос о восстановлении водных путей и речного флота как важной составляющей транспортной системы России. Реализация этого связана с проектированием мероприятий по управлению русловыми процессами, которые основываются на закономерностях их проявлений и изменчивости при техногенных воздействиях.

Благодарности

Работа выполнена по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши (№ 121051400038-1), научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова (№ 121051100166-4) исходные материалы и русловой анализ), Российского университета транспорта (№ 103-00001-25-02 от 20.03.2015 анализ дноуглубительных и выправительных работ), при финансовой поддержке РНФ — проект № 23-17-00065 (разработка классификации, морфология и динамика русел).

Список литературы

1. Вильперт А.С. Выправление рек Северного бассейна // Речной транспорт. 1963. № 9. С. 25–27.
2. Гладков Г.Л., Чалов Р.С., Беркович К.М. Гидроморфология русел судоходных рек. СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2016. 434 с.
3. Гришанин К.В. Теория руслового процесса. М.: Транспорт. 1972. 216 с.
4. Евстигнеев В.М., Кислов А.В., Сидорова М.В. Влияние климатических изменений на годовой сток рек Восточно-Европейской равнины в XXI в. // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2010. № 2. С. 3–10.
5. Завадский А.С., Чалов Р.С. Условия формирования и морфология свободных излучин на реках Северной Евразии // Геоморфология. 2000. № 1. С. 88–95.
6. Завадский А.С., Иванов В.В., Чалов Р.С. Особенности морфодинамики перекатов и их роль в формировании заторов на Северной Двине // География и природные ресурсы. 2005. № 2. С. 62–67.
7. Каргаполова И.Н. Реакция русел рек на изменения водности и антропогенное воздействие за последние столетия. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: Изд-во МГУ. 2006. 27 с.
8. Лелявский Н.С. О речных течениях и формировании речного русла // Труды 2-го съезда инженеров-гидротехников в 1893 г. СПб., 1893. (Вопросы гидротехники свободных рек. М.: Речиздат, 1948. С. 18–136.)
9. Лохтин В.М. О механизме речного русла. СПб., 1897. (Вопросы гидротехники свободных рек). М.: Речиздат. 1948. С. 23–59.)
10. Львовская Е.А. Ретроспективный анализ, современное состояние и оценка возможных изменений русловых процессов на больших реках севера ЕТР. Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М.: Изд-во МГУ. 2016. 30 с.
11. Маккавеев Н.И. Русловой режим рек и трассирование прорезей. М.: Речиздат, 1949. 201 с.
12. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
13. Маккавеев Н.И., Останин В.Е., Сахарова Е.И. Геоморфологические исследования для обоснования проектов улучшения судоходных условий рек // Вопросы географии. М.: Географиз, 1961. № 52. С. 100–104.
14. Михайлова Н.М. Режим деформаций перекатов и его влияние на условия судоходства р. Северной Двины. Автореферат дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ. 2014. 30 с.
15. Михайлова Н.М., Львовская Е.А. Количественная оценка сезонных переформирований перекатов (на примере Северной Двины) // География и природные ресурсы. 2013. № 3.
16. Михайлова Н.М., Чалов Р.С. Классификация участков русла Северной Двины и Вычегды по сложности русловых процессов и управления ими // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 3. С. 25–30.
17. Проектирование судовых ходов на свободных реках // Труды ЦНИИЭВТ. Вып. 36. Под ред. Н.И. Маккавеева. М.: Транспорт, 1964. 262 с.
18. Русловые процессы и водные пути на реках бассейна Северной Двины. // Под ред. Р.С. Чалова. М: ООО “Журнал “РТ”, 2012. 492 с.
19. Чалов Р.С. О механизме формирования прирусловых отмелей // Изв. ВГО. 1964. Том 96. № 5. С. 433–434.
20. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 2. Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД, 2011. 960 с.
21. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 3. Антропогенные воздействия, опасные проявления и управление русловыми процессами. М.: КРАСАНД, 2019. 640 с.

Morphodynamics of the Channel of the Northern Dvina River, Its Natural and Technogenic Transformations in the XX–Early XXI Century

R.S. Chalov^{1,2}, G.B. Golubtsov^{1,2}, A.A. Kurakova¹,
V.A. Semakov¹, E.D. Panchenko^{1,3,*}

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

²*Russian University of Transport, Moscow, Russia*

³*Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia*

**E-mail: panchenko.zhe@yandex.ru*

Received 14.04.2025

Revised 30.05.2025

Accepted 09.06.2025

The article presents the main directions and conditions of the transformation of the Northern Dvina river channel (from the confluence with the Vychegda River), occurring under the influence of almost a century of anthropogenic impacts, fluvial deformations and hydroclimatic changes; the contribution of each of these factors and their interrelations are determined. The study is based on analysis of field measurements (branching water discharges, flow velocity fields, turbidity and sediment composition) taken during the 2024 flood period, river maps showing channel conditions at various times since the 1960s, satellite imagery and riffle and riffle area maps. It has been shown that the reformation of the northern Dvina channel takes place in the wide floodplain and adapted channels, and in those sections of the incised channel where it is formed in moraine or Permo-Triassic sediments. The main factor of transformation is anthropogenic, namely dredging and straightening to ensure the required dimensions (mainly channel depth) of the waterway. Due to the amount of work carried out, their influence is much greater than the role of changes in water flow, which for the Northern Dvina is manifested in an increase in annual flow with a decrease in water availability during floods and an increase during low flow periods. Dredging and straightening has resulted in more complex branching in most sections of the channel in a wide floodplain and adapted channel. However, the construction of dams, including those that overtopped arms, has resulted in simplified channel branching in some sections of both incised and wide floodplain channels.

Keywords: channel processes, dredging, straightening, wide floodplain, adapted, incised channel, branching channels

References

1. Vil'pert A.S. Vypravlenie rek Severnogo bassejna // *Rechnoj transport*. 1963. № 9. S. 25–27.
2. Gladkov G.L., Chalov R.S., Berkovich K.M. *Gidromorfologiya rusel sudohodnyh rek*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2016. 434 s.
3. Grishanin K.V. *Teoriya ruslovogo processa*. M.: Transport. 1972. 216 s.
4. Zavadskij A.S., Ivanov V.V., Chalov R.S. Osobennosti morfodinamiki perekatov i ih rol' v formirovanii zatorov na Severnoj Dvine // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2005. № 2. S. 62–67.
5. Evstigneev V.M., Kislov A.V., Sidorova M.V. Vliyanie klimaticheskikh izmenenij na godovoj stok rek Vostochno-Evropejskoj ravniny v XXI v. // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*. 2010. № 2. S. 3–10.
6. Zavadskij A.S., Chalov R.S. Usloviya formirovaniya i morfologiya svobodnyh izluchin na rekah Severnoj Evrazii // *Geomorfologiya*. 2000. № 1. S. 88–95.

7. Kargapolova I.N. Reakciya rusel rek na izmeneniya vodnosti i antropogennoe vozdejstvie za poslednie stoletiya. Avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk. M.: Izd-vo MGU. 2006. 27 s.
8. Lelyavskij N.S. O rechnyh techeniyah i formirovanii rechnogo rusla // Trudy 2-go s"ezda inzhenerov-gidrotehnikov v 1893 g. SPb., 1893. (Voprosy gidrotekhniki svobodnyh rek. M.: Rechizdat, 1948. S. 18–136.)
9. Lohtin V.M. O mekhanizme rechnogo rusla. SPb., 1897. (Voprosy gidrotekhniki svobodnyh rek). M.: Rechizdat. 1948. S. 23–59.)
10. L'vovskaya E.A. Retrospektivnyj analiz, sovremennoe sostoyanie i ocenka vozmozhnyh izmenenij ruslovyh processov na bol'shih rekah severa ETR. Avtoref. diss. ... kand. geogr. nauk. M.: Izd-vo MGU. 2016. 30 s.
11. Makkaveev N.I. Ruslovoj rezhim rek i trassirovanie prorezej. M.: Rechizdat, 1949. 201 s.
12. Makkaveev N.I. Ruslo reki i eroziya v ee bassejne. M.: Izd-vo AN SSSR, 1955. 347 s
13. Makkaveev N.I., Ostanin V.E., Saharova E.I. Geomorfologicheskie issledovaniya dlya obosnovaniya proektov uluchsheniya sudohodnyh uslovij rek. // Voprosy geografii. M.: Geografiz, 1961. № 52. S. 100–104.
14. Mihajlova N.M. Rezhim deformacij perekatov i ego vliyanie na usloviya sudohodstva r. Severnoj Dviny. Avtoreferat dis. ... kand. geogr. nauk. M.: MGU. 2014. 30 s.
15. Mihajlova N.M., L'vovskaya E.A. Kolichestvennaya ocenka sezonnyh pereformirovanij perekatov (na primere Severnoj Dviny) // Geografiya i prirodnye resursy. 2013. № 3.
16. Mihajlova N.M., Chalov R.S. Klassifikaciya uchastkov rusla Severnoj Dviny i Vychegdy po slozhnosti ruslovyh processov i upravleniya imi // Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie. 2021. № 3. S. 25–30.
17. Proektirovanie sudovyh hodov na svobodnyh rekah // Trudy CNIIEVT. Vyp. 36. Pod red. N.I. Makkaveeva. M.: Transport, 1964. 262 s.
18. Ruslovyje processy i vodnye puti na rekah bassejna Severnoj Dviny. // Pod red. R.S. Chalova. M: OOO "ZHurnal "RT", 2012. 492 s.
19. Chalov R.S. O mekhanizme formirovaniya priruslovyh otmelej // Izv. VGO. 1964. Tom 96. № 5. S. 433–434.
20. Chalov R.S. Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. T. 2. Morfodinamika rechnyh rusel. M.: KRASAND, 2011. 960 s.
21. Chalov R.S. Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. T. 3. Antropogennye vozdejstviya, opasnye proyavleniya i upravlenie ruslovyimi processami. M.: KRASAND, 2019. 640 s.

УДК 502.4, 911.9

РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОЙ РЕКРЕАЦИОННОЙ ЕМКОСТИ ТЕРРИТОРИИ ПРИРОДНОГО ПАРКА “БЕЛУХА”

© 2025 г. О.П. Николаева^{1,2,*}, К.С. Савенко², Р.В. Любимов², В.А. Ситникова²¹Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск, Россия²Горно-Алтайский филиал Института водных и экологических проблем СО РАН, с. Кызыл-Озек, Россия

*E-mail: nikooool@mail.ru

Поступила в редакцию 27.02.2025 г.

После доработки 13.05.2025 г.

Принята к публикации 09.06.2025 г.

В статье приводится расчет предельно допустимой рекреационной емкости территории природного парка “Белуха”, проведенный в соответствии с Типовыми правилами, утвержденными постановлением Правительства Российской Федерации от 31.10.2023 № 1809 [18]. Расчет поправочных коэффициентов, необходимых для определения указанной емкости, производился на основе методики из Проекта приказа Минприроды России [16]. Расчет предельно допустимой рекреационной емкости выполнялся для 4 многодневных маршрутов, 8 радиальных и обходных троп и 10 основных туристских стоянок (турбаз). В среднем полученное значение предельно допустимой рекреационной емкости всех туристских объектов природного парка “Белуха” составило 341 человек в день, или 20475 человека в сезон. При этом для наиболее популярных маршрутов предельно допустимая рекреационная емкость составила около 5 тысяч человек. Данное значение соответствует современному уровню посещения природного парка. Полученные расчетные результаты могут рассматриваться как базовые ориентиры для организации и проведения в дальнейшем мониторинговых исследований данной территории.

Ключевые слова: природный парк, Белуха, базовая рекреационная емкость, предельно допустимая рекреационная емкость, рекреационная дигрессия, туристские тропы, стоянки, Республика Алтай

DOI: 10.31857/S0869607125030062, EDN: LTSKNF

Введение

С 2023 г. в связи с изменениями в Федеральном законе от 14.03.1995 № 33-ФЗ “Об особо охраняемых природных территориях” на региональные органы исполнительной власти возложены задачи по организации и осуществлению туризма на территориях особо охраняемых природных территорий (далее — ООПТ) регионального и местного уровня [15].

Для реализации данных задач Правительством Российской Федерации предложены Типовые правила расчета предельно допустимой рекреационной емкости ООПТ регионального и местного значения при осуществлении туризма (далее — Типовые правила) [18].

При этом в указанном документе полномочия по установлению предельно допустимой рекреационной емкости (ПДРЕ) ООПТ регионального и местного значений переданы исполнительным органам государственной власти субъектов РФ.

В связи с этим Министерством природных ресурсов и экологии Республики Алтай разработан и утвержден Порядок расчета предельно допустимой рекреационной емкости особо охраняемых природных территорий республиканского значения при осуществлении туризма на территории Республики Алтай (далее — Порядок) [17].

В 2024 г. в качестве апробации методики расчета предельно допустимой рекреационной емкости выбран природный парк регионального значения “Белуха”, который в настоящее время является наиболее освоенным в рекреационном плане.

Природный парк “Белуха” образован постановлением Правительства Республики Алтай от 10.06.1997 № 198 “О создании природного парка “Белуха” [14]. По классификации Международного союза охраны природы он относится ко II категории ООПТ. В 1998 г. территории парка, отвечающей массиву горы Белуха, был присвоен статус объекта Всемирного природного наследия ЮНЕСКО в номинации “Золотые горы Алтая”. Площадь парка составляет 120 730 га.

Географически территория природного парка “Белуха” относится к Центрально-Алтайской физико-географической провинции. Административно парк находится в Усть-Коксинском районе Республики Алтай.

Территория парка “Белуха” является популярным рекреационным объектом Горного Алтая, притягивающим значительное количество туристов. По ведомственным данным БУ РА “Дирекция особо охраняемых природных территорий Республики Алтай”, в последнее время парк посещает от 3,5 до 5 тысяч человек. Здесь расположены широко известные туристические объекты: гора Белуха, Аккемское и Кучерлинское озера, водопад Текелю.

Инфраструктура в районе природного парка “Белуха” развита слабо. Автомобильных дорог нет, имеются сезонные грунтовые дороги для автомобилей повышенной проходимости, зимой — для снегоходов. Вглубь парка перемещение осуществляется пешком или на лошадях.

На территории парка пролегает более десятка троп разной протяженности и проходимости, а также более ста неорганизованных стоянок, в основном площадью менее 1000 м². Самыми популярными маршрутами являются Аккемская и Кучерлинская тропы. Обе эти тропы ведут к главной достопримечательности природного парка и Республики Алтай — горе Белуха. В районе этих троп существуют радиальные маршруты к природным достопримечательностям, в основном к озерам и водопадам.

Во время туристского сезона данные тропы испытывают наибольшую рекреационную нагрузку. Одной из главных и очевидных проблем является скопление бытовых отходов, которые увеличиваются пропорционально росту турпотока. Из-за труднодоступности территории и отсутствия достаточных финансовых и человеческих ресурсов отходы жизнедеятельности туристов остаются высоко в горах на долгое время и помимо нарушения эстетических качеств ландшафтов могут становиться источниками загрязнения почв, поверхностных и подземных вод. Пищевые отходы, особенно их систематическое образование на одной и той же территории, способны изменить пищевое поведение животных, создавая угрозы как для самих туристов, так и для животных, нередко поедающих остатки продуктов вместе с упаковкой.

Другой не менее важной проблемой является высокая степень рекреационной дигрессии растительного и почвенного покрова на значительных площадях троп и стоянок, а также на прилегающих к ним территориях. Особенно страдают от негативного воздействия туристов редкие лесные и краснокнижные виды рас-

тений. Так, согласно Красным книгам Республики Алтай [5, 6], в районе долины реки Аккем и Аккемского озера количество краснокнижных растений сократилось на 50%. На радиальных маршрутах наблюдается активное развитие глубинной эрозии и поверхностный размыв почвы.

Увеличивающийся ежегодно поток туристов и часто летающие вертолеты являются значительным фактором тревожности для животных. Шумовое загрязнение от вертолетов, которые зачастую летают целыми группами, распространяется на всю торговую долину Аккема.

В условиях динамичного развития туризма в Республике Алтай можно ожидать, что поток туристов на территории природного парка “Белуха” продолжит увеличиваться, а соответственно усилится и антропогенный прессинг на природные комплексы. Поэтому в условиях необходимости достижения баланса между природоохранными и рекреационными функциями данного ООПТ расчет и введение норм рекреационной емкости его территории становится важной и актуальной задачей.

Также важно отметить, что отсутствие надлежащей организации территории для целей пешего и конного туризма, а также в целом стихийный (нерегулируемый) характер посещения природных достопримечательностей является актуальной проблемой для Республики Алтай в целом. Ее решение невозможно в условиях локальных, отдельно взятых троп, необходим комплексный подход, предусматривающий организацию региональной системы охраны и мониторинга подобных туристских маршрутов и природных объектов, к которым они ведут. При этом безусловно такой подход потребует привлечение финансовых и иных ресурсов, но, например, полноценное введение в практику “туристских сборов”, а также коммерциализация части активно посещаемых туристских троп позволят создать привлекательные хорошо организованные и благоустроенные для массового туриста маршруты, снизив тем самым нагрузку на другие “дикие” тропы.

Материалы и методы

В области нормирования рекреационных нагрузок накоплен значительный научный опыт, отраженный в работах таких исследователей, как Н.С. Казанская [3], В.П. Чижова [28, 29, 30], Э.А. Репшас [21, 22], И.В. Эмсис [31, 32], Л.П. Рысин и др. [23], А.Д. Калихман и др. [4], И.В. Таран [27], В.В. Непомнящий и др. [8], Завадская и др. [2], а также в методических рекомендациях по определению норм рекреационных нагрузок на туристские маршруты и экологические тропы особо охраняемых природных территорий [7]. Авторы настоящей статьи также внесли свой вклад в разработку и апробацию методологических подходов к нормированию рекреационных нагрузок на территориях Алтайского края и Республики Алтай [9–13, 19–20, 24–25].

Целью данной работы, однако, является представление научно-практических результатов, полученных в процессе применения методических подходов к расчету предельно допустимой рекреационной емкости, утвержденных постановлением Правительства РФ от 31.10.2023 № 1809, на примере природного парка “Белуха”.

До вступления в силу данного постановления основу для расчета рекреационных нагрузок составляла “Временная методика определения рекреационных нагрузок на природные комплексы при организации туризма, экскурсий, массового повседневного отдыха и временные нормы этих нагрузок” [1] и принятый Рослесхозом стандарт отрасли ОСТ 56-100-95 “Методы и единицы измерения рекреационных нагрузок на лесные природные комплексы” [26]. Несмотря на их значимость, они

и предлагаемые в них нормы нагрузок не были универсальными, т.к. разрабатывались преимущественно для лесных территорий Европейской части России. Кроме того, в них практически не учитывались иные факторы, кроме экологических.

Именно попыткой разработать единый подход можно считать Типовые правила [18]. Без сомнения, предлагаемые в них показатели не являются универсальными, однако в целом предлагаемый подход количественной оценки разных факторов с учетом их уровня влияния на рекреационные нагрузки и последствия для экосистем необходим для законодательного урегулирования вопросов посещения природных территорий в условиях растущего спроса на экологический туризм.

Таким образом, для природного парка “Белуха” при расчетах ПДРЕ использовались формулы, предлагаемые в Типовых правилах [18] с учетом природных условий и организации территории (табл. 1).

Методика расчета коэффициента управленческой емкости (МС, ед.) представлена в Проекте приказа [16] (формула 1), где предлагается учитывать управленческие параметры (ресурсы), позволяющие напрямую или косвенно регулировать поведение (уровень воздействия) туристов.

$$МС = \prod_{i=1}^n N_{n\ real} / N_{n\ opt}, \quad (1)$$

где $N_{n\ real}$ — текущие управленческие показатели (фактически имеющиеся виды ресурсов по всем управленческим параметрам); $N_{n\ opt}$ — оптимальные управленческие показатели (ресурсы, рассчитанные исходя из режимных ограничений ООПТ, а также иных ограничений, предусмотренных законодательством РФ в сфере туризма, экологии, безопасности и благополучия населения).

Авторы методики [16] рекомендуют при расчете коэффициентов отбирать только показатели, объективно способные повлиять на величину допустимой емкости туристских объектов конкретной ООПТ. Предлагается 18 показателей, объединенных в 3 группы управленческих параметров: обеспеченность ООПТ человеческими ресурсами (гиды, проводники и т.п.), объектами туристской инфраструктуры и услугами.

Территория природного парка “Белуха” крайне слабо обеспечена туристской инфраструктурой. Из-за удаленности, труднодоступности и сложности рельефа возможности туристско-инфраструктурного освоения ООПТ ограничены. Согласно режиму, строительство туробъектов разрешено только в зоне регулируемого рекреационного и хозяйственного использования, которая составляет 63% территории парка — долины рек Кучерла и Аккем (полосой 400 м) и водоохранная зона одноименных озер. Из них всего около 20–30% территории (выровненные относительно пологие участки долин и котловин) обладают необходимыми условиями для организации туризма и которая уже фактически освоена.

Туризм здесь связан с посещением дикой, первозданной природы и минимальным бытовым обустройством мест дневок и ночевки. Обустройство мусорными контейнерами невозможно из-за режима, ограничивающего проезд транспорта вне дорог, и в целом недоступности для транспорта большей части территории. Более целесообразным представляется соблюдение режима “нулевых отходов”, когда запрещается оставлять мусор на территории парка. Важно также отметить, что из-за сложности маршрутов они в основном посещаются группами туристов в сопровождении гидов-проводников.

Таблица 1. Перечень формул, использовавшихся для расчета предельно допустимой рекреационной емкости парка “Белуха” (на основе [18])

Table 1. List of formulas used to calculate the maximum allowable recreational capacity of the Belukha Nature Park (based on [18])

Показатель, единица измерения	Расчетная формула (номер формулы)	Показатель, единица измерения
Предельно допустимая рекреационная емкость ООПТ ($RCC_{ООПТ}$), человек в единицу времени	$RCC_{ООПТ} = \sum_1^m RCC_{qm} \quad (1)$	RCC_{qm} — по формуле 2 m — порядковый номер туристского объекта в границах ООПТ
Предельно допустимая рекреационная емкость туристского объекта m (RCC_q), человек в единицу времени	$RCC_q = PCC_q \times MC \quad (2)$	PCC_q — по формуле 3 MC — коэффициент управленческой емкости, для парка Белуха условно равен 1 (пояснения далее по тексту)
Потенциальная рекреационная емкость туристского объекта (PCC_q), человек в единицу времени	$PCC_q = BCC_q \times \prod_1^n Cf_n \quad (3)$	BCC_q — по формулам 4–6 Cf_n — поправочный коэффициент n -го фактора лимитирующего развитие туризма на ООПТ, ед. Рассчитывается по формуле 10
Базовая рекреационная емкость для площадного туристского объекта (BCC_{qs}), человек в единицу времени	$BCC_{qs} = \frac{A}{Au} \times Rf \times t \quad (4)$	A — площадь туробъекта, м ² Au — площадь необходимая для одного посетителя, м ² , по [16] Rf — по формуле 7 DT — длина однодневного туристского маршрута, км
Базовая рекреационная емкость для однодневных турмаршрутов с небольшой протяженностью без ограничений по времени посещения (BCC_{qp1}), человек в единицу времени	$BCC_{qp1} = \frac{DT}{DG} \times \frac{T_s}{Td} \times GS \times t \quad (5)$	DG — оптимальное расстояние между группами на маршруте, км T_s — длина светового дня, ч Td — среднее время прохождения маршрута с учетом остановок, ч GS — средняя численность группы (в т.ч. сопровождающих), чел.
Базовая рекреационная емкость для многодневных туристских маршрутов (BCC_{qp3}), человек в единицу времени	$BCC_{qp3} = g_{pmin} \times GS \times t \quad (6)$ $g_p = 1 + \left[\frac{V_p(T_s - Td)}{DG} \right] \quad (7)$	g_p — максимальное количество групп, которые могут пройти в сутки по однодневному участку туристского маршрута до окончания светового дня, ед. g_{pmin} — минимальное из рассчитанных для однодневных участков туристского маршрута значений максимального количества групп V_p — средняя скорость передвижения по однодневному участку p туристского маршрута с учетом остановок, км/ч t — принималось равное 1 дню или количеству дней в сезон (60 дней)
Коэффициент, возможного количества возвращений на туробъект одного и того же туриста в течении одного дня (Rf)	$Rf = \frac{T}{Td} \quad (8)$	T — количество часов в сутки, когда туристский объект доступен для посещения, ч Td — среднее время пребывания посетителя на туробъекте, ч

Эти и некоторые другие особенности территории, режима ООПТ и организации туристско-рекреационной деятельности делают невозможным учет показателей, предлагаемых методическими рекомендациями [16] для расчета управленческого коэффициента. Он получается либо равным единице, либо “низводит” итоговую предельно допустимую рекреационную емкость до нуля.

На наш взгляд, подобный коэффициент должен быть всегда повышающим, т.е. рассчитываться исходя из факта наличия каких-либо показателей (ресурсов), позволяющих увеличить потенциальную рекреационную нагрузку. Например, посредством организации экологических троп и стоянок, позволяющих увеличить их пропускную способность без увеличения нагрузки на окружающую природную среду. Понижающими (лимитирующими) коэффициентами являются экологический и социокультурный, о которых речь пойдет далее: они позволяют понизить исходную базовую рекреационную емкость, отражающую фактически физическую вместимость туристских объектов ООПТ без учета устойчивости природных ландшафтов.

Поскольку на территории природного парка объекты обустройства практически отсутствуют, в наших расчетах величина управленческого коэффициента условно принималась равной единице.

В качестве лимитирующих факторов для исследуемого парка определены:

- экологические факторы, включая:
 - пожароопасность;
 - погодные условия;
 - негативное воздействие на почвенно-растительный покров;
 - загрязнение и снижение эстетических свойств ландшафтов;
- факторы социокультурного характера, включая:
 - эффективность эколого-просветительской деятельности и обеспечение безопасности на территории ООПТ;
 - конфликты между рекреационным и иными видами использования территории.

Вклад факторов в итоговую величину предельной рекреационной емкости территории не всегда равнозначен, поэтому рекомендуется [16] использовать только те поправочные коэффициенты, которые действительно лимитируют посещение территории.

Таким образом, для расчета были отобраны характерные и определяемые для территории парка коэффициенты. Перечень предлагаемых поправочных коэффициентов представлен в табл. 2, он состоит из шести коэффициентов экологической и трех социокультурной направленности.

Расчет поправочных коэффициентов (Cf_n) производился по формуле (2):

$$Cf_n = 1 - \frac{Lm_n}{Tm_n}, \quad (2)$$

где Lm_n — величина лимитирующего фактора; Tm_n — общая величина оцениваемого фактора в пределах территории ООПТ или отдельного туробъекта; n — порядковый номер поправочного коэффициента (1, 2... n).

Учитывая природоохранные цели создания ООПТ, лимитирующие факторы экологического характера должны выступать основными регуляторами ПДРЕ.

При этом природные условия нередко изначально ограничивают возможности экстенсивного развития туризма. В частности, горный рельеф и климат, характерные

для территории природного парка “Белуха”, в совокупности с удаленностью от экономических центров региона обусловили значительно менее интенсивное рекреационное освоение этих живописных и богатых природно-рекреационными ресурсами мест. Из 2.6 миллиона туристов, прибывших Республику Алтай в 2023 г., менее 1% (в среднем 4.5 тысячи человек) посетили природный парк “Белуха”.

Суровый климат с коротким летом и длительным периодом сохранения снежного покрова (местами до середины июня) значительно сокращает период “эксплуатации” природных ландшафтов для целей туризма. Сезон здесь составляет около 60–70 дней — (конец июня—начало сентября).

Таким образом, даже при условии дальнейшего роста рекреационных нагрузок на этой территории всегда будут сохраняться лимитирующие факторы природного характера.

Повлиять на уровень рекреационной емкости территории парка также могут фактор пожароопасности, тесно связанный с периодами жары и засухи, и фактор неблагоприятной погоды. Учитывая нарастающий характер изменений климата, учет поправочных коэффициентов ($Cf_{1,2}$) подобного рода представляется необходимым.

Так, разведение костров, без которых прохождение многодневных маршрутов невозможно, в пожароопасный период может создавать дополнительные риски. Неблагоприятная погода, связанная с ливневыми дождями, грозами, сильным ветром и аномальными температурами, с одной стороны, увеличивает риски травмирования или даже гибели туристов, а с другой — усиливает их воздействие. Переувлажненные почвы интенсивнее разрушаются под воздействием вытаптывания особенно на конных маршрутах. При интенсивных ливнях усиливается плоскостной сыв, что может приводить к усилению эрозии троп на склонах.

Вытаптывание один из основных негативных факторов прямого воздействия туристов на природные комплексы. Его малозаметные на начальных этапах последствия, накапливаясь в компонентах природной среды (почвенный и растительный покров), изменяют состав растительности в окрестностях троп и в местах стоянок туристов.

В первую очередь в составе растительности исчезают малоустойчивые лесные и высокие луговые виды трав, как правило, среди них оказываются и краснокнижные. Учитывая особый статус территории, предполагающий сохранение редких и исчезающих видов растений введение поправочного коэффициента на фактор риска сокращения видового разнообразия необходим (Cf_3).

Важно также отметить, что даже при регулируемых рекреационных нагрузках “отчуждение” части природных территорий парка для рекреационных нужд неизбежно. Под воздействием вытаптывания на смену лесному и луговому разнотравью приходят устойчивые к механическому воздействию синантропные и сорные виды трав (манжетка, клевер, мятлик, подорожник, одуванчик и т.д.), но и они исчезают из-за чрезмерного уплотнения почвы и постоянных повреждений надземной части в период вегетации на тропах и активно используемых стоянках. Почва, лишенная растительного покрова на склонах, вымывается, оголяя подстилающую породу, а на выровненных участках в углублениях рельефа появляются переувлажненные участки, огибая которые туристы могут увеличивать зону воздействия вытаптывания.

Следовательно, риски увеличения площади дигрессии почвенно-растительного покрова необходимо учитывать в поправочных коэффициентах рекреационной емкости, так же как и участки с нарушенным древостоем. Корневая система деревьев

Таблица 2. Перечень поправочных коэффициентов для расчета предельно допустимой рекреационной емкости территории природного парка “Белуха” (на основе [16])**Table 2.** List of correction factors for calculate the maximum allowable recreational capacity of the Belukha Nature Park (based on [16])

Группы факторов риска	Индикаторы факторов риска	Поправочные коэффициенты (Cf_n)
Экологические		
Пожароопасность	Наступление периода высокого класса пожарной опасности	(Cf_1) Разница между 1 и отношением продолжительности пожароопасного периода (среднегогодовое значение) к общей продолжительности туристского сезона
Погодные условия	Неблагоприятные погодные условия (дни с ливневыми дождями, грозами и сильным ветром, аномально высокой температурой)	(Cf_2) Разница между 1 и отношением периода с неблагоприятными погодными условиями (среднегогодовое значение) к общей продолжительности туристского сезона
Негативное воздействие на почвенно-растительный покров	Сокращение видового разнообразия редких растений	(Cf_3) Разница между 1 и отношением количества редких видов растений, исчезнувших с территории туристских объектов, к общему количеству “краснокнижных” видов на ООПТ
	Рекреационная дигрессия напочвенного покрова	(Cf_4) (для площадных участков) Разница между 1 и отношением площади с вытоптанной растительностью к общей площади туристского объекта (Cf_4) (для троп) Разница между 1 и отношением общей протяженности несанкционированных троп к общей протяженности туристского маршрута
	Угнетение жизненного состояния деревьев	(Cf_5) Разница между 1 и отношением площади/протяженности участков с поврежденными деревьями (оголенные корни, поврежденные стволы и т.п.) к общей площади/протяженности туристского объекта
Загрязнение и снижение эстетики ландшафтов	Замусоривание территории твердыми коммунальными отходами (ТКО)	(Cf_6) Разница между 1 и отношением площади участков, замусоренных ТКО к общей площади туристского объекта
Социокультурные		
Эффективность эколого-просветительской деятельности и обеспечение безопасности на территории ООПТ	Реальный уровень осведомленности туристов об особенностях и условиях осуществления туризма на ООПТ	(Cf_7) Разница между 1 и отношением количества нарушений, выявленных на ООПТ в ходе рейдов, к общему количеству туристов за сезон
	Реальный уровень опасности туристских маршрутов	(Cf_8) Разница между 1 и отношением количества туристов, пострадавших на туристском маршруте, к общему количеству туристов за сезон
Конфликты между рекреационным и иными видами использования территории	Риски пересечения туристскими тропами земель, используемых населением для сенокосов, пастбы скота и т.д.	(Cf_9) Разница между 1 и отношением площади земель с/х назначения к общей площади рекреационной зоны парка

также угнетается вытаптыванием, часть корней, расположенных близко к земле, оголяется, мелкие корни, через которые происходит поступление минеральных питательных веществ, угнетаются. Кроме того, нередко туристы повреждают стволы деревьев (вбивают гвозди, снимают кору, делают затески, зарубки и т.п.), ломают ветви, используя их как топливо для костра (Cf_3). Таким образом, посредством расчета поправочных коэффициентов Cf_{3-5} учитывается лимитирующий фактор негативного воздействия туристов на почвенно-растительный покров.

Последний экологический коэффициент (Cf_6) учитывает площадь замусоренности твердыми коммунальными отходами (далее — ТКО). Для природного парка это острая проблема, характерная для всех популярных троп. Как уже отмечалось выше, она сложно разрешима из-за отсутствия финансовых и транспортных возможностей по организации регулярного вывоза мусора.

Рекреационная емкость территории ООПТ и ее отдельных туристских объектов может лимитироваться не только природными, но и социальными факторами.

В Проекте приказа Минприроды РФ [16] расчет социальных поправочных коэффициентов предлагается проводить на основе данных соцопросов и/или анкетирования туристов и граждан, проживающих на территории ООПТ. В природном парке “Белуха” отсутствуют населенные пункты, а также нет сведений о соцопросах туристов и жителей ближайших сел, поэтому показатели для расчета поправочных коэффициентов социокультурного характера (Cf_{7-9}) были подобраны экспертным путем.

Первый (Cf_7) связан с эффективностью эколого-просветительской деятельности, оцениваемой на основании осведомленности туристов об условиях осуществления туризма на ООПТ, т.е. через определение доли туристов, нарушающих природоохранный режим ООПТ. Высокий процент таких туристов приведет к ускоренной деградации природной среды и, напротив, разные экопросветительские меры (установка аншлагов, раздача буклетов, информационное продвижение в соцсетях и т.п.) должны повысить сознательность посетителей.

Второй поправочный коэффициент (Cf_8) социального плана отражает реальный уровень безопасности туристских маршрутов разной категории сложности. Предлагается его оценивать на основании реальных случаев чрезвычайных ситуаций (далее — ЧС) с туристами. Без сомнения, рост числа таких случаев является тревожным сигналом, указывающим на необходимость введения дополнительных мер по ограничению посещаемости или даже изменению/закрытию маршрута. В условиях отсутствия данных о количестве происшествий на конкретных маршрутах в данной работе выполнены примерные расчеты, исходя из официальных данных МЧС за 2023 г. для всей республики.

На 2,6 миллиона туристов, посетивших в 2023 г. регион, произошло 23 происшествия ЧС, в результате которых погибли 7 человек, 35 — получили травмы, спасен 61 человек, 1 — пропал без вести, т.е. в той или иной степени пострадали 0,04% туристов от всего потока. При уровне посещаемости парка “Белуха” в 4,5 тысячи человек получается, что 2 человека находятся в зоне риска.

Последний поправочный коэффициент (Cf_9) отражает риски возможных конфликтных ситуаций с местным населением из-за пребывания туристов в зонах традиционного природопользования (пастбища, сенокосы). Особенностью создания и функционирования региональных ООПТ является сохранение хозяйственного использования территории без изъятия земель. Известно, что на территории природного парка “Белуха” функционирует несколько крестьянских (фермерских) хозяйств общей площадью около 100 га, поэтому коэффициент рассчитывался через соотношение этой площади с рекреационной зоной.

Результаты и обсуждение

Анализ проведенных исследований и полученных результатов позволяет говорить о том, что предлагаемый в нормативных документах методический подход к оценке ПДРЕ ООПТ имеет целый ряд сложностей, не всегда разрешимых на практике. Это отчасти связано с особенностями правового статуса и режима региональных особо охраняемых территорий, но также есть ряд методических вопросов, которые могут быть решены посредством адаптации показателей и подходов к их определению, исходя из особенностей природно-рекреационного потенциала и туристической деятельности на конкретной ООПТ.

Одним из положительных моментов использованной методики является подход к оценке рекреационной емкости без учета всей площади ООПТ или даже ее рекреационной зоны, а через расчет линейных и площадных туристских объектов. Одной из главных особенностей воздействия туристско-рекреационной деятельности является ее локальность. В большинстве случаев негативные последствия, выражающиеся в вытаптывании и деградации почвенно-растительного покрова, сконцентрированы в виде полосы 3–5 м от троп и площадных объектов. В зависимости от количества посещающих их туристов и организованности территории негативные изменения на самих туробъектах могут быть проявлены в большей или меньшей степени.

Для природного парка “Белуха”, как уже отмечалось выше, из-за сложного рельефа лишь порядка 30% территории могут быть задействованы для создания туристской инфраструктуры. При этом большая часть этой территории (долины крупных рек и озер) уже освоена. Для оценки рекреационной емкости были выбраны 4 основные тропы, через которые посетители парка попадают на его территорию, а также 8 радиальных троп к самым популярным природным достопримечательностям и 10 основных туристских стоянок, в т.ч. 3 турбазы, расположенные вблизи троп. Их количественная характеристика и базовая рекреационная емкость, рассчитанная по формулам 4–8, представлены в таблицах 3 и 4.

Важно отметить, что такой локальный подход позволяет учитывать особенности рекреационного природопользования. В масштабах площади природного парка и ландшафтов нарушения данных локальных участков экосистем не представляет серьезной угрозы, однако их ценность как рекреационных ресурсов значительно выше экологической.

Одной из важных составляющих рассмотренного методического подхода является использование широкого спектра корректирующих коэффициентов, призванных учесть факторы экологического, социального, культурного и инфраструктурного плана, “реагирующих” на рост туристического потока. Иными словами, это индикаторы интенсивности воздействия рекреационной деятельности: чем более выражены их изменения, тем ниже итоговое значение ПДРЕ.

На практике из 9 выбранных коэффициентов (Cf_1 – Cf_9) наиболее выраженное корректирующее действие ожидаемо оказывают экологические факторы, в частности нарушение почвенно-растительного покрова (Cf_4 – Cf_5) и замусоренность территории (Cf_6), оценка которой в условиях труднодоступной территории природного парка “Белуха” имеет крайне важное значение (табл. 5).

Оценка текущего экологического состояния туристских объектов проводилась в рамках полевых исследований в 2023–2024 гг., в частности оценивалась встречаемость краснокнижных видов на туробъектах и в непосредственной близости от них, примерная площадь участков с сильно нарушенным (по проективному покрытию) растительным покровом, участков с оголенными корнями и поврежденными деревьями, для троп протяженность таких участков.

Таблица 3. Количественная характеристика основных туристских троп на территории природного парка “Белуха” и величины их базовой рекреационной емкости**Table 3.** Quantitative characteristics of the main tourist trails in the Belukha Nature Park and the values of their basic recreational capacity

m	Наименование туристского объекта	Количественные характеристики								
		DT	DG	Ts	Td	GS	g _p	V _p	BCC _q день	BCC _q сезон
Многодневные тропы										
1	Кучерлинская	23.5	0.3	12	15	10	9	1.3	90	5400
...	1 день	6.0	0.3	12	5	10	31	1.3	310	18600
...	2 день	17.5	0.3	12	10	10	9	1.3	90	5400
2	Аккемская	23.8	0.3	12	16	10	18	1.5	180	10800
...	1 день	12.0	0.3	12	8	10	21	1.5	210	14910
...	2 день	11.8	0.3	12	8	10	18	1.5	180	10800
3	Кара-Тюрек	15.6	0.1	12	16	7	31	1	217	13020
...	1 день	7.0	0.1	12	7	7	51	1	357	21420
...	2 день	8.6	0.1	12	9	7	31	1	217	13020
4	Ороктойская	64.8	0.1	12	29	7	24	2.2	168	10080
...	1 день	24.0	0.1	12	10	7	49	2.4	343	20580
...	2 день	16.0	0.1	12	8	7	81	2	567	34020
...	3 день	24.8	0.1	12	11	7	24	2.3	168	10080
Обходные и радиальные тропы										
5	Верхкучерлинская	19.1	0.3	12	10	7	13	1.9	91	5460
6	Аргутская	7.5	0.3	12	10	5	6	0.8	30	1800
7	Долина 7 озер	12.4	0.2	12	10	5	13	1.2	65	3900
8	Белуха	4.5	0.3	12	6	5	25	1.2	125	7500
9	к вдп. Текелю	1.3	0.3	12	6	5	5	0.2	25	1500
10	к оз. Горных духов	1.7	0.3	12	6	10	7	0.3	70	4200
11	к оз. Дарашколь	6.8	0.3	12	10	5	5	0.7	25	1500
12	к вдп. Кони-Айры	4.6	0.3	12	10	5	4	0.5	20	1200

Также на площадных участках проводилась диагностика стадий рекреационной дигрессии исходя из площади участков с сильно нарушенным почвенно-растительным покровом (по ОСТ 56-100-95). На тропах по отдельным участкам в зависимости от состояния полотна и растительности на прилегающей территории: 0 — наиболее устойчивые участки тропы, не поддающиеся разрушению (курумники, скальник, объекты обустройства); 1 — полотно тропы узкое или слабовыраженное, с небольшим углублением относительно, состав прилегающих фитоценозов практически

Таблица 4. Количественная характеристика основных туристских стоянок на территории природного парка “Белуха” и величины их базовой рекреационной емкости**Table 4.** Quantitative characteristics of the main tourist parking lots in the Belukha Nature Park and the values of their basic recreational capacity

<i>m</i>	Наименование туристского объекта	Количественные характеристики						
		A	Au	Td	T	Rf	BCC _q день	BCC _q сезон
13	Стоянка МЧС	5347.1	500	24	12	2	21	1519
14	Метеостанция “Аккем”	6731.4	1000	24	12	2	13	956
15	Метеостанция “Кара-Тюрек”	12785.9	2000	24	12	2	13	908
16	Стоянки на оз. Аккем	15086.6	3000	24	12	2	10	714
17	Турбаза “Кучерла”	23117.5	3000	24	12	2	15	1094
18	Стоянки на оз. Кучерлинское	27103.7	3000	24	12	2	18	1283
19	«Кедровая стоянка»	3133.2	500	24	12	2	13	890
20	Турбаза “Горный приют Ак-Кем”	9452.9	500	24	12	2	38	2685
21	Стоянка “Три березы”	10000.0	500	24	12	2	40	2840
22	Турбаза “Вита”	1000.0	500	24	12	2	4	284

не изменен, оголенных корней нет; 2 — корни стоящих рядом деревьев местами обнажены, тропа четко выражена (глубина более 7–10 см), в непосредственно прилегающих фитоценозах встречаются луговые устойчивые к вытаптыванию виды; 3 — к основному хорошо выраженному полотну тропы примыкают дополнительные тропы-дублеры в обход различных препятствий (лужи, камни, деревья), местами следы развития эрозии, корни многих деревьев оголены, в составе фитоценозов начинают преобладать устойчивые виды; 4 — полотно тропы сильно углублено, местами почвенный покров отсутствует (размыт), по обеим сторонам активно разрастаются устойчивые виды; 5 — на основном полотне тропы и часто на тропах-дублерах отсутствует почвенный горизонт, видовой состав сильно отличается от фоновых фитоценозов.

На период исследования экологическое состояние троп и небольших стоянок на них оценивалось как удовлетворительное, преобладают 2-я и 3-я стадии дигрессии (см. коэффициенты Cf_4 – Cf_5 в табл. 5), но более проявлено замусоривание. На основных площадных участках преобладали 4-я и 5-я стадии, однако важно отметить, что в целом ввиду природных особенностей территории (небольшая мощность почвенного покрова, слабо развитый растительный покров) и функциональной необходимости размещения большего числа туристов в этих зонах неизбежны более выраженные изменения исходных природных комплексов. Для предотвращения “разрастания” рекреационной дигрессии необходимо проводить обустройство территории, позволяющее принимать большее количество посетителей без увеличения нагрузки на природную среду (настилы, покрытие дорожек, площадки для палаток, перемещение и размещение только в их пределах).

Таблица 5. Расчетные величины рекреационной емкости для основных туристских объектов природного парка “Белуха”

Table 5. Estimated values of recreational capacity for the main tourist facilities of the Belukha Nature Park

m		Поправочные коэффициенты									Рекреационная емкость					
		Cf ₁	Cf ₂	Cf ₃	Cf ₄	Cf ₅	Cf ₆	Cf ₇	Cf ₈	Cf ₉	Π ₁ ⁿ Cf _n	MC	BCC _q	PCC _q	RCC _q в день	RCC _q в сезон
Многодневные тропы																
Обходные и радиальные тропы																
1	0.93	0.97	0.88	0.90	0.50	0.48	0.99	0.99	0.97	0.97	0.16	1.0	90	14	14	864
2	0.93	0.97	0.88	0.90	0.55	0.60	0.99	0.99	0.97	0.97	0.23	1.0	180	41	41	2484
3	0.93	0.97	0.88	0.98	0.62	0.46	0.99	0.99	0.97	0.97	0.21	1.0	217	46	46	2734
4	0.93	0.97	0.88	0.98	0.48	0.45	0.99	0.99	0.97	0.97	0.16	1.0	168	27	27	1613
5	0.93	0.97	0.88	0.98	0.90	0.53	0.99	0.99	0.97	0.97	0.35	1.0	91	32	32	1911
6	0.93	0.97	0.88	0.98	0.99	0.54	0.99	0.99	0.97	0.97	0.39	1.0	30	12	12	702
7	0.93	0.97	0.88	0.99	0.75	0.63	0.99	0.99	0.97	0.97	0.35	1.0	65	23	23	1365
8	0.93	0.97	0.88	0.99	0.77	0.68	0.99	0.99	0.97	0.97	0.40	1.0	125	49	49	2925
9	0.93	0.97	0.88	0.99	0.76	0.72	0.99	0.99	0.97	0.97	0.41	1.0	25	10	10	615
10	0.93	0.97	0.88	0.99	0.75	0.70	0.99	0.99	0.97	0.97	0.39	1.0	70	27	27	1638
11	0.93	0.97	0.88	0.99	0.70	0.69	0.99	0.99	0.97	0.97	0.36	1.0	25	9	9	540
12	0.93	0.97	0.88	0.99	0.74	0.67	0.99	0.99	0.97	0.97	0.37	1.0	20	7	7	444
Стоянки и турбазы																
13	0.93	0.97	0.88	0.86	0.81	0.94	0.99	0.99	0.97	0.97	0.49	1.0	21	10	10	600
14	0.93	0.97	0.88	0.92	0.89	0.92	0.99	0.99	0.97	0.97	0.57	1.0	13	7	7	420
15	0.93	0.97	0.88	0.97	0.98	0.95	0.99	0.99	0.97	0.97	0.68	1.0	13	8	8	480
16	0.93	0.97	0.88	0.21	0.93	0.25	0.99	0.99	0.97	0.97	0.04	1.0	10	1	1	60
17	0.93	0.97	0.88	0.73	0.85	0.92	0.99	0.99	0.97	0.97	0.43	1.0	15	6	6	360
18	0.93	0.97	0.88	0.28	0.68	0.27	0.99	0.99	0.97	0.97	0.04	1.0	18	1	1	60
19	0.93	0.97	0.88	0.70	0.83	0.21	0.99	0.99	0.97	0.97	0.09	1.0	13	1	1	60
20	0.93	0.97	0.88	0.24	0.94	0.90	0.99	0.99	0.97	0.97	0.15	1.0	38	5	5	300
21	0.93	0.97	0.88	0.64	0.92	0.25	0.99	0.99	0.97	0.97	0.11	1.0	40	4	4	240
22	0.93	0.97	0.88	0.24	0.95	0.97	0.99	0.99	0.97	0.97	0.17	1.0	4	1	1	60
Природный парк “Белуха” (RCC _{общ})															341	20475

Именно этот момент может быть учтен при пересмотре коэффициента управленческой емкости, о чем говорилось выше, в разделе “Материалы и методы”. Исходя из расчетных значений ПДРЕ площадных объектов (табл. 5), в основном их могут посещать 1–6 человек в день, что явно не соответствует реальной ситуации.

В целом выбранные для территории природного парка лимитирующие коэффициенты могут и должны пересматриваться в зависимости от результатов мониторинговых исследований, а полученные расчетные результаты — рассматриваться как базовые ориентиры для организации и управления территорией ООПТ.

Заключение

Полученные значения предельно допустимой рекреационной емкости для природного парка “Белуха” (его туристских объектов) составили 341 человек в день и 20 475 человек в сезон, что в 4 раза меньше показателей базовой рекреационной емкости, пониженной за счет лимитирующих экологических и социокультурных факторов.

При этом суммарное значение предельно допустимой рекреационной емкости для трех основных троп (Кучерлинская, Аккемская и Ороктойская) по которым туристы в основном попадают на территорию парка, составило 4.961 тысячи человек, что близко к современному уровню посещаемости парка — 3.5–5.0 тысячи человек и составляет 15–25% от общего потенциала рекреационной емкости природного парка.

Текущее экологическое состояние природных комплексов в пределах отмеченных троп удовлетворительное: полотно тропы четко выражено, в основном с сохранившимся почвенным покровом, есть участки с оголившимися корнями, но эрозия встречается редко, есть более слабо выраженные тропы-дублеры, состояние прилегающих фитоценозов преимущественно не выходит за пределы их устойчивости. Все это также говорит о допустимых уровнях существующих рекреационных нагрузок на большей части территории парка.

Однако несколько более напряженная экологическая ситуация отмечается на крупных площадных объектах — стоянках и турбазах, где участки с вытоптаным напочвенным покровом могут достигать 70% их площади. Во многом это связано с небольшой мощностью почвенного покрова и слабо развитым растительным покровом. Расчетные значения ПДРЕ для них составили для них всего 1–6 человек, что, безусловно, не соответствует существующему уровню посещаемости. Учитывая необходимость размещения туристов на подобных крупных площадках, вблизи основных достопримечательностей и мест ночлега необходимо проводить обустройство территории.

Проведенные исследования имеют высокую научную значимость, поскольку позволяют перейти от эмпирических оценок к научно обоснованному планированию рекреационного использования территории. Полученные результаты служат основой для разработки эффективной системы управления туризмом в природном парке “Белуха”, направленной на сохранение уникальных природных экосистем и обеспечение устойчивого развития исследуемого района целом.

Практическое применение ПДРЕ предполагает обязательное ведение мониторинга экологического состояния туристских объектов, выработку и проведение мероприятий по организации их территорий. Предполагается, что значения лимитирующих коэффициентов, а также повышающий управленческий коэффициент будут пересматриваться на основе обновленных данных мониторинга. Такой подход

позволит обоснованно регулировать туристский поток, перераспределяя нагрузку или при необходимости ограничивая посещение (закрытие участков, введение пропускного режима и т.д.).

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Института водных и экологических проблем СО РАН (№ FUFZ-2021-0007).

Список литературы

1. Временная методика определения рекреационных нагрузок на природные комплексы при организации туризма, экскурсий, массового повседневного отдыха и временные нормы этих нагрузок. М.: Изд-во Госкомлеса СССР, 1987. 34 с.
2. Завадская А.В. и др. Механизмы регулирования туристских потоков в Долине гейзеров (Камчатка) / А.В. Завадская, Е.В. Лебедева, В.П. Чижова // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. № 5. М., 2021. С. 63–77.
3. Казанская Н.С. Изучение рекреационной дигрессии естественных группировок растительности / Н.С. Казанская // Известия Академии наук СССР. Серия географическая. № 1. М., 1972. С. 52–59.
4. Калихман А.Д. и др. Методика “Пределов допустимых изменений” на Байкале — участке Всемирного наследия ЮНЕСКО / А.Д. Калихман, А.Д. Педерсен, Т.П. Савенкова, А.Я. Сукнев. Иркутск: Оттиск, 1999. 100 с.
5. Красная книга Республики Алтай (растения). Горно-Алтайск, 2007. 272 с.
6. Красная книга Республики Алтай (растения). 3-е изд., перераб. и доп. Горно-Алтайск, 2017. 267 с.
7. Методические рекомендации по определению норм рекреационных нагрузок на туристские маршруты и экологические тропы особо охраняемых природных территорий. Нур-Султан, 2020 г. 78 с.
8. Непомнящий В.В. и др. Методические рекомендации по определению рекреационной емкости особо охраняемых природных территорий / В.В. Непомнящий, А.В. Завадская, В.П. Чижова. Новосибирск: Наука, 2021. 96 с.
9. Николаева О.П. Геоэкологический подход в рекреационных исследованиях / О.П. Николаева / Вып. 2: Социология социальной работы: актуальные проблемы / под ред. Л.Г. Гусяковой. Чита: Изд-во ЗабГГПУ, 2007. С. 120–123.
10. Николаева О.П. Геоэкологические условия формирования территориальной эколого-рекреационной системы Алтайского края / О.П. Николаева // Мир науки, культуры, образования. Горно-Алтайск, 2011. № 4 (29). Часть 1. С. 382–387.
11. Николаева О.П. Методические подходы к оценке экологорекреационного потенциала Алтайского края / О.П. Николаева // Экономика. Сервис. Туризм. Культура (ЭСТК-2008): X Международная научно-практическая конференция: сборник статей. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2008. С. 264–267.
12. Николаева О.П. Нормирование рекреационных нагрузок на природные комплексы Алтайского края / О.П. Николаева // Журнал “Образование и социальное развитие регионов”. № 3–4. М., 2008. С. 157–161.
13. Николаева О.П. Оценка эколого-рекреационного потенциала для создания устойчивой рекреационной системы Алтайского края / О.П. Николаева // Вестник Томского государственного университета. № 336. Томск, 2010. С. 192–197.
14. О создании природного парка «Белуха: постановление Правительства Республики Алтай от 10.06.1997 № 198. URL: <https://docs.cntd.ru/document/473312526> (дата обращения

24.02.2024 г.). Режим доступа: Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов.

15. Об особо охраняемых природных территориях: Федеральный закон от 14.03.1995 № 33-ФЗ URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102034651> (дата обращения: 23.10.2024). Режим доступа: Официальное опубликование правовых актов.

16. Об утверждении методик расчета коэффициентов управленческой емкости, поправочных коэффициентов, а также определения площади туристского объекта, необходимой для одного посетителя, при осуществлении туризма: проект приказа Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/56893772/> (дата обращения: 03.11.2024). Режим доступа: Официальное опубликование правовых актов.

17. Об утверждении Порядка расчета предельно допустимой рекреационной емкости особо охраняемых природных территорий республиканского значения при осуществлении туризма на территории Республики Алтай: приказ природных ресурсов и экологии Республики Алтай от 08.02.2024 № П-03-01/0002. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0401202402090001> (дата обращения: 03.11.2024). Режим доступа: Официальное опубликование правовых актов.

18. Об утверждении типовых правил расчета предельно допустимой рекреационной емкости особо охраняемых природных территорий регионального и местного значения при осуществлении туризма: постановление Правительства Российской Федерации от 31.10.2023 № 1809. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202311020056?index=2> (дата обращения: 23.10.2024). Режим доступа: Официальное опубликование правовых актов.

19. Павлова К.С. и др. Методические подходы к оценке экологического состояния природных комплексов рекреационных территорий / К.С. Павлова, Ю.В. Робертус // Проблемы региональной экологии. № 5. М.: ООО Издательский дом “Камертон”, 2014. С. 54–59.

20. Павлова К.С. Оценка геоэкологических последствий неорганизованного массового отдыха на территории Катунского рекреационного района (Республика Алтай): 25.00.36 — Геоэкология (по отраслям): автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук / Павлова Ксения Сергеевна; Институт водных и экологических проблем СО РАН. Барнаул, 2015. 22 с.

21. Репшас Э.А. Оптимизация рекреационного лесопользования (на примере Литвы) / Э.А. Репшас. М.: Наука, 1994. 240 с.

22. Репшас Э.А. Особенности дигрессии и регрессии рекреационных лесов Литовской ССР / Э.А. Репшас // Рекреационное лесопользование в СССР. М.: Наука, 1983. С. 44–45.

23. Рысин Л.П. и др. Влияние рекреационного лесопользования на растительность / Л.П. Рысин, Г.А. Полякова // Природные аспекты рекреационного использования леса. М.: Наука, 1987. С. 4–26.

24. Савенко К.С. и др. К вопросу оценки экологического состояния рекреационных территорий (на примере Республики Алтай) / К.С. Савенко, Ю.В. Робертус, В.А. Ситникова // В сборнике: Рекреационная география и тренды развития туризма. Материалы III международной научно-практической конференции. Иркутск, 2021. С. 95–98.

25. Савенко К.С. и др. Новые подходы к оценке экологического состояния рекреационных ландшафтов Республики Алтай / К.С. Савенко, Ю.В. Робертус // География и природные ресурсы. Т. 42. № 2. — Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2021. С. 59–68. <https://doi.org/10.15372/GIPR20210207>

26. Стандарт отрасли ОСТ 56-100-95 “Методы и единицы измерения рекреационных нагрузок на лесные природные комплексы”: приказ Рослесхоза от 20.07.1995 № 114. URL:

<https://jurbase.ru/texts/sector154/tez54810.htm> (дата обращения: 14.05.2025). Режим доступа: Официальное опубликование правовых актов.

27. Таран И.В. Рекреационные леса Западной Сибири / И.В. Таран. Новосибирск: Наука, 1985. 230 с.

28. Чижова В.П. Рекреационные нагрузки в зонах отдыха / В.П. Чижова М.: Лесная промышленность, 1977. 48 с.

29. Чижова В.П. Подходы к определению емкости рекреационных территорий / В.П. Чижова // Охрана окружающей среды в городах. Научные труды по охране природы. Вып. 9. Тарту: Тартунский гос. ун-т, 1985. С. 74–78.

30. Чижова В.П. Экологический туризм: географический аспект: учебное пособие / В.П. Чижова, Л.И. Севостьянова. Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2007. 276 с.

31. Эмсис И.В. Опыт прикладного изучения лесов рекреационного назначения в Латвии / И.В. Эмсис // Оптимизация рекреационного лесопользования. М.: Наука, 1990. С. 15–23.

32. Эмсис И.В. Рекреационное использование лесов Латвийской ССР / И.В. Эмсис Рига: Зинатне, 1989. 133 с.

Calculation of the Maximum Allowable Recreational Capacity of the Territory of the Belukha Nature Park

O.P. Nikolaeva^{1,2,*}, K.S. Savenko², R.V. Lybimov², V.A. Sitnikova²

¹Gorno-Altai State University, Gorno-Altai, Russia,

²Gorno-Altai Branch of the Institute of Water and Environmental Problems SB RAS, Kyzyl-Ozek, Russia

**E-mail: nikooool@mail.ru*

Received 27.02.2025

Revised 13.05.2025

Accepted 09.06.2025

The article provides a calculation of the maximum allowable recreational capacity of the territory of the Belukha Nature Park, carried out in accordance with the Standard Rules approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated 31.10.2023 No. 1809 [18]. The calculation of the correction coefficients required to determine the specified capacity was based on the methodology from the Draft Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation [16]. The maximum allowable recreational capacity was calculated for 4 multi-day routes, 8 radial and bypass trails, and 10 main tourist camps (camp sites). On average, the maximum allowable recreational capacity of all tourist facilities in the Belukha Nature Park was 341 people per day or 20475 people per season. At the same time, for the most popular routes, the maximum allowable recreational capacity was about 5,000 people. This value corresponds to the current level of visiting the natural park. The calculated results obtained can be considered as basic guidelines for organizing and conducting further monitoring studies of this territory.

Keywords: nature park, Belukha, basic recreational capacity, maximum allowable recreational capacity, recreational digression, hiking trails, parking lots, Altai Republic

References

1. Vremennaya metodika opredeleniya rekreacionny`x nagruzok na prirodny`e komplekсы` pri organizacii turizma, e`kursij, massovogo povsednevnogo otdy`xa i vremenny`e normy` e`tix nagruzok. M.: Izd-vo Goskomlesa SSSR, 1987. 34 s.
2. Zavadsкая A.V. i dr. Mexanizmy` regulirovaniya turistskix potokov v Doline gejzerov (Kamchatka) / A.V. Zavadsкая, E.V. Lebedeva, V.P. Chizhova // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya. № 5. M., 2021. S. 63–77.
3. Kazanskaya N.S. Izuchenie rekreacionnoj digressii estestvenny`x gruppirovok rastitel`nosti / N.S. Kazanskaya // Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya geograficheskaya. № 1. M., 1972. S. 52–59.
4. Kalixman A.D., i dr. Metodika “Predelov dopustimy`x izmenenij” na Bajkale — uchastke Vsemirnogo naslediya YuNESKO / A.D. Kalixman, A.D. Pedersen, T.P. Savenkova, A.Ya. Suknev. Irkutsk: Ottisk, 1999. 100 s.
5. Krasnaya kniga Respubliki Altaj (rasteniya). Gorno-Altajsk, 2007. 272 s.
6. Krasnaya kniga Respubliki Altaj (rasteniya). 3-e izd. pererab. i dop. Gorno-Altajsk, 2017. 267 s.
7. Metodicheskie rekomendacii po opredeleniyu norm rekreacionny`x nagruzok na turistskie marshruty` i e`kologicheskie tropy` osobo oxranyaemy`x prirodny`x territorij. Nur-Sultan, 2020 g. 78 s.
8. Nepomnyashnij V.V. i dr. Metodicheskie rekomendacii po opredeleniyu rekreacionnoj yomkosti osobo oxranyaemy`x prirodny`x territorij / V.V. Nepomnyashnij, A.V. Zavadsкая, V.P. Chizhova. Novosibirsk: Nauka, 2021. 96 s.
9. Nikolaeva O.P. Geoe`kologicheskij podxod v rekreacionny`x issledovaniyax / O.P. Nikolaeva / Vy`p.2: Sociologiya social`noj raboty`: aktual`ny`e problemy` / pod red. L.G. Guslyakovoj. Chita: Izd-vo ZabGGPU, 2007. S. 120–123.
10. Nikolaeva O.P. Geoe`kologicheskie usloviya formirovaniya territorial`noj e`kologo-rekreacionnoj sistemy` Altajskogo kraja / O.P. Nikolaeva // Mir nauki, kul`tury`, obrazovaniya. Gorno-Altajsk, 2011. № 4 (29). Chast` 1. S. 382–387.
11. Nikolaeva O.P. Metodicheskie podxody` k ocenke e`kologorekreacionnogo potenciala Altajskogo kraja / O.P. Nikolaeva // E`konomika. Servis. Turizm. Kul`tura (E`STK-2008): X Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya: sbornik statej. Barnaul: Izd-vo AltGTU, 2008. S. 264–267.
12. Nikolaeva O.P. Normirovanie rekreacionny`x nagruzok na prirodny`e komplekсы` Altajskogo kraja / O.P. Nikolaeva // Zhurnal “Obrazovanie i social`noe razvitie regionov”. № 3–4. M., 2008. S. 157–161.
13. Nikolaeva O.P. Ocenka e`kologo-rekreacionnogo potenciala dlya sozdaniya ustojchivoj rekreacionnoj sistemy` Altajskogo kraja / O.P. Nikolaeva // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. № 336. Tomsk, 2010. S. 192–197.
14. O sozdanii prirodnogo parka «Beluxa: postanovlenie Pravitel`stva Respubliki Altaj ot 10.06.1997 № 198 — URL: <https://docs.cntd.ru/document/473312526> (data obrashheniya 24.02.2024). Rezhim dostupa: E`lektronny`j fond pravovy`x i normativno-texnicheskix dokumentov.
15. Ob osobo oxranyaemy`x prirodny`x territoriyax: Federal`ny`j zakon ot 14.03.1995 № 33-FZ URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102034651> (data obrashheniya: 23.10.2024). Rezhim dostupa: Oficial`noe opublikovanie pravovy`x aktov.
16. Ob utverzhdenii metodik rascheta koe`fficientov upravlencheskoj emkosti, popravochny`x koe`fficientov, a takzhe opredeleniya ploshhadi turistskogo ob`ekta, neobxodimoy dlya odnogo posetitelya, pri osushhestvlenii turizma: proekt prikaza Ministerstva prirodny`x resursov i e`kologii Rossijskoj Federacii URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/56893772/> (data obrashheniya: 03.11.2024.). Rezhim dostupa: Oficial`noe opublikovanie pravovy`x aktov.
17. Ob utverzhdenii Poryadka rascheta predel`no dopustimoy rekreacionnoj emkosti osobo oxranyaemy`x prirodny`x territorij respublikanskogo znacheniya pri osushhestvlenii turizma na terri-

torii Respubliki Altaj: prikaz prirodných resursov i ekologii Respubliki Altaj ot 08.02.2024 № P-03-01/0002 — URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0401202402090001> (data obrashheniya: 3.11.2024g.). — Rezhim dostupa: Oficial'noe opublikovanie pravovykh aktov.

18. Ob utverzhdenii tipovykh pravil rascheta predel'no dopustimoy rekreacionnoj emkosti osobo ohranyaemykh prirodných territorij regional'nogo i mestnogo znacheniya pri osushhestvlenii turizma: postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 31.10.2023 № 1809. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202311020056?index=2> (data obrashheniya: 23.10.2024). Rezhim dostupa: Oficial'noe opublikovanie pravovykh aktov.

19. Pavlova K.S. i dr. Metodicheskie podhody k ocenke ekologicheskogo sostoyaniya prirodných kompleksov rekreacionnykh territorij / K.S. Pavlova, Yu.V. Robertus // Problemy regional'noj ekologii. № 5. M.: OOO Izdatel'skij dom "Kamerton", 2014. S. 54–59.

20. Pavlova K.S. Ocenka geoe'kologicheskix posledstvij neorganizovannogo massovogo otdy'xa na territorii Katun'skogo rekreacionnogo rajona (Respublika Altaj): 25.00.36 — Geoe'kologiya (po otraslyam): avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata geograficheskix nauk / Pavlova Kseniya Sergeevna; Institut vodnykh i ekologicheskix problem SO RAN. Barnaul, 2015. 22 s.

21. Repshas E'.A. Optimizaciya rekreacionnogo lesopol'zovaniya (na primere Litvy) / E'.A. Repshas. M.: Nauka, 1994. 240 s.

22. Repshas E'.A. Osobennosti digressii i regressii rekreacionnykh lesov Litovskoj SSR / E'.A. Repshas // Rekreacionnoe lesopol'zovanie v SSSR. M.: Nauka, 1983. S. 44–45.

23. Ry'sin L.P. i dr. Vliyanie rekreacionnogo lesopol'zovaniya na rastitel'nost' / L.P. Ry'sin, G.A. Polyakova // Prirodnye aspekty rekreacionnogo ispol'zovaniya lesa. M.: Nauka, 1987. S. 4–26.

24. Savenko K.S. i dr. K voprosu ocenki ekologicheskogo sostoyaniya rekreacionnykh territorij (na primere Respubliki Altaj) / K.S. Savenko, Yu.V. Robertus, V.A. Sitnikova // V sbornike: Rekreacionnaya geografiya i trendy razvitiya turizma. Materialy III mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Irkutsk, 2021. S. 95–98.

25. Savenko K.S. i dr. Novye podhody k ocenke ekologicheskogo sostoyaniya rekreacionnykh landshaftov Respubliki Altaj / K.S. Savenko, Yu.V. Robertus // Geografiya i prirodnye resursy. T. 42. № 2. Irkutsk: Institut geografii im. V.B. Sochavy SO RAN, 2021. S. 59–68.
<https://doi.org/10.15372/GIPR20210207>

26. Standart otrasli OST 56-100-95 "Metody i edinicy izmereniya rekreacionnykh nagruzok na lesnye prirodnye komplekсы": prikaz Rosleskhoz ot 20.07.1995 № 114. URL: <https://jurbase.ru/texts/sector154/tez54810.htm> (data obrashheniya: 14.05.2025). Rezhim dostupa: Oficial'noe opublikovanie pravovykh aktov.

27. Taran I.V. Rekreacionnye lesa Zapadnoj Sibiri / I.V. Taran. Novosibirsk: Nauka, 1985. — 230 s.

28. Chizhova V.P. Rekreacionnye nagruzki v zonax otdy'xa / V.P. Chizhova. M.: Lesnaya promyshlennost', 1977. 48 s.

29. Chizhova V.P. Podhody k opredeleniyu emkosti rekreacionnykh territorij / V.P. Chizhova // Oхрана окрúжайúщей среды в горóдах. Научные труды по охрaне природы. Вып. 9. Тарту: Тартуский гос. ун-т, 1985. S. 74–78.

30. Chizhova V.P. Ekologicheskij turizm: geograficheskij aspekt: uchebnoe posobie / V.P. Chizhova, L.I. Sevost'yanova. Joshkar-Ola: Marijskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2007. 276 s.

31. E'msis I.V. Opyt prikladnogo izucheniya lesov rekreacionnogo naznacheniya v Latvii / I.V. E'msis // Optimizaciya rekreacionnogo lesopol'zovaniya. M.: Nauka, 1990. S. 15–23.

32. E'msis I.V. Rekreacionnoe ispol'zovanie lesov Latvijskoj SSR / I.V. E'msis. Riga: Zinatne, 1989. 133 s.

УДК 911.3:32

ДРУЖЕСТВЕННОСТЬ И НЕДРУЖЕСТВЕННОСТЬ СТРАН МИРА КАК ФАКТОР СОВРЕМЕННОГО ГЕОПОЛИТИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ РОССИИ И СИБИРИ

© 2025 г. А.Н. Фартышев^{1,2,*}, С.В. Писаренко^{1,3}, Л.С. Жирнова^{1,4}¹ Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия² Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия³ Ленинградский государственный университет им. А.С. Пушкина, г. Пушкин, Россия⁴ Московский государственный институт международных отношений

(университет) МИД России, Москва, Россия

*E-mail: fartyshev.an@gmail.com

Поступила в редакцию 22.03.2024 г.

После доработки 16.06.2025 г.

Принята к публикации 17.07.2025 г.

Начиная с 2022 г. в российском политическом дискурсе официально закреплено понятие “недружественных стран”, хотя деление стран на друзей и врагов имеет глубокие корни. В данной статье рассматривается подход к пониманию дружественности–враждебности геополитических субъектов мира и степени их взаимоудаленности как ключевых характеристик геополитического пространства. Представлен новый подход к пониманию категории “геополитическое положение”, основывающийся не на принципе соседства субъектов, а на географической удаленности. На базе комплекса количественных и качественных данных проводится оценка государств по степени дружественности–враждебности к России по многоступенчатой шкале в 2016 и 2024 гг. Измерена и наглядно представлена географическая удаленность субъектов различной степени дружественности–враждебности от России, Сибири и СФО методикой экономических расстояний, понимающихся как расстояния по действующим транспортным путям. Доказано, что Сибирь вследствие эффекта удаленности имеет более выгодное, по сравнению с Россией в целом, геополитическое положение ввиду того, что в 2500-километровой зоне удаленности есть только дружественные геополитические субъекты, наиболее недружественные геополитические субъекты за 8 лет стали еще дальше, в то же время наиболее дружественные субъекты (в основном составляющие евразийские государства) остались в той же степени удаления, что и в 2016 г. и стали более дружественны России.

Ключевые слова: геополитика, политическая география, геополитический код, политика санкций, экономическое расстояние, внешняя политика России, геостратегия

DOI: 10.31857/S0869607125030078, EDN: LTTNBT

Введение

Геополитические характеристики макрорегионов России изучались в достаточно обширном ряде географических трудов [1, 6, 9, 11, 12, 14, 20]. В 1990-х гг. в журнале “Известия Русского географического общества” президентом РГО С.Б. Лавровым были опубликованы статьи, способствовавшие возрождению геополитического направления как особой ветви географической науки [15, 16]. В последние годы

вышли большие обзорные статьи по геополитическим тематике и методологии исследований в этой области [23, 33] и фундаментальные теоретические монографии (например, [8]), потому можно сказать, что сейчас геополитика переживает некоторый ренессанс.

Традиционно геополитика рассматривает в качестве объекта исследований государства и надгосударственные образования [19], а роль субнациональных единиц — регионов — редуцируется ввиду их меньшей роли во внешней политике. В отечественной литературе наиболее полно методология геополитики регионов представлена в трудах П.Я. Бакланова по территории Дальнего Востока (Тихоокеанской России) (например, [1, 2]). Вероятно, интерес к этой тематике именно на Дальнем Востоке связан со значительной уязвимостью данной территории и постоянными геополитическими сдвигами во внешнем окружении.

Сибирь, несмотря на удаленность от мировых держав в новейшее время, также является важной частью России, геополитическое положение которой обладает значительной динамикой. Это проявляется в изменении позиционирования соседней Монголии на мировой арене, внешнеполитическом дрейфе Казахстана и, безусловно, в украинском кризисе, из-за чего Россия ускорила свой “поворот на восток”. Сибирь является важнейшим звеном этого поворота. Ввиду указанных трансформаций значимость геополитических исследований повышается.

Другим фактором, повлиявшим на трансформацию геополитических исследований, является появление в разных государствах “списков”, “осей” и “реестров” недружественных стран. В основу таких списков редко ложатся четкие и объективные критерии, однако можно отметить некоторые усилия по их конструированию (например, в этом плане примечательна работа [21]). Так или иначе, субъекты различной степени недружественности имеют разную удаленность/близость к российской территории, а соответственно, и возможность оказания военного, экономического, культурного и иного влияния на них. В этом контексте особое значение имеет Сибирь, которая, как и Дальний Восток, является наиболее удаленной территорией от театра российско-западного противостояния. Целью данной работы является идентификация уровня дружественности—враждебности между Россией и окружающими геополитическими субъектами и измерение географической удаленности субъектов различной степени дружественности—недружественности.

Обзор литературы

Попытки создания шкалы дружественности и враждебности предпринимались в академической литературе достаточно давно, однако исследователи использовали для данной тематики разные термины и переменные. Еще в 1941 г. увидело свет исследование Ф. Клингберга, в котором напряженность рассматривалась как разделяющая два государства “психологическая дистанция”, величина которой может быть измерена в рамках шкалы “дружественность—враждебность” [32].

В 1955 г. модель измерения межгосударственной напряженности как динамического состояния, располагающегося в многомерном пространстве между полюсами стабильности и конфликта, была представлена К. Райтом [41, 42]. Ранее, размышляя о том, можно ли оценить или измерить напряженность, он отталкивался от применения этого термина в физических науках и его отражения в социологических и психологических исследованиях. Свой подход к измерению напряженности, основанный на “предположении, что в формулировании внешней политики важно понимать восприятия реальности, образы, стереотипы и определения ситуации

лицами, принимающими решения, а не существующие в мире объективные условия”, позднее был предложен К. Холсти [30]. Наибольшее внимание при обращении к анализу напряженности, как правило, привлекала проблема идентификации основных причин и факторов, ее вызывающих [34]. К их числу относились такие перцептивные переменные, как восприятие угроз, оценки способностей, намерений, отношений и явного поведения [31]. В результате всех этих усилий понятие напряженности постепенно стало приобретать большую определенность и содержательную строгость. В соответствии с трактовкой К. Холсти она стала пониматься как “набор установок и тенденций, таких как недоверие и подозрительность, которые общественность и политики испытывают по отношению к другим” [30].

В математических моделях, применяемых в политологии, геополитическое отношение представляется как некоторая константа, которая задается исследователем. В модели Л.Ф. Ричардсона, известной как модель гонки вооружений, в качестве такой переменной выделяется “величина прошлых обид” [38]. Эта переменная может быть как положительным, так и отрицательным числом, но так или иначе она воспринималась константой. Последователи Ричардсона занимались подробным описанием точного определения этого параметра.

Наиболее известной шкалой дружелюбности можно считать концепцию Б. Балажа о стадийности интеграционных процессов [28]. Сложные интеграционные процессы имеют разветвленную структуру, но было выявлено, что именно экономическая интеграция обладает стадийностью: зона преференциальной торговли, зона свободной торговли, общий рынок, таможенный союз, экономический союз. При этом несколько в стороне остаются валютные союзы, поскольку они создаются по разным причинам (это может происходить как из интеграционных процессов, так и ввиду валютного протектората или постколониальных связей) [19]. Аналогичная градация прослеживается и в военно-политической сфере: договор о ненападении, договор о сотрудничестве в военно-технической сфере, проведение совместных военных учений, договор о совместной обороне, единое военное командование. В контексте дружелюбности государств эти процессы накладываются друг на друга, формируя различные уровни дружелюбности государств.

Суммируя, выведем параметр “геополитического отношения” как меры позитивности или негативности связей между геополитическими субъектами, который сходен с ричардсоновской “величиной прошлых обид”, так как в целом отражает оценку одного субъекта другим по шкале “дружелюбность—враждебность”. Теоретическая концептуализация термина “геополитическое отношение” в отечественной политической географии проведена Н.В. Калединым [9]. Именно этот фактор привносит в политико-географическую аналитику геополитический аспект. На государственном уровне А. Уолферс в эссе “Противоборство и сотрудничество” (“Discord and collaboration”) [40] представил определенные и четкие критерии геополитических отношений, ранжированных по шкале “враждебность—дружелюбность”. Он выделил следующие категории:

- непримиримая вражда (состояние войны);
- демонстрация враждебности;
- прекращение дружественных отношений;
- минимум взаимоотношений;
- прохладные отношения или отношения неприсоединения;
- активное внутринаправленное сотрудничество;
- внешненаправленное сотрудничество;

- крайнее проявление дружбы [40].

В шкале Уолферса упор был сделан на военную мощь, но в последующие десятилетия возникла тенденция к переоценке важности военного и экономического фактора в формировании внешнеполитического курса в пользу последнего. В более ранних наших трудах шкала Уолферса была модернизирована и выделены точные критерии той или иной стадии дружелюбности или враждебности [26]. Она является базисом для данной работы.

Данные и методология

В рамках поставленной задачи выделяются два последовательных этапа: распределение геополитических субъектов по степени дружелюбности—враждебности, и затем оценка удаленности субъектов различной степени удаленности от России. В выборку входят страны Зарубежной Азии (исключая Юго-Восточную Азию и Аравийский полуостров), наиболее значимые и близкие страны Европы и США.

В более ранних работах была предложена типология отношений по линейной шкале “дружелюбность—враждебность”, где представлены четкие критерии стадийности параметра *ГПО (геополитическое отношение)*. Выделено 9 стадий дружелюбности, 9 стадий враждебности и особая категория “минимума взаимоотношений”. Под геополитическим отношением мы понимаем совокупность прямых или косвенных действий одного субъекта к другому, выявляющих обобщенную модальность внешней политики. Геополитическое отношение может быть симметричным и асимметричным (одна сторона проявляет большую дружелюбность или враждебность, чем другая к ней). Оценка градации основана на четких критериях, отраженных в табл. 1, что представляет собой усовершенствованную версию методики, описанной в работе [26].

Чтобы оценить степень дружелюбности, были проанализированы актуальные данные о голосованиях в ООН по резолюциям, данные о проведении военных учений, международных договорах, экономической интеграции, политической окраске сообщений в ведущих СМИ соответствующих стран (подробнее в работе [24]), случаях высылки дипломатов и другие релевантные данные. В результате составлены таблицы о наличии или отсутствии признака того или иного подтипа геополитического отношения. Графически алгоритм отражен на рис. 1. Например, если КНДР установила, с одной стороны, усиленный визовый режим с Россией, что соответствует стадии “–1.3 Осторожность” по шкале недружелюбности, а с другой, поддерживает Россию в военной операции в Курской области, что соответствует “2.1 Товарищество”, то за тип отношений следует принять именно последний, поскольку он свидетельствует о большем уровне дружелюбности.

Географический анализ проведен через расчет удаленности тех или иных субъектов друг от друга. В классических геополитических исследованиях используется принцип порядковости соседства [1], однако мы полагаем некорректным такой подход ввиду недоучета протяженности пространства. Поэтому влияние субъектов рассмотрено через экономическое расстояние между ближайшими экономическими центрами стран (столицами, либо городами с численностью населения более 300 тыс. чел.), отражающее возможности непосредственного сотрудничества стран.

Под экономическим расстоянием (в другой терминологии — “относительное расстояние” [19]) понимается расстояние по действующим путям сообщений (по автодорогам, железным дорогам, морским путям) [3]. Оно может измеряться

Таблица 1. Типология отношений между геополитическими субъектами

Table 1. Typology of relations between geopolitical entities

Тип	Подтип	Признак
Союз ($PO = +3$)	3.3 Единство	Наличие общих органов управления
	3.2 Сплоченность	Отсутствие пограничного контроля, общая валюта
	3.1 Дружба	Военный союз, договор о совместной обороне
Сотрудничество ($PO = +2$)	2.3 Доверие	Таможенный союз
	2.2 Взаимовыгода	Особые условия торговых отношений
	2.1 Товарищество	Проведение совместных военных учений
Теплый нейтралитет ($PO = +1$)	1.3 Связь	Безвизовый режим
	1.2 Соглашение	Поддержка в голосовании по резолюциям ООН
	1.1 Симпатия	Положительная коннотация новостей о стране в СМИ
Минимум отношений ($PO = 0$)		Малые объемы торговли, политических и культурных связей
Холодный нейтралитет ($PO = -1$)	–1.1 Неприятие	Негативная коннотация новостей о стране в СМИ
	–1.2 Несогласие	Протестное голосование по резолюциям ООН
	–1.3 Осторожность	Усиленный визовый режим, ужесточение таможенных пошлин
Конкуренция ($PO = -2$)	–2.1 Соперничество	Территориальные споры в активной стадии обсуждения
	–2.2 Противодействие	Эмбарго, санкции
	–2.3 Конфронтация	Случаи высылки дипломатов или объявление persona “non grata”, разрыв дипломатических отношений
Вражда ($PO = -3$)	–3.1 Ремиссия	Война, находящаяся в замороженной стадии
	–3.2 Эскалация	Локальная война
	–3.3 Уничтожение	Тотальная открытая война

в км, во времени или ценах. Это важно с точки зрения непосредственной возможности контакта двух геополитических субъектов для товарообмена. Сравнение экономических расстояний проводилось на основе действующих на 01.03.2024 пограничных пропускных пунктов по автомобильным трассам в километрах. В ряде случаев взяты морские расстояния через действовавшие на данный момент морские связи (например, транспортная связь с Сирией в реальности осуществлялась по морской линии Новороссийск–Латакия, а связь с Индией — через порты Калькутта и Владивосток и Нхава-Шэва–Новороссийск, а не сухопутным транспортом).

Для компаративного анализа были взяты две даты — 2016 и 2024 гг. Это обусловлено двухлетним периодом после ключевых событий для России: украинского кризиса 2014 г. и начала специальной военной операции в 2022 г. Стабильная реак-

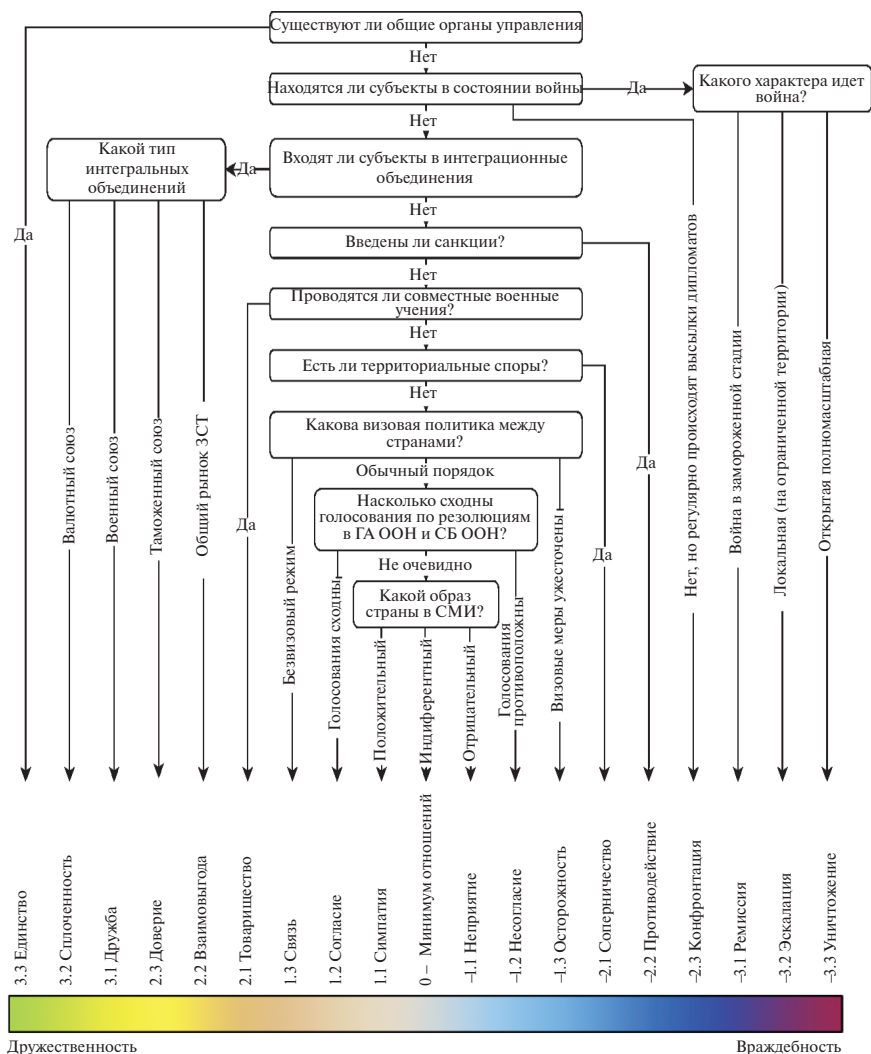


Рис. 1. Алгоритм интегральной оценки дружелюбности–враждебности двусторонних отношений между геополитическими субъектами (геополитических отношений).

Fig. 1. Algorithm for the integrated assessment of friendliness–hostility of bilateral relations between geopolitical entities (geopolitical relations).

ция на критические изменения в международной обстановке происходит не сразу, а спустя некоторое время для выработки позиции стран.

Отдельно следует пояснить восприятие границ Сибири. За рассматриваемый период произошло изменение границ Сибирского федерального округа после включения Республики Бурятия и Забайкальского края в состав ДФО. Однако, следуя академическим традициям Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, в территориальные рамки Сибири в общегеографическом понимании следует включать Тюменскую область с округами и республику Саха–Якутию [13]. С точки зрения современных подходов в регионалистике регион вообще не имеет четко выраженных границ, поскольку наибольшее значение для конструирования региона как тер-

риториальной общности имеет уровень региональной сплоченности (региональная консолидация), которая не ограничивается определенной линией [29].

Результаты

Исторические корни проявления международной недружественности

Само по себе деление на дружественные и недружественные страны является фундаментальным для политической теории, поскольку вокруг дихотомии “свой—чужой” выстроена теория возникновения государственности по К. Шмитту. Провозглашение и институциональное оформление “других” сообществ или субъектов позволяет более ясно увидеть, что есть “мы”, где проходит граница между “ними” и “нами”, и что именно служит этой границей. В период Античности государства на политической карте мира, согласно этому размежеванию, делились на “цивилизованный мир” и “варваров”, в период Средневековья — на христианские государства и иноверцев, в Новое время и особенно в период холодной войны — “демократические” и “авторитарные” государства. В 1959 г. президент США Д. Эйзенхауэр подписывает совместную с Конгрессом декларацию о признании “Недели поработенных наций (народов)” (*Captive Nations Week* — *ориг.*) и издает прокламацию, которую последующие президенты США переиздавали каждый год, суть которой заключается в видении геополитической картины мира и стран, с которыми США испытывает проблемы. В том же году на основании нее принят публичный закон № 86-90 (17.07.1959), в котором отрицается возможность совместного мирного сосуществования коммунистического общества с остальным миром, и серьезной угрозой для национальной безопасности США и всего мира объявляется российский коммунизм (фактически СССР). В нем же обозначены страны, в которых необходимо поддерживать стремление к свободе и независимости от СССР. Такими странами объявлены Польша, Венгрия, Литва, Украина, Чехословакия, Латвия, Эстония, Румыния, Белоруссия, Восточная Германия, Болгария, континентальный Китай, Армения, Азербайджан, Грузия, Албания, Идель-Урал, Тибет, Козакция, Туркестан и др. [39]. В отчете Совета национальной безопасности США № НСК 5811/1 от 24 мая 1958 г. дается обзор отношения Румынии, Венгрии, Чехословакии, Албании, Болгарии к США, формулируются краткосрочные, среднесрочные и долгосрочные цели, отражающие принципы прокламации. Вместе с этим составлено руководство по ведению внешней политики США в отношении стран Восточной Европы и прописаны следующие принципы: воспитание националистической гордости и стремления среди людей и руководства к демократизации, публикация доказательств нарушений прав человека граждан указанных республик со стороны СССР и др. [36].

В конце 1980-х — начале 1990-х годов в дискурсе возник термин “государства-изгои”, характерный для международной политики США как выделение нового “чужого” после ослабления конфронтации с СССР [27]. Президент США Джордж Буш — младший, выступая перед конгрессом 29 января 2002 г., ввел в международный оборот термин “ось зла”, отнеся к ней страны, якобы поддерживающие терроризм и разрабатывающие оружие массового поражения. В первый список вошли Ирак, Иран и Северная Корея, в 2005 г. Кондолизой Райс и ее заместителем Джоном Болтоном в “ось зла” включены Ливия, Сирия, Куба, Белоруссия, Зимбабве и Мьянма. В табл. 2 представлен подробный список упоминаний недружественных

Таблица 2. Упоминания дружественных и недружественных стран по прокламациям “Недели поработанных наций (народов)” (США) 1996–2023 гг. (*курсивом шрифтом отмечены страны, упоминающиеся в позитивном ключе, жирным шрифтом — подчеркнуто отрицательная коннотация*)

Table 2. Mentions of friendly and unfriendly countries according to the proclamations of “Captive Nations Week” (USA) 1996–2023 (*countries mentioned in a positive way are marked in italics, negative connotation is emphasized in bold*)

№	год	Президент	Дискурсивный паттерн	Упоминаемые страны и геополитические субъекты
1.	2023	Джозеф Р. Байден — младший	Поддержка демократии	Иран, Беларусь, Сирия, Куба, Венесуэла, Никарагуа, КНДР, КНР
			Поддержка Украины	Россия, Украина
2.	2022	Джозеф Р. Байден — младший	Поддержка демократии	Россия, Иран, Беларусь, Сирия, Куба, Венесуэла, Никарагуа, КНДР, КНР
			Поддержка Украины	Россия, Украина
3.	2021	Джозеф Р. Байден — младший	Поддержка Гонконга и Синьцзяна	Китай
			Поддержка демократии	Бирма, Венесуэла, Куба, Никарагуа
			Вопрос принадлежности Крыма	Россия
4.	2020	Дональд Дж. Трамп	Поддержка Гонконга	Китай
5.	2019	Дональд Дж. Трамп	Поддержка репрессированных, вопросы прав человека	-
6.	2018	Дональд Дж. Трамп	Поддержка репрессированных, вопросы прав человека	-
7.	2017	Дональд Дж. Трамп	Поддержка всех людей, которые борются за свободу, справедливость и верховенство закона.	-
8.	2016	Барак Обама	Поддержка территориальной целостности Украины	<i>Украина</i>
			Поддержка беженцев	Сирия
			Борьба с терроризмом	ИГИЛ, Куба
9.	2015	Барак Обама	Права человека и прочее	-
10.	2014	Барак Обама	За свободу против угнетения, за единство против нетерпимости	Ближний Восток, Северная Африка
11.	2013	Барак Обама	Права человека и прочее	-

Таблица 2. Окончание

№	год	Президент	Дискурсивный паттерн	Упомянутые страны и геополитические субъекты
12.	2012	Барак Обама	Права человека и прочее	От Балтийского моря до Балканского полуострова
13.	2011	Барак Обама	Права человека и прочее	-
14.	2010	Барак Обама	Права человека и прочее	-
15.	2009	Барак Обама	Права человека и прочее	-
16.	2008	Джордж Буш	Поддержка демократии	Афганистан, Ирак, Беларусь, Бирма, Куба, Иран, КНДР, Судан, Сирия, Зимбабве
17.	2007	Джордж Буш	Успехи в строительстве демократии	Либерия, Мавритания, Украина, Грузия, Кыргызстан, Кувейт
			Поддержка народа	Ливан, Афганистан, Ирак
			Поддержка угнетаемых граждан (демократии)	Беларусь, Бирма, Куба, КНДР, Сирия, Иран, Судан и Зимбабве
18.	2006	Джордж Буш	Поддержка демократии	Иран, КНДР, Беларусь, Бирма, Сирия, Зимбабве, Куба, Афганистан, Киргизия, Либерия, Ирак, Ливан
19.	2005	Джордж Буш	Успехи в строительстве демократии	Афганистан, Ирак, Украина, Грузия
20.	2004	Джордж Буш	Поддержка демократии	Ирак
21.	2003	Джордж Буш	Поддержка демократии	Бирма, Иран, Куба, КНДР, Зимбабве, Белоруссия, Ирак
22.	2002	Джордж Буш	Поддержка демократии	КНДР, Ирак, Иран, Бирма, Беларусь, Кубы и Зимбабве, Афганистан
23.	2001	Джордж Буш	Поддержка демократии	Афганистан, Бирма, Куба, Ирак, Судан
24.	2000	Уильям Дж. Клинтон	Поддержка демократии	Польша, Сальвадор, Никарагуа
25.	1999	Уильям Дж. Клинтон	Поддержка демократии	Персидский з-в, Сербия, Косово
26.	1998	Уильям Дж. Клинтон	Поддержка демократии	“Некоторая часть Европы”
27.	1997	Уильям Дж. Клинтон	Поддержка демократии	Страны бывшего советского блока, страны Южной Америки, Азии и Африки, Польша, Румыния, Эстония
28.	1996	Уильям Дж. Клинтон	Права человека и прочее	-

государств согласно стратегии США за 1996–2023 гг. Следует заметить, что Россия стала упоминаться в прокламациях “Недели поработанных наций (народов)” только с 2021 г.

Россия в новейшее время отказывалась от подобных разграничений, хотя неофициальные, но на практике применявшиеся разграничения стран по принципу “свой–чужой” использовались и в советское время. Однако в 2022 г. Правительство РФ опубликовало “Список недружественных стран и территорий” (Распоряжение Правительства РФ от 5 марта 2022 г. № 430-р), в результате чего произошла институционализация одной из главных составляющих геополитического положения — геополитического отношения между странами, выражаемого по шкале “дружественность–враждебность”. В список на 01.03.2024 входили Австралия, Албания, Андорра, Великобритания, включая Джерси, Ангилью, Багамские острова, Британские Виргинские острова, Гибралтар, государства — члены Европейского союза, Исландия, Канада, Лихтенштейн, Микронезия, Монако, Новая Зеландия, Норвегия, Республика Корея, Сан-Марино, Северная Македония, Сингапур, США, Тайвань (Китай), Украина, Черногория, Швейцария, Япония, а также зависимые территории Великобритании. Изначально данный список был создан с точки зрения так называемой политики экономических санкций и антисанкций [22], но в действительности он оказал влияние на гораздо большее количество сфер общественно-политической жизни, а не только на экономическую. Обращаясь к этому списку, следует подчеркнуть следующие важные аспекты:

— Если выделение “чужих” носит четкий характер (хотя постоянно происходит дополнение вышеупомянутого указа), то выделение субъектов максимально дружественных — более дискуссионная тема. Хотя ряд законодательных актов (например, Федеральный закон от 25.12.2023 № 630-ФЗ “О внесении изменений в Закон Российской Федерации «О таможенном тарифе» и Федеральный закон “Об основах государственного регулирования внешнеторговой деятельности”) вводят такое понятие, но списка дружественных стран нет.

— Сам по себе реестр государств — дискретный и не предполагает градуированности, что является существенным упрощением текущей действительности. В исследовательском плане вернее говорить об уровнях или степенях градации.

— В списке недружественных стран присутствуют политии, которые не выражают по отношению к России непосредственно недружественных действий, например территории, зависимые от Великобритании (например, о-ва Питкерн), и были внесены в список с целью распространения санкционного режима. В то же время неинкорпорированные зависимые территории Нидерландов, такие как остров Аруба и Кюрасао, напротив, внесены не были. Это порождает коллизии в восприятии этого списка.

Таким образом, списки недружественных стран являются традиционной формой отгораживания, придания “ярлыка” или “черной метки” и выделения “чужого” в многомерном политическом пространстве.

Оценка уровня геополитических отношений

За исследуемый период произошли значительные изменения в геополитическом отношении между странами. Если в 2016 г. от подавляющего большинства стран Европы действовали санкции экономического и политического характера в сторону России, то после объявления “специальной военной операции” в 2022 г. состоялись случаи высылки дипломатов, которые в предыдущий период имелись лишь в случае

с Великобританией, Швецией, Польшей и Украиной. Наиболее радикально настроенным геополитическим субъектом является Украина, степень враждебности которой в 2024 г. можно оценивать как “–3.1. Эскалация”. Отношения с КНР развивались поступательно, но главным фактором дружественности в обоих периодах является ежегодное проведение сторонами совместных учений “Морское взаимодействие” в Японском море, что позволяет оценивать отношения как “товарищество” в оба года с перспективой перехода к более высоким степеням дружественности [35]. Отношения России и КНДР за исследуемый период оставались дружественными и КНДР — одна из немногих стран, которая признала присоединение новых регионов к России, но до момента помощи северокорейских солдат в контртеррористической операции в Курской области в 2024 г. Россия остерегалась проводить совместные военные учения с КНДР ввиду опасения нарушения режима международных санкций в отношении нее. Наиболее теплые взаимоотношения у России со странами Средней Азии, которые могут быть оценены “3.1 Дружба” благодаря военному союзу ОДКБ. Геополитические отношения со странами Южной Азии оцениваются в первую очередь по совместным военным учениям, которые проводятся регулярно (с Индией — с 2005 г., с Пакистаном — с 2014 г., с Ираном — с 2019 г.). С 2023 г. Иран вступил в зону свободной торговли с ЕАЭС, что свидетельствует о росте дружествен-

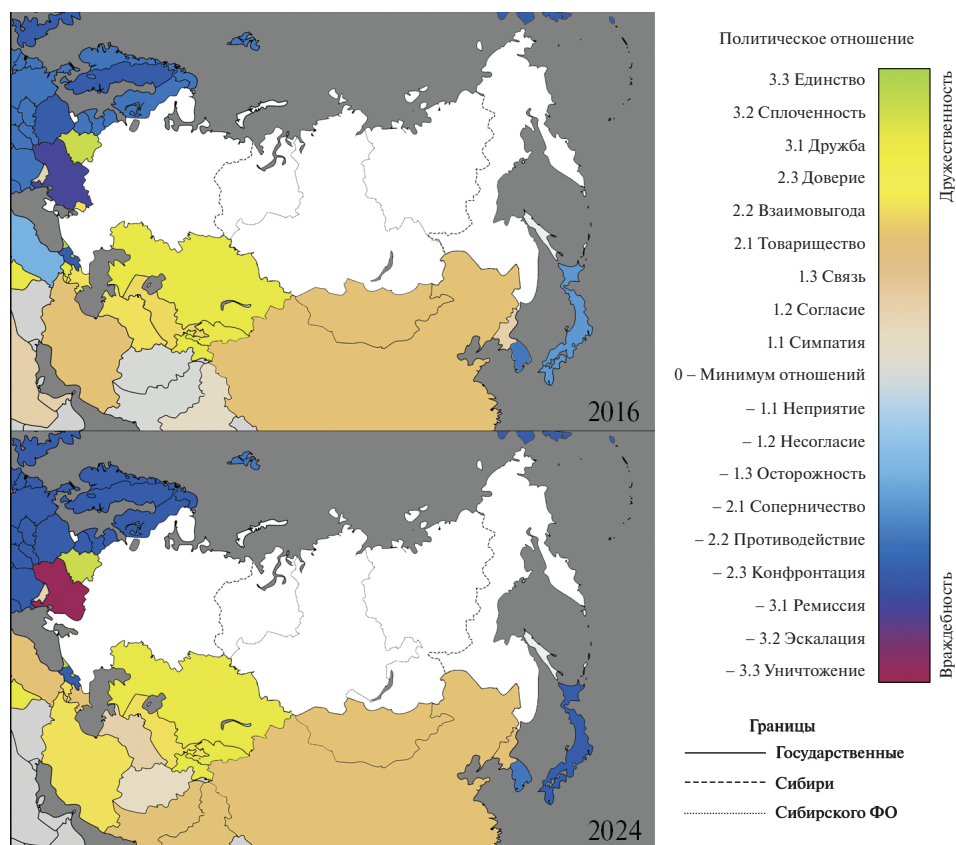


Рис 2. Геополитические отношения стран мира относительно России. Источник — расчеты автора

Fig. 2. Geopolitical relations of the countries of the world in relation to Russia. Source: author's calculations

ности. Отношения с Непалом и Бутаном охарактеризуются стадией “минимум взаимоотношений”.

Подробно оценки геополитических отношений представлены на рис. 2.

Из представленных карт видны следующие тенденции:

— За прошедший период в окружении России произошло усиление недружественности с запада и востока. На карте можно видеть, как сформировалась два “фланга”, которые и в более раннем периоде были настроены недружественно, но в 2024 г. многие отношения со многими странами перешли из степени “—2.2 Противодействие” в “—2.3 Конфронтация”.

— За прошедший временной период произошло усиление дружественности к России стран евразийского пространства, преимущественно за счет проведения военных учений, однако более высоких стадий дружественности достичь не удалось (например, расширение военного союза, расширение экономического союза). Для Сибири дружественные страны Евразии — это ближайшие субъекты, что повышает геополитическую значимость этого макрорегиона.

— Представленные карты показывают несостоятельность суждения о политической изоляции России. С учетом ряда допущений карты наглядно показывают реализацию концепции т.н. Большой Евразии, подразумевающей политическую консолидацию внутриевразийского пространства [4, 25].

Анализ степени удаленности геополитических субъектов

Полученные результаты дают основания для геополитической оценки близости—дальности стран с различным геополитическим отношением и в зависимости от уровня их значимости в мировой политике. Классификация уровней державности взята из исследования МГИМО МИД РФ, где функциональная иерархия государств представлена 4 категориями (“супердержава”, “великая держава”, “средняя держава”, “малая держава”), которые были определены с помощью обширного экспертного опроса [37]. Добавлена категория “микросоударств”.

Анализ удаленности политических субъектов по экономическим расстояниям (рис. 3) показал главную тенденцию рассматриваемого периода: недружественные субъекты “удалились” от России ввиду невозможности пересечения границы между Россией и Украиной лицами третьих стран. Наибольший рост удаления наблюдается у Молдовы, которая, несмотря на то что географически является соседом второго порядка, теперь имеет сухопутную связь с Россией только через 3 страны: Украину, Польшу, Беларусь. Закрытие Финляндией большинства пунктов пропуска на границе с Россией привело к увеличению экономического расстояния по суше между ближайшими городами — экономическими центрами, но еще остается связанность их по морю. В макромасштабе произошли изменения связанности между политическими центрами по авиационным маршрутам из-за появления бесполетных зон и закрытых воздушных пространств со всеми странами Европы. К тому же стала невозможна прямая авиационная связь России с многими политическими центрами Европы (только через третьи страны).

Эти процессы в меньшей степени влияют на Сибирь и СФО, поскольку они находятся на значительной удаленности от недружественных “флангов”. В зоне 2500-км удаленности у Сибири есть исключительно дружественные субъекты, что делает ее геополитическое положение чрезвычайно выгодным, при этом они остались на том же экономическом расстоянии, что и были в 2016 г., поскольку за рас-

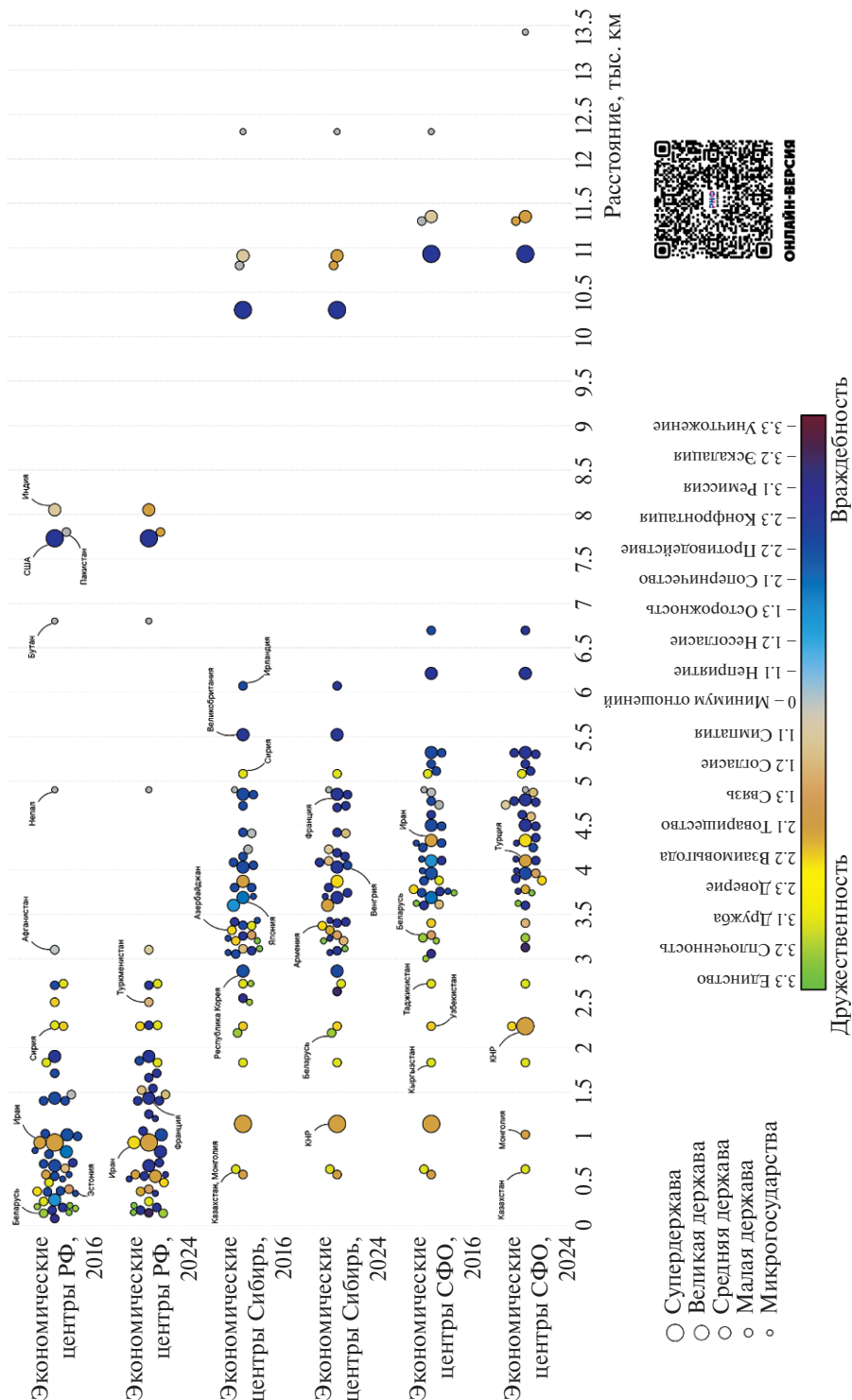


Рис. 3. Диаграмма удаленности субъектов различной степени дружелюбности—враждебности к России и Сибири.

Fig. 3. Diagram of the distance of subjects of varying degrees of friendliness—hostility to Russia and Siberia.

Доступ онлайн: <https://igsbras.ru/uploads/new-page-blocks/May2025/Remoteness-of-economic-centers-of-degrees-of-political-relation.html>

сма­три­вае­мый пе­ри­од не про­изо­шло ро­ста свя­зан­но­сти. Еди­нст­вен­ный но­вый по­гра­нич­ный пункт был от­крыт на рос­сий­ско-ки­тай­ской гра­ни­це в рай­оне с. Ниж­не­ле­нин­ское Ев­рей­ской ав­то­ном­ной об­ла­сти, что име­ет ло­каль­ное зна­че­ние.

Су­хо­пут­ная уда­лен­ность Си­би­ри яв­ля­ет­ся, без­услов­но, эконо­мичес­кой про­бле­мой для нее са­мой, по­сколь­ку транс­порт­ные из­дер­жки по су­ше зна­чи­тель­но пре­вос­ходят мор­ские [5], од­на­ко с геополитической точки зрения Сибирь пред­ста­вляет­ся наи­бо­лее бла­го­при­ят­ной тер­ри­то­рией для бу­ду­ще­го внут­ри­эконо­мичес­ко­го раз­ви­тия бла­го­даря сво­ей уда­лен­но­сти от недру­жес­твен­ных стран Ев­ро­пы и Азии и от­но­ситель­ной бли­зо­сти к дру­жес­твен­ным странам Азии. Но, разуме­ет­ся, это лишь один из фак­то­ров.

Обсуждение

Сего­дня мы можем на­блю­дать суще­ствен­ные геополитические сдвиги, в ре­зуль­та­те че­го Рос­сия все боль­ше от­да­ля­ет­ся от “за­пад­ных стран”. На этом фоне воз­ник но­вый ин­те­рес к ев­разий­ским иде­ям [7], иде­ям “си­би­ри­за­ции” страны [10]. Как по­ка­зы­ва­ют ре­зуль­та­ты на­ше­го ана­ли­за, Си­бирь име­ет вы­год­ное геополитическое по­ло­же­ние вви­ду бли­зо­сти имен­но к дру­жес­твен­ным странам. По­это­му Си­бирь ста­но­вит­ся плат­фор­мой для обес­пе­че­ния внут­ри­эконо­мичес­кой ста­биль­но­сти страны, на­хо­дя­щей­ся в “оса­де” за­пад­но­го талоссократического блока. Не­до­ста­ток про­мыш­лен­ной раз­ви­то­сти Си­би­ри, ори­ен­ти­ро­ван­ность на вы­воз до­бы­вае­мых по­лез­ных иско­пае­мых без глу­бо­кой сте­пени пе­ре­ра­бот­ки за ру­бе­ж, про­бле­мы раз­ви­тия транс­порт­но-ло­гис­ти­чес­ких свя­зей — все это воз­ник­ло в си­лу неза­вер­шен­но­сти соз­да­ния тре­тьей ин­дуст­ри­аль­ной ба­зы Рос­сии с ос­нов­ной ло­ка­ли­за­цией в Вос­точ­ной Си­би­ри [18]. Эта не­га­тив­ная осо­бен­ность про­стран­ствен­но­го раз­ви­тия на пост­со­вет­ском эта­пе ска­зы­ва­ет­ся сей­час, ко­гда раз­ме­ще­ние во­ен­ной и стра­те­гичес­ки важ­ной про­мыш­лен­но­сти страны име­ет яв­ный пе­рекос в сто­ро­ну ев­ро­пей­ской ча­сти Рос­сии, бли­зко к те­атру во­ен­ных дей­ствий. По­это­му не­об­хо­ди­мо соз­да­ние стра­те­гичес­ки важ­ных про­из­водств в Си­би­ри как наи­бо­лее уда­лен­ной тер­ри­то­рии от недру­жес­твен­ных го­су­дарств. Это чрез­вы­чай­но слож­ная за­да­ча, по­сколь­ку Рос­сия од­но­вре­мен­но вос­ста­нав­ли­ва­ет прак­ти­чески пол­но­стью раз­ру­шен­ные го­ро­да Дон­бас­са, ко­то­рые пе­ре­хо­дят под кон­троль рос­сий­ских войск.

Вместе с тем важно по­ни­мать, что, с одной сто­ро­ны, геополитическое от­но­ше­ние чрез­вы­чай­но ди­намич­но и за­ви­сит в ос­нов­ном от вла­стных ре­ше­ний и внут­ри­политических со­бы­тий, от­че­го пред­став­лен­ная струк­ту­ра обла­да­ет гиб­ко­стью. Так, на­при­мер, смена вла­сти в Ар­гентине в 2023 г. по­вер­ну­ла прак­ти­чески на 180 гра­дусов по­ли­тику го­су­дарства от стре­мле­ния вой­ти в БРИКС в сто­ро­ну уси­ле­ния внеш­не­политической за­ви­си­мо­сти от США и “дол­ла­ри­за­ции” страны¹. Та­кие же про­цес­сы можно на­блю­дать в пе­ри­оды “цвет­ных ре­во­лю­ций” 1990–2010-х гг., пре­дел ко­то­рых да­леко не ис­чер­пан, и оста­ются еще страны в не­по­сред­ствен­ной бли­зо­сти от Рос­сии, обла­да­ющие по­тен­ци­алом ре­зкой смене внеш­не­политического курса, к при­меру, Ка­зах­стан и Мон­го­лия.

С дру­гой сто­ро­ны, гео­гра­фичес­кие об­ра­зы и стереотипы инер­ци­он­ны [17], что за­кла­ды­ва­ет­ся в по­ли­ти­ческой куль­ту­ре и по­ве­ден­чес­ких пат­тер­нах как на­се­ле­ния, так и элит той или иной страны. Кон­стру­и­ро­вание об­ра­за “вра­га” или “дру­га”, “зна­

¹ При­чем вла­сти про­вин­ции Ог­нен­ная Зем­ля вы­ра­зи­ли на­ме­ре­ние про­дол­жить со­труд­ни­че­ство в фор­ма­те БРИКС+, де­мон­стри­руя, та­ким об­разом, от­дель­ную геополитическую субъ­ект­ность суб­го­су­дар­ствен­но­го уров­ня (ис­точ­ник: <https://tass.ru/mezhdunarodnaya-panorama/19428513>).

чимого другого” (significant other), “центра” и “периферии” и др. происходит через общение, массовую пропаганду, искусство и др. Эти образы, основанные на коллективной идентичности, остаются неизменными продолжительное время, длительность которого зависит от скорости распространения информации, степени укоренившихся представлений и согласованности с картиной мира.

В целях увеличения относительной близости государств необходимо развитие и внутриконтинентальных магистралей. Так, например, Индия, будучи в целом дружественным государством по отношению к России, остается чрезвычайно далекой страной в экономическом плане, поскольку связь с ней осуществляется не сухопутными магистральями, а практически исключительно через морские порты. Но главным лимитирующим фактором меридиональной магистрализации является пояс политической нестабильности на границе Южной Азии с Восточной и Центральной Азией [5].

Заключение

Деление на недружественные и дружественные страны имеет длительную историческую традицию, и современный “список недружественных стран”, изданный МИД России, с экономической стороны является проявлением “политики санкций”, но с политической стороны лежит в русле американской геополитической традиции выделения “стран-изгоев” или “порабощенных народов”.

Анализ с помощью градуирования геополитических субъектов по шкале “дружественности—враждебности” показывает измеримые характеристики геополитических отношений стран. Так, были зафиксированы изменения за 2016–2024 гг., заключающиеся в росте враждебности европейских стран, росте дружественности стран Центральной и Южной Азии, статичности отношений с КНР, КНДР и Монголией, росте дружественности с Турцией. Геополитическая обстановка требует постоянного мониторинга ввиду динамичности международных отношений.

Показанные тенденции географической удаленности, которые лишь кратко отражены в данной статье, свидетельствуют о многих побочных явлениях политических решений об изменении статуса пунктов пропуска или пограничных переходов. Экономическое расстояние гораздо точнее показывает различие в удаленности стран, чем деление стран по порядковому принципу, и его следует использовать для геополитического анализа. Выявлено, что Сибирь в общегеографическом ее понимании обладает выгодным геополитическим положением ввиду ее удаленности более чем на 2500 км от враждебных субъектов, однако с экономической точки зрения это является недостатком ввиду длинного транспортного плеча и высоких транспортных издержек.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-10048, <https://rscf.ru/project/23-77-10048>. Авторы выражают благодарность студентке 1-го курса Института социальных наук ИГУ Ивановой Вильнэлии Владимировне за помощь в сборе первичных данных.

Список литературы

1. Бакланов П.Я., Романов М.Т. Экономико-географическое положение и геополитическое положение Тихоокеанской России. Владивосток: Дальнаука, 2009. 168 с.

2. Бакланов П.Я., Шведов В.Г., Романов М.Т. Тихоокеанский вектор в пространственном развитии России и США: основные рубежи и этапы. // Известия Русского географического общества. 2021. № 153 (3). С. 3–16. <https://doi.org/10.31857/S0869607121030022>
3. Безруков Л.А. Континентально-океаническая дихотомия в международном и региональном развитии. отв. ред. Б. М. Ишмуратов; Российская акад. наук, Сибирское отделение, Ин-т географии им. В.Б. Сочавы. Новосибирск, 2008. 249 с.
4. Безруков Л.А. Географический смысл создания “Большой Евразии” // География и природные ресурсы. 2018. № 4. С. 5–14. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-4\(5-14\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-4(5-14))
5. Безруков Л.А. Континентально-океаническая динамика России в начале XXI века // География и природные ресурсы. 2023. Т. 44, № 2. С. 5–14. <https://doi.org/10.15372/GIPR20230201>
6. Дружинин А.Г. Глобальное позиционирование Юга России: факторы, особенности, стратегии. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2009. 288 с.
7. Дружинин А.Г. Идеи классического евразийства и современность: общественно-географический анализ. Ростов-на-Дону; Таганрог: Южный федеральный университет, 2021. 270 с.
8. Елацков А.Б. Общая геополитика. Вопросы теории и методологии в географической интерпретации / 2-е издание, переработанное и дополненное. Москва: ИНФРА-М, 2025. 264 с. <https://doi.org/10.12737/2033550>
9. Каледин Н.В. Политическая география: Истоки, проблемы, принципы научной концепции. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 1996. 164 с.
10. Караганов С.А., Козылов И.С. Поворот на Восток 2.0 или “Сибиризация” России // Россия в глобальной политике. 2025. № 23(1). С. 221–229. <https://doi.org/10.31278/1810-6439-2025-23-1-221-229>
11. Колосов В.А., Туровский Р.Ф. Геополитическое положение России на пороге XXI века: реалии и перспективы // Полис. Политические исследования. 2000. № 3. С. 40–60.
12. Колосов В.А., Мироненко Н.С. Геополитика и политическая география. Москва: Аспект Пресс, 2001. 479 с.
13. Корытный Л.М. Макрорегион Северо-Восточной Азии: предпосылки делимитации, состав, границы // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2021. Т. 85, № 1. С. 14–23. <https://doi.org/10.31857/S258755662101009X>
14. Кретинин Г.В., Катровский А.П., Потоцкая Т.И., Федоров Г.М. Геополитические и геоэкономические изменения на Балтике на рубеже XX и XXI веков // Балтийский регион. 2016. Т. 8, № 4. С. 18–33. <https://doi.org/10.5922/2074-9848-2016-4-2>
15. Лавров С.Б. Геополитика: возрождение запретного направления // Известия Русского географического общества. 1993. № 4. С. 36–41.
16. Лавров С.Б. Геополитическое пространство России: мифы и реальность // Известия Русского географического общества. № 3. 1997. С. 1–15.
17. Мир глазами россиян: мифы и внешняя политика / Под ред. В. Колосова. М.: Институт фонда “Общественное мнение”, 2003. 304 с.
18. Никольский А.Ф. “Новый Ангарстрой” как ключевой проект будущей индустриализации в России // География и природные ресурсы. 2017. № 4. С. 143–153. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-4\(143-153\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-4(143-153))
19. Окунев И.Ю. Политическая география. Москва: “Аспект Пресс”, 2019. 512 с.
20. Потоцкая Т.И. Геополитика России на постсоветском пространстве. Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2018. 160 с.

21. Сафранчук И.А., Несмашный А.Д., Чернов Д.Н. Подвижная карта восприятия // Россия в глобальной политике. 2023. Т. 21. № 3. С. 90–102.
<https://doi.org/10.31278/1810-6439-2023-21-3-90-102>
22. Тимофеев И.Н. Политика санкций в меняющемся мире: теоретическая рефлексия // Полис. Политические исследования. 2023. № 2. С. 103–119.
<https://doi.org/10.17976/jpps/2023.02.08>
23. Фартышев А.Н. Количественные методы в российских геополитических исследованиях // Политическая наука. 2022. № 4. С. 18–40. <https://doi.org/10.31249/poln/2022.04.01>
24. Фартышев А.Н. Дискурс о России в зарубежных средствах массовой информации в 2020–2022 годах // Шестнадцатые байкальские социально-гуманитарные чтения. Иркутск: Иркутский государственный университет, 2024. С. 270–274.
25. Фартышев А.Н. Сибирь в концепции Большой Евразии // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Политология. Религиоведение. 2021. Т. 37. С. 40–49.
<https://doi.org/10.26516/2073-3380.2021.37.40>
26. Фартышев, А.Н. Оценка политического отношения геополитических субъектов по шкале “дружественность–враждебность” А. Уолферса в современном мире // Мировая политика. 2018. № 4. С. 21–33. <https://doi.org/10.25136/2409-8671.2018.4.26652>
27. Харкевич М.В. Государства-изгои как образ “другого” в мировой политике // Полис. Политические исследования. 2009. № 4. С. 99–110.
28. Balassa, B. The Theory of Economic Integration. London. G. Allen & Unwin Ltd. 1961. p. 304.
29. Hettne B. Beyond the “New Regionalism” // New Political Economy. 2005. № 10/4. P. 543–571. <https://doi.org/10.1080/13563460500344484>
30. Holsti K.J. The use of objective criteria for the measurement of international tension levels // Background. 1963. Vol. 7, No. 2. P. 77–95. <https://doi.org/10.2307/3013638>
31. Holsti O.R. The belief system and national images: a case study // Journal of Conflict Resolution. 1962. Vol. 6. P. 244–252. <https://doi.org/10.1177/002200276200600306>
32. Klingberg F.L. Studies in measurement of the relations among sovereign states // Psychometrika. 1941. No. 6. P. 335–352. <https://doi.org/10.1007/BF02288590>
33. Kolosov V. A. Zotova M.V. Turov N.L. Geopolitics and political geography in Russia: global context and national characteristics // Regional Research of Russia. 2022. Vol. 12, No. 1. P. 80–95.
<https://doi.org/10.1134/S2079970522020046>
34. Leifer M. The foreign relations of the new states. Australia. Longman, 1974.
35. Lukin A. The Russia–China entente and its future // International Politics. 2021. No. 58. P. 363–380. <https://doi.org/10.1057/s41311-020-00251-7>
36. National Security Council Report № HCK 5811/1 Washington, May 24, 1958 [электронный ресурс] / официальный портал исторических документов США. URL: <https://history.state.gov/historicaldocuments/frus1958-60v10p1/d6>
37. Nesmashnyi A.D., Zhornist V.M., Safranchuk I.A. International hierarchy and functional differentiation of states: results of an expert survey // MGIMO Review of International Relations. 2022. Vol. 15. No. 3. P. 7–38. <https://doi.org/10.24833/2071-8160-2022-olf2>
38. Richardson L.F. Statistics of deadly quarrels. (Quincy Wright and C. C. Lienau, eds.). Pittsburgh: Boxwood Press, 1960. 373 p.
39. S.J.Res.111 — Joint resolution providing for the designation of the third week of July as “Captive Nations Week” [электронный ресурс] / официальный сайт Конгресса США. URL: <https://www.congress.gov/bill/86th-congress/senate-joint-resolution/111/text?s=2&r=53&q=%7B%-22search%22%3A%22captive+nations+week%22%7D>
40. Wolfers A. Discord and collaboration. Essay of international politics. Foreword by Reinhold Niebuhr. The Johns Hopkins Press, Baltimore, 1962. 283 p.

41. Wright Q. The nature of conflict // *Western Political Quarterly*. 1951. Vol. 4, No 2. P. 193–208. <https://doi.org/10.2307/443101>

42. Wright Q. The peaceful adjustment of international relations: problems and research approaches // *Journal of Social Issues*. 1955. Vol. 11, I. 1. P. 3–12.

<https://doi.org/10.1111/j.1540-4560.1955.tb00300.x>

Friendliness and Unfriendliness of Countries of the World as a Factor in the Modern Geopolitical Position of Russia and Siberia

A.N. Fartyshev^{1, 2, *}, S.V. Pisarenko^{1, 3}, L.S. Zhirnova^{1, 4}

¹*V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia*

²*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

³*Leningrad State University, Pushkin, Russia*

⁴*Moscow State Institute of International Relations, Ministry of Foreign Affairs of Russia (MGIMO University), Moscow, Russia*

*E-mail: fartyshev.an@gmail.com

Received 22.03.2024

Revised 16.06.2025

Accepted 17.07.2025

Since 2022 the concept of the “unfriendly countries” has been officially enshrined in the Russian political discourse, though dividing countries into friends and foes has deep roots. The article views friendliness and unfriendliness of the geopolitical actors and their mutual distance as key characteristics of the geopolitical space. A new approach to understanding the category of “geopolitical position” is presented, based not on the principle of neighborhood of subjects, but on geographical remoteness. Based on both qualitative and quantitative data, the research uses a multistep scale to evaluate countries’ friendliness and unfriendliness towards Russia in 2016 and 2024. The method of economic distances is used to measure and grafically represent the distance of the actors varying in friendliness and unfriendliness from Russia, Siberia and the Siberian federal district. The research proves that due to its remoteness Siberia has a more beneficial location in comparison with Russia as a whole, because only friendly geopolitical subjects can be found within 2500 km from Siberia, unfriendly geopolitical actors moved even farther from it, whereas the most friendly actors (primarily Eurasian states) remained as close as in 2016 and became even friendlier towards Russia.

Keywords: geopolitics, political geography, geopolitical code, sanction policy, Russian foreign policy, economic distance, geostrategy

References

1. Baklanov P.Ya., Romanov M.T. *Ekonomiko-geograficheskoe polozhenie i geopoliticheskoe polozhenie Tihookeanskoj Rossii*. Vladivostok: Dal’nauka, 2009. 168 p.
2. Baklanov P.Ya., Shvedov V.G., Romanov M.T. Tihookeanskij vektor v prostranstvennom razvitii Rossii i SSHA: osnovnye rubezhi i etapy. // *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. 2021. No. 153 (3). P. 3–16. <https://doi.org/10.31857/S0869607121030022>
3. Bezrukov L.A. *Kontinental’no-okeanicheskaya dihotomiya v mezhdunarodnom i regional’nom razvitii*. otv. red. B. M. Ishmuratov; Rossijskaya akad. nauk, Sibirskoe otd-nie, In-t geografii im. V.B. Sochavy. Novosibirsk, 2008. 249 p.

4. Bezrukov L.A. Geograficheskij smysl sozdaniya “Bol’shoj Evrazii” // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2018. No. 4. P. 5–14. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-4\(5-14\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-4(5-14))
5. Bezrukov L.A. Kontinental’no-okeanicheskaya dinamika Rossii v nachale XXI veka // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2023. Vol. 44, No. 2. P. 5–14. <https://doi.org/10.15372/GIPR20230201>
6. Druzhinin, A.G. Global’noe pozicionirovanie Yuga Rossii: faktory, osobennosti, strategii. Rostov-na-Donu: Yuzhnyj federal’nyj universitet, 2009. 288 s
7. Druzhinin, A.G. Idei klassicheskogo evrazijstva i sovremennost’: obshchestvenno-geograficheskij analiz. Rostov-na-Donu; Taganrog: Yuzhnyj federal’nyj universitet, 2021. 270 p.
8. Elatskov A.B. Obschaya geopolitika. Voprosy teorii i metodologii v geograficheskoy interpretatsii / 2-e izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe. Moskva: INFRA-M, 2025. 264 p. <https://doi.org/10.12737/2033550>
9. Kaledin, N.V. Politicheskaya geografiya : Istoki, problemy, principy nauchnoj koncepcii. Sankt-Peterburg : Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet, 1996. 164 p.
10. Karaganov S.A., Kozylov I.S. Eastward Turn 2.0, or “Sibiriazation” of Russia // *Rossiya v globalnoi politike*. 2025. No. 23(1). P. 221–229. <https://doi.org/10.31278/1810-6439-2025-23-1-221-229>
11. Kolosov, V.A. Turovskij R.F. Geopoliticheskoe polozhenie Rossii na poroge XXI veka: realii i perspektivy // *Polis. Politicheskie issledovaniya*. 2000. No. 3. P. 40–60
12. Kolosov V.A. Mironenko N.S. Geopolitika i politicheskaya geografiya. Moskva: Aspekt Press, 2001. 479 p.
13. Korytnyj L.M. Makroregion Severo-Vostochnoj Azii: predposylki delimitatsii, sostav, granicy // *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2021. T. 85, No. 1., P. 14–23. <https://doi.org/10.31857/S258755662101009X>
14. Kretinin G. V., Katrovskij A. P., Pototskaya T. I., Fedorov G. M. Geopoliticheskie i geoekonomicheskie izmeneniya na Baltike na rubezhe XX i XXI vekov // *Baltiiskij region*. 2016. Vol. 8, No. 4. P. 18–33. <https://doi.org/10.5922/2074-9848-2016-4-2>
15. Lavrov S.B. Geopolitika: vozrozhdenie zapretnogo napravleniya // *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. 1993. No. 4. P. 36–41.
16. Lavrov S.B. Geopoliticheskoe prostranstvo Rossii: mify i real’nost’ // *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. No. 3. 1997. P. 1–15.
17. Mir glazami rossiiyan: mify i vneshnyaya politika / Pod red. V. Kolosova. M.: Institut fonda “Obshchestvennoe mnenie”, 2003, 304 p.
18. Nikol’skij A.F. “Novyj Angarstroj” kak klyuchevoj proekt budushchej industrializatsii v Rossii // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2017. No. 4. P. 143–153. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-4\(143-153\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-4(143-153))
19. Okunev I.Yu. Politicheskaya geografiya : Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov. Moskva: Aspekt Press, 2019. 512 p.
20. Pototskaya T.I. Geopolitika Rossii na postsovetском prostranstve. Saratov: Aj Pi Er Media, 2018. 160 p.
21. Safranchuk I.A., Nesmashnyj A.D., Chernov D.N. Podvizhnaya karta vospriyatiya // *Rossiya v global’noj politike*. 2023. Vol. 21. No. 3. P. 90–102. <https://doi.org/10.31278/1810-6439-2023-21-3-90-102>
22. Timofeev I.N. Politika sankcij v menyayushchemsya mire: teoreticheskaya refleksiya // *Polis. Politicheskie issledovaniya*. 2023. No. 2. P. 103–119. <https://doi.org/10.17976/jpps/2023.02.08>
23. Fartyshev A.N. Kolichestvennye metody v rossijskikh geopoliticheskikh issledovaniyah // *Politicheskaya nauka*. 2022. No. 4. P. 18–40. <https://doi.org/10.31249/poln/2022.04.01>

24. Fartyshev A.N. Discurs o Rossii v zarubezhnyh sredstvakh massovoi informatsii v 2020–2022 godah // *Shestnadsatsye baikalskie sotsialno-gumanitarnye chteniya*. Irkutsk: Irkutskiy gosudarstvennyy universitet, 2024. P. 270–274.
25. Fartyshev A.N. Sibir' v koncepcii Bol'shoj Evrazii // *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Politologiya. Religiovedenie*. 2021. Vol. 37. P. 40–49.
<https://doi.org/10.26516/2073-3380.2021.37.40>
26. Fartyshev, A.N. Otsenka politicheskogo otnosheniya geopoliticheskikh sub'ektov po shkale "druzhestvennost'–vrazhdebnost'" A. Wolfersa v sovremennom mire // *Mirovaya politika*. 2018. No. 4. P. 21–33. <https://doi.org/10.25136/2409-8671.2018.4.26652>
27. Harkevich M.V. Gosudarstva-izgoi kak obraz "drugogo" v mirovoj politike // *Polis. Politicheskies issledovaniya*. 2009. No. 4. P. 99–110.
28. Balassa, B. The theory of economic integration. London. G. Allen & Unwin Ltd. 1961. 304 p.
29. Hettne B. Beyond the "new regionalism" // *New Political Economy*. 2005. No. 10/4. P. 543–571. <https://doi.org/10.1080/13563460500344484>
30. Holsti K.J. The use of objective criteria for the measurement of international tension levels // *Background*. 1963. Vol. 7, No. 2. P. 77–95. <https://doi.org/10.2307/3013638>
31. Holsti O.R. The belief system and national images: a case study // *Journal of Conflict Resolution*. 1962. Vol. 6. P. 244–252. <https://doi.org/10.1177/002200276200600306>
32. Klingberg F.L. Studies in measurement of the relations among sovereign states // *Psychometrika*. 1941. No. 6. P. 335–352. <https://doi.org/10.1007/BF02288590>
33. Kolosov V.A., Zotova M.V., Turov N.L. Geopolitics and political geography in Russia: global context and national characteristics // *Regional Research of Russia*. 2022. Vol. 12, No. 1. P. 80–95. <https://doi.org/10.1134/S2079970522020046>
34. Leifer M. The foreign relations of the new states. Australia. Longman, 1974.
35. Lukin A. The Russia–China entente and its future // *International Politics*. 2021. No. 58. P. 363–380. <https://doi.org/10.1057/s41311-020-00251-7>
36. National Security Council Report No. NSK 5811/1 Washington, May 24, 1958 [elektronnyj resurs] / oficial'nyj portal istoricheskikh dokumentov SSHA. URL: <https://history.state.gov/historical-documents/frus1958-60v10p1/d6>
37. Nesmashnyi A.D., Zhornist V.M., Safranchuk I.A. International hierarchy and functional differentiation of states: results of an expert survey // *MGIMO Review of International Relations*. 2022. Vol. 15. No. 3. P. 7–38. <https://doi.org/.24833/2071-8160-2022-olf2>
38. Richardson L.F., Statistics of Deadly Quarrels. (Quincy Wright and C.C. Lienau, eds.). Pittsburgh: Boxwood Press, 1960. 373 p.
39. S.J.Res.111 — Joint resolution providing for the designation of the third week of July as "Captive Nations Week" [elektronnyj resurs] / oficial'nyj sayt Kongressa SSHA. URL: <https://www.congress.gov/bill/86th-congress/senate-joint-resolution/111/text?s=2&r=53&q=%7B%22search%22%3A%-22captive+nations+week%22%7D>
40. Wolfers A. Discord and collaboration. Essay of international politics. Foreword by Reinhold Niebuhr. The Johns Hopkins Press, Baltimore, 1962. 283 p.
41. Wright Q. The nature of conflict // *Western Political Quarterly*. 1951. Vol. 4, No. 2. P. 193–208. <https://doi.org/10.2307/443101>
42. Wright Q. The peaceful adjustment of international relations: problems and research approaches // *Journal of Social Issues*. 1955. Vol. 11, I. 1. P. 3–12. <https://doi.org/10.1111/j.1540-4560.1955.tb00300.x>

УДК 620.92

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ НА СЕВЕРЕ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

© 2025 г. М.Ю. Березкин, К.С. Дегтярев*, О.А. Синюгин

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

**E-mail: kir1111@rambler.ru*

Поступила в редакцию 09.04.2025 г.

После доработки 17.07.2025 г.

Принята к публикации 24.07.2025 г.

В статье проводится оценка объемов и структуры местных возобновляемых энергетических ресурсов северных районов Красноярского края, отличающихся экстремальными природными условиями, низкой плотностью населения и изоляцией от магистральных линий электропередач. Это территория к северу от Ангары, основная часть которой приходится на Таймырский Долгано-Ненецкий, Эвенкийский и Туруханский районы. Электроэнергия в данных районах производится на дорогостоящем привозном ископаемом топливе, и актуальной задачей является оценка возможностей его замещения за счет местных возобновляемых энергоресурсов — солнечной, ветровой, гидро- и биоэнергии. В статье проводится исследование потенциала данных источников, проводится дифференциация территории с точки зрения их объема и территориального распределения. В пределах исследуемой территории выделены две зоны. В северной зоне, Таймырской, предпочтительнее развитие ветроэнергетики, в том числе строительство крупных ветроэлектростанций. В южной, представленной Эвенкийским, Туруханским и прилегающими к ним районами, перспективна малая автономная диверсифицированная энергетика, представленная солнечными электростанциями, гидроэлектростанциями и биоэнергетическими станциями. Таймыр — территория, привязанная к Северному морскому пути и Норильскому промышленному району. Таким образом, территория между ним и экономически развитым югом Красноярского края становится своего рода обширным природным хинтерландом. Полное замещение привозного топлива местными ресурсами невозможно из-за нестабильности возобновляемых источников, однако постепенное наращивание их доли в рамках гибридных энергетических комплексов эффективно. Экономия дизельного топлива составляет 0.3–0.8 т в год, а сокращение выбросов CO₂ — 1–2 т в год на каждый 1 кВт установленной мощности солнечной или ветровой электростанции. Срок окупаемости единицы установленной мощности на основе возобновляемых источников составит 3–4 года, а снижение внешних издержек дает дополнительный экономический эффект.

Ключевые слова: Красноярский край, Таймырский район, Эвенкийский район, возобновляемые источники энергии, солнечная энергетика, ветроэнергетика, гидроэнергетика, биоэнергетика, экономика возобновляемой энергетики, энергоснабжение

DOI: 10.31857/S0869607125030085, EDN: LTWNJC

Введение

Красноярский край является вторым по площади (после Республики Саха — Якутия) субъектом Российской Федерации — площадью почти 2.4 млн км², и самым

вытянутым с севера на юг, протяженность — 2800 км. В связи с этим он отличается контрастностью природных и хозяйственных условий между его разными частями. Крайний юг Красноярского края находится в зоне лесостепей, крайний север — в зоне арктических пустынь. С определенной долей условности Красноярский край можно разделить на две части — к северу и к югу от Ангары (рис. 1). Природные условия к северу от Ангары позволили часть административно-территориальных единиц края отнести к районам Крайнего Севера и к районам, приравненным к Крайнему Северу¹.

С точки зрения энергетики и особенности экономики этой территории отдельное место занимает изолированный Норильско-Таймырский энергорайон, снабжающий энергией Норильский промышленный район и единое муниципальное образование “город Норильск” (с населением 176.7 тыс. чел., 2024 г.). В энергорайон входят 3 ТЭЦ общей мощностью 1280 МВт, и 2 ГЭС — Усть-Хантайская (510 МВт) и Курейская (600 МВт).

На остальную территорию севера приходится 89.3% площади Красноярского края и всего 5.8% населения. В постсоветское время эти районы пережили депопуляцию, особенно резкую в районах Крайнего Севера, с почти двукратным сокращением численности населения (табл. 1).

Почти половина из 62 тыс. населения четырех районов Крайнего Севера приходится на городские поселения: Дудинку (19 тыс.), Северо-Енисейский (6 тыс.),

Таблица 1. Административные районы Красноярского края, относящиеся к районам Крайнего Севера и районы, приравненные к ним²

Table 1. Administrative districts of Krasnoyarsk Territory belonging to the regions of the Far North and areas equated to them

Районы	Площадь, тыс. км²	Численность населения, тыс. чел.	
		1989	2024
Районы Крайнего Севера			
Таймырский Долгано-Ненецкий (без м/о “город Норильск”)	880	55.1	29.6
Эвенкийский	763	19.3	13.4
Туруханский	211	24.4	12.8
Северо-Енисейский	47	17.1	6.2
Районы, приравненные к Крайнему Северу			
Енисейский	106	22.4	22.6
Мотыгинский	18	26.6	13.6
Богучанский	54	58.2	45.3
Кежемский	34	31.2	20.3
Всего	2113	254.3	163.8

¹ https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_400590/ff45085b4795fe7104ea14fdb9943bcb46be3a59/ (дата обращения: 02.04.2025).

² <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (дата обращения: 02.04.2025).

Туруханск (3 тыс.), Туру (4 тыс.) и Игарку (3 тыс.). Эвенкийский и Таймырский районы — одни из самых редконаселенных территорий России (средняя плотность населения, соответственно, 0.018 и 0.034 чел./км²).

Северные районы Красноярского края находятся в зоне экстремальных природных и хозяйственных условий с резко континентальным климатом, сплошным распространением многолетней мерзлоты, отсутствием сети железных и автомобильных дорог (за исключением железной дороги, связывающей Норильск с Дудинкой), удаленностью от экономических центров — в частности, расстояние от ближайшего относительно крупного города Красноярского края — Енисейска (17.5 тыс. чел.), являющегося конечным пунктом краевой автодороги “Енисейский край”, до Туруханска составляет по прямой 850 км.

Большая часть территорий районов находится в зоне децентрализованного энергоснабжения — вне магистральных линий электропередач, без связи с Единой энергосистемой России, и практически полностью зависит от завоза энергоносителей (уголь, мазут) извне. В связи с этим, представляется актуальным исследование возможностей надежного и недорогого энергоснабжения населения районов за счет местных энергетических ресурсов, включая ВИЭ.

Энергетические ресурсы Красноярского края

В целом Красноярский край отличается большими энергетическими ресурсами, прежде всего — крупные месторождения угля (Канско-Ачинский и Тунгусский бассейны) и гидроэнергетические ресурсы, связанные с крупнейшими реками (Енисей, Ангара, Нижняя Тунгуска, Подкаменная Тунгуска) и их притоками, протекающие на значительном протяжении по горным и предгорным территориям с большими уклонами, что создает повышенный энергетический потенциал.

Как следствие, Красноярский край является одним из крупнейших в России производителей электроэнергии. В настоящее время на территории края работает 18 тепловых электростанций и 5 гидроэлектростанций общей мощностью более 18 ГВт, в том числе 6 ГВт приходится на Красноярскую ГЭС, входящую в крупнейший в России Енисейский гидроэнергетический каскад¹. В совокупном объеме выработки электроэнергии доля на гидроэлектростанциях и тепловых угольных электростанциях примерно равна. По объему производства электроэнергии — около 67.4 ТВт ч в год² — Красноярский энергетический комплекс занимает второе место в России (более 6% всего производства электроэнергии в стране).

Между тем общая протяженность линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше — 18 485 км, в том числе 500 кВ — 2889 км, 220 кВ — 5529 км, 110 кВ — 10 067 км. В среднем плотность распределения линий электропередач в регионе составляет 150 чел./км ЛЭП, тогда как в среднем по России этот показатель в два раза больше — 300 чел./км. Низкая плотность охвата генерирующими станциями говорит о более высоких рисках для устойчивого энергоснабжения населения и промышленных предприятий.

Кроме того, Красноярский край отличается большим объемом лесных ресурсов. По объемам лесозаготовок — 18–25 млн м³ в год³, или около 10% от всего

¹ <https://energybase.ru/region/krasnoyarskij-kraj/power-plants> (дата обращения: 02.04.2025).

² https://rosstat.gov.ru/bgd/regl/b10_48/IssWWW.exe/Stg/d01/06-168.htm (дата обращения: 02.04.2025).

³ https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (дата обращения: 02.04.2025).

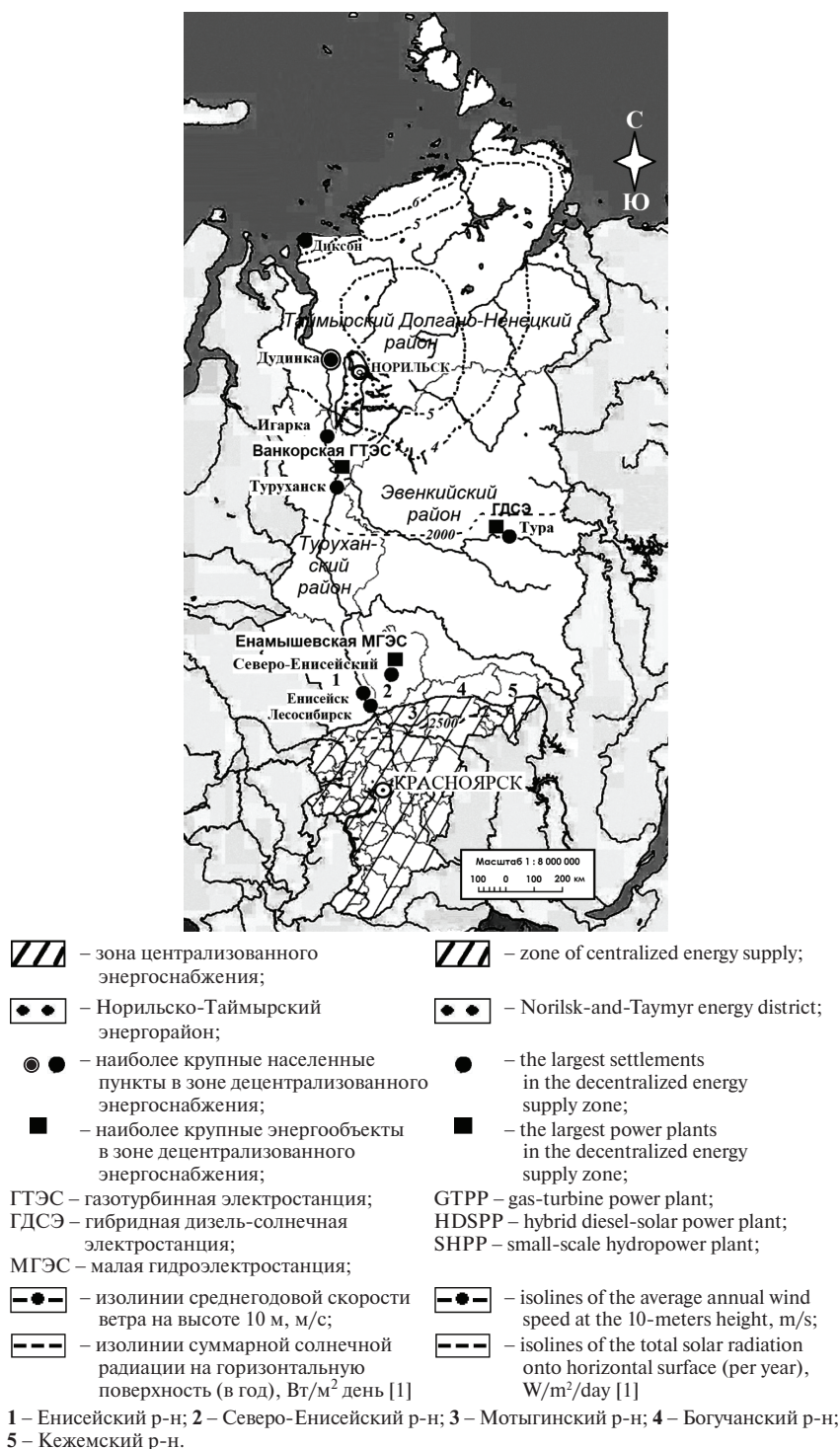


Рис. 1. Картосхема районов Красноярского края (составлено авторами).

Fig. 1. Cartography of the districts of the Krasnoyarsk Territory (compiled by the authors).

российского объема, край занимает второе место в России после соседней с ним Иркутской области. Объем образующихся при этом древесных отходов, которые можно использовать в энергетических целях, согласно имеющимся методикам оценок в российских [2, 3, 4, 5] и зарубежных⁴ источниках, может быть оценен в величину порядка 2 млн т. Как следствие, Красноярский край становится одним из центров производства древесных топливных гранул — пеллет⁵; в частности, на базе местного лесоперерабатывающего и лесохимического комплекса созданы производства топливных гранул в Лесосибирске (Енисейский район, 40 тыс. т в год), Козинске (Кежемский район, 25 тыс. т в год), Красноярске (50 тыс. т в год), Березовском районе (50 тыс. т в год); планируется расширение имеющихся и создание новых мощностей.

В то же время развитый и диверсифицированный энергетический комплекс сосредоточен полностью в южных районах края. На севере энергоснабжение осуществляется за счет внешних поставок ископаемого топлива. Речь идет о территории, занимающей девять десятых площади края — главным образом, Таймырский, Эвенкийский и Туруханский районы, а также части территорий Енисейского, Северо-Енисейского, Мотыгинского, Богучанского и Кежемского районов. Например, в Эвенкийском р-не все 23 населенных пункта зависят от завоза топлива и относятся к децентрализованной энергосистеме, в самом северном — Таймырском Долгано-Ненецком муниципальном районе таких 21 из 27, а всего в Красноярском крае — 95, в которых проживает 37 тыс. чел. (табл. 2).

Единственным крупным энергообъектом на данной территории является Ванкорская ГТЭС (206 МВт) — газотурбинная тепловая электростанция (ГТУ-ГТЭ), расположенная в Туруханском районе. Она является основным источником электро- и теплоснабжения объектов Ванкорского нефтегазового месторождения.

Из объектов генерации на основе ВИЭ наиболее крупные — Енамышевская МГЭС (Северо-Енисейский район, 5,4 МВт) и солнечная электростанция (2,5 МВт) в составе автономной гибридной дизель-солнечная электростанции (ГДСЭ) в пос. Тура (Эвенкийский район, общая мощность 14,1 МВт)⁶, пущенную в эксплуатацию в 2023 г., можно рассматривать как продолжение успешного опыта строительства и эксплуатации дизель-солнечных комплексов в соседней Республике Саха—Якутия, начиная с 2010-х гг. [6, 7].

Основные из известных на данный момент энергетических ресурсов территории — уголь крупнейшего в России Тунгусского бассейна [8], лесные и гидроэнергетические ресурсы. Однако разведка и освоение сталкиваются с экстремальными природными условиями и удаленностью территории.

Существовал проект создания Эвенкийской ГЭС [9] на реке Нижняя Тунгуска мощностью 8–12 ГВт (в случае реализации ГЭС стала бы крупнейшей в России и одной из крупнейших в мире), однако он был заморожен из-за протестов экологов, местных жителей и высокой стоимости⁷.

⁴ <https://www.aap.com.au/factcheck/does-europes-renewable-energy-mostly-come-from-burning-wood/#:~:text=Detailed%20figures%20from%20Eurostat%20show%20renewable%20energy%20accounted%20for%209.6%20per%20cent%20of%20the%20renewable%20electricity%20total> (дата обращения: 02.04.2025).

⁵ <https://www.infobio.ru/news/5399.html>, <https://lpk-sibiri.ru/bioenergetics/pellet-plants/razvitie-proizvodstva-pellet-v-krasnoyarskom-krae/> (дата обращения: 02.04.2025).

⁶ <https://dela.ru/news/278897/> (дата обращения: 02.04.2025).

⁷ <https://ecodelo.org/boguchanskayaGES> (дата обращения: 02.04.2025).

Таблица 2. Количество населенных пунктов и населения в зоне децентрализованного энергоснабжения**Table 2.** Quantity of settlements and population in the decentralized energy supply zone

Районы	Кол-во населенных пунктов	Кол-во населения, тыс. чел.	Доля от всего населения этих районов, %
Таймырский Долгано-Ненецкий (без м/о “город Норильск” и г. Дудинка)	21	7.13	94.2
Эвенкийский	23	13.33	100.0
Туруханский	25	9.86	77.1
Северо-Енисейский	1	0.12	2.0
Енисейский	16	5.23	23.0
Мотыгинский	2	0.11	0.8
Богучанский	4	0.41	0.9
Кежемский	3	0.82	3.9
Всего	95	37.01	22.8

Лесные ресурсы существенно беднее, чем в южной части Красноярского края. Большая часть Туруханского района, Эвенкийский район и юго-западная часть Таймырского района лежат в подзоне северной тайги, представленной, главным образом, лиственницей, остальная часть Таймырского района — в зоне тундры⁸. В то же время лесные ресурсы Туруханского и Эвенкийского районов могут быть достаточными для энергообеспечения на местном уровне. В Туруханском и Эвенкийском районе дрова используются в качестве топлива; кроме того, локально ведутся промышленные лесозаготовки⁹, что создает базу для производства и древесных пеллет.

Также проводились исследования ветроэнергетических ресурсов Красноярского края [10]. Было выявлено несколько ветровых зон. Максимальным ветроэнергетическим потенциалом отличается Таймырский район, где среднегодовые скорости ветра на высоте 10 м почти повсеместно превышают 5 м/с, а в его северо-западной части, на побережье Енисейского залива — 6 м/с. Авторами были проведены расчеты экономической эффективности ветроэнергетических комплексов в условиях Таймыра и показано, что стоимость ветровой электроэнергии существенно ниже по сравнению с дизельным топливом, а сроки окупаемости ветроэнергетических комплексов должны составить, в зависимости от используемого оборудования и типа потребления, от 1.6 до 7.6 года.

В Туруханском и Эвенкийском районах, равно как и на остальной территории Красноярского края, ветроэнергетические ресурсы существенно меньше — средние скорости ветра на большей части территории 3–4 м/с, в отдельных районах, главным образом, вдоль Енисея — до 5 м/с.

⁸ <https://nationalatlas.ru/tom2/331.html> (дата обращения: 02.04.2025).

⁹ https://evenkiya-r04.gosweb.gosuslugi.ru/dlya-zhiteley/novosti-i-reportazhi/novosti_390.html (дата обращения: 02.04.2025).

В то же время для принятия решений о строительстве ветроэлектростанций необходимо учитывать не только среднегодовую скорость ветра, но и его внутригодовой режим. Так, в Таймырском районе средняя скорость ветра в летние месяцы в 1.3–1.5 раза ниже, чем в зимние, а внутригодовая повторяемость скоростей ветра ниже 3 м/с (минимальная стартовая скорость для большинства ветрогенераторов¹⁰) превышает 0.2 [10], что означает риски простоя ветроустановок в течение более 20% времени в году. В пределах года разброс скоростей ветра на Таймыре может меняться от 0 до 35–40 м/с при максимальной повторяемости, в сумме — около 0.5, скоростей от 4 до 9 м/с [10], что означает и резкие колебания выработки электроэнергии, учитывая то, что ее значение пропорционально кубу скорости ветра. Как следствие, в дополнение к ветроагрегатам необходимы, с одной стороны, резервные мощности, работающие на других источниках энергии, с другой — аккумулирующие мощности. Для точных расчетов в точке предполагаемого строительства ВЭС требуется проведение дополнительного ветромониторинга.

На данный момент отсутствует информация о действующих ветровых станциях на территории края; существуют планы их строительства, в частности, ВЭС мощностью 200 МВт на Таймыре¹¹, но, по всей вероятности, их реализация отодвигается.

Также проводились исследования перспектив использования ВИЭ в децентрализованных районах Красноярского края [11]. В данном случае рассматривались перспективы солнечной и гидроэнергетики, и в качестве наиболее перспективных районов с точки зрения природных условий для обоих направлений возобновляемой энергетики был выделен ряд южных районов Красноярского края.

В то же время обращает на себя внимание солнечно-энергетический потенциал Эвенкийского и Туруханского районов и территорий к югу от 60°–62° с.ш. Общий тренд поступающей солнечной радиации и, как следствие, производительности солнечных батарей в России заключается в увеличении не только с севера на юг, но и с запада на восток, с ростом континентальности климата, обуславливающей небольшую облачность и большое количество часов и дней с солнечным сиянием. Именно эта тенденция была использована в Якутии, а позже и в Эвенкийском районе (см. выше).

По направлению от Москвы до Верхоянска производительность солнечных модулей растет, несмотря на повышение широты (рис. 2). В центральной части Эвенкии она будет примерно той же, что и в центре европейской части России к востоку от Москвы, на линии Владимир-Чебоксары — 3.31–3.33 кВтч/кВт в сутки. Таким образом, в южных частях Туруханского района, центральных, южных и восточных частях Эвенкийского района возможна эффективная работа солнечных батарей, как минимум в летнее время.

Если говорить о Таймырском районе, производительность солнечных батарей меняется примерно от 2.87 кВт ч/кВт (Диксон) до 3.07 кВт ч/кВт (Хатанга), что дает основания рассматривать целесообразность использования солнечных батарей в летнее время в юго-восточных частях района. В то же время во всех случаях следует учитывать отсутствие солнца в ночное время и малое количество или полное отсутствие поступления солнечной энергии зимой. В частности, в Туре среднесуточная

¹⁰ <https://inner.su/articles/tablitza-vetrogeneratorov-moshchnost-ot-skorosti-vetra-kharakteristiki-2025/> (дата обращения: 15.07.2025).

¹¹ <https://rawi.ru/2022/07/novaya-ves-na-taymyre-moshhnostyu-200-mvt-mozhet-nachat-rabotu-v-2024-godu/> (дата обращения: 02.04.2025).

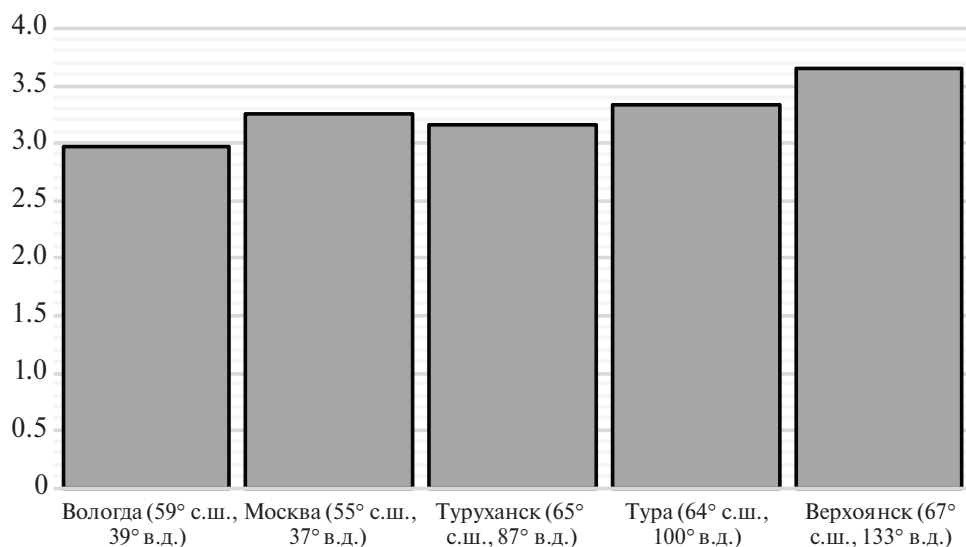


Рис. 2. Расчетная годовая среднесуточная выработка электроэнергии (кВт ч) солнечным модулем “Хевел-395” мощностью 1 кВт, расположенным под углом к горизонтальной поверхности, равном широте местности, в отдельных точках на территории России (составлено авторами на основе данных¹²).

Fig. 2. Estimated annual average daily electricity generation (kW h) by a Hevel-395 solar photovoltaic module of 1 kW capacity, located at an angle to the horizontal surface equal to the latitude of the terrain at certain points on the Russia’s territory (created by the authors using the information¹²).

производительность солнечного модуля “Хевел-395” мощностью 1 кВт, ориентированного к земной поверхности под углом, равным широте, будет варьировать от 0.5 кВт ч в декабре до 5.5 кВт ч в апреле¹³. В данном случае, так же как и с ветроустановками, необходимы аккумулирующие и резервные мощности, компенсирующие дефицит выработки электроэнергии в определенные периоды.

Оценка энергетических потребностей северных районов Красноярского края и варианты их обеспечения

Годовые объемы северного завоза в исследуемый регион: уголь в Таймырский и Туруханский районы — 71.4 тыс. т, нефтепродукты в Туруханский и Эвенкийский районы — 21.3 тыс. т, сырая нефть в Эвенкийский район — 12.2 тыс. т [12]. В пересчете на энергетический эквивалент это в сумме составляет примерно 1 млрд кВт ч энергии. Долю топлива, используемую для производства электроэнергии, можно оценить в 50%, или 500 млн кВт ч. При КПД тепловых электростанций (в частности, ДЭС), равном 40%, означает выработку примерно 200 млн кВт ч. Численность населения этих трех районов (исключая Дудинку, получающую электроэнергию из Таймырского энергорайона) составляет 37 тыс. человек; таким образом, душевое производство и потребление электроэнергии составляет примерно 5400 кВт ч в год.

¹² <https://gisre.ru/map-sunres/photovoltaic> (дата обращения: 02.04.2025).

¹³ <https://gisre.ru/map-sunres/photovoltaic/?lat=63.5&lon=99.5&model=Hevel&comment=lat> (дата обращения: 16.07.2025).

Теоретически для выработки 200 млн кВт ч электроэнергии в год в природных условиях региона требуется примерно 230 тыс. кВт (округленно) солнечных электроэнергетических мощностей со среднегодовым коэффициентом установленной мощности (КИУМ), равным 10%, или 115 тыс. кВт ветроэлектростанций с КИУМ, равным 20%. В пересчете на душу населения это составит, соответственно, 6 кВт СЭС либо 3 кВт ВЭС (округленно).

Исходя из имеющихся данных об инвестиционных затратах на строительство солнечных (СЭС) и ветровых (ВЭС) электростанций России [13] и международных оценок [14], с поправкой на усложненную логистику исследуемой территории, можно предварительно оценить удельные инвестиционные затраты на строительство СЭС в 100 000 руб./кВт, ВЭС — 150 000 руб./кВт.

В свою очередь, это означает душевые затраты в 450–600 тыс. рублей, для обеспечения одного населенного пункта в 100 человек — 45–60 млн рублей, а для всего населения энергоизолированных территорий Красноярского края — 17–23 млрд рублей.

При этом следует учитывать неравномерность выработки энергии, прежде всего — практически полное отсутствие солнечной энергии в зимнее время. В частности, расчетная среднесуточная выработка солнечной энергии 1 кВт солнечной электростанции в Туре достигает 6 кВт ч в светлое время года и снижается до 0.4 кВт ч в декабре при среднегодовой величине 3.3 кВт ч/сутки (см. выше), притом что зимой потребность в электроэнергии выше, чем летом.

Таким образом, при любом количестве установленных солнечных и ветровых мощностей потребуются сохранение резервных мощностей ДЭС и их использование в периоды суточного и сезонного энергетического дефицита. При этом в летнее время с большой вероятностью образуется избыточное количество электроэнергии, что потребует отключения значительной части мощностей. Теоретическим выходом может стать аккумуляция энергии, но это потребовало бы в масштабах всей энергоизолированной территории десятков миллионов кВт ч аккумулирующих мощностей, что при удельных капиталовложениях в системы аккумуляции более \$200/кВт ч [15] означало бы дополнительные инвестиции в объемах порядка миллиардов долларов США или сотен миллиардов рублей — затраты, на порядок превышающие инвестиции в собственно строительство электростанций на ВИЭ.

В связи с этим целесообразным представляется, при сохранении комбинации ДЭС-ВИЭ, постепенное наращивание мощностей ВИЭ вплоть до достижения оптимального соотношения мощностей ВИЭ и ДЭС. Это позволит экономить дизельное топливо и, как следствие, сокращать объемы “северного завоза”.

В настоящее время на основе опыта эксплуатации дизель-солнечных электростанций в Республике Саха—Якутия¹⁴ можно рассчитать, что работа 1 кВт солнечной электростанции позволяет сэкономить 0.3–0.4 т дизельного топлива в год (что эквивалентно выработке 1000–1200 кВт ч на 1 кВт установленной мощности). При оптовых ценах дизельного топлива в настоящее время около 90 тыс. руб./т¹⁵ это означает ежегодную экономию более 30 тыс. рублей и, как следствие, простой срок окупаемости солнечных модулей менее 3.5 года; при расчетах с использованием ставки дисконтирования в 10% срок окупаемости увеличивается до 4 лет.

¹⁴ https://rushydro.ru/activity/production/solnechnaya-generatsiya/?ysclid=m7hti2zrsj32613301&utm_source=yandex.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.ru&utm_referrer=yandex.ru (дата обращения: 02.04.2025).

¹⁵ <https://ttk.nornickel.ru/prices/> (дата обращения: 02.04.2025).

В свою очередь, использование ветровой энергии в районах с благоприятными условиями (см. рис.1) может означать ежегодную экономию, учитывая более высокий КИУМ ВЭС, 0.6–0.8 т дизельного топлива в год на 1 кВт установленной мощности; таким образом, простой срок окупаемости составит 2.4 года, дисконтированный — около 3 лет.

В плане оценки экономической эффективности представляет интерес также сокращение внешних, или экстернальных, издержек (экстернальностей, externalities, или external costs) [16, 17]. Несмотря на высокую степень неопределенности и даже субъективности в такого рода оценках, в первом приближении можно взять за основу количество выбросов парниковых газов, сокращающееся за счет замещения ВИЭ части дизельного топлива. При сжигании 1 т мазута в атмосферу эмитируется 3.1 т CO₂-экв¹⁶, таким образом, 1 кВт СЭС снижает выбросы в среднем на 1 т в год, 1 кВт ВЭС — на 2 т ежегодно. Оценить эффект в денежном эквиваленте можно через котировки CO₂ на бирже — в среднем цена 1 т CO₂ составляет \$70¹⁷, или 6200 руб., то дополнительное сокращение издержек или дополнительный рост дохода от использования 1 кВт СЭС составит 2170 руб. в год, 1 кВт ВЭС — 4340 руб. в год. Этот эффект можно использовать и для строительства электростанций на основе ВИЭ в рамках “климатических проектов” [18].

В свою очередь, для выбора оптимальной структуры мощностей ВИЭ (доли ветровых, солнечных, гидро-, в перспективе также биоэнергетических электростанций) принципиальное значение имеют местные условия. В Туруханском и Эвенкийском районах существуют возможности развития электроэнергетики на основе солнечной энергии, биоэнергии древесных отходов и гидроэнергии малых рек.

В Таймырском районе существенно лучше условия использования ветровой энергии, однако почти отсутствует биоэнергетический ресурс, существенно меньше ресурсы солнечной энергии, а также, вероятно, ниже потенциал гидроэнергии в силу более длительного периода замерзания рек.

Дополнительным фактором является доступность и специализация территории. В целом Туруханский и Эвенкийский районы отличаются лучшей транспортной доступностью со стороны краевого центра по сравнению с Таймырским районом, что в принципе создает лучшие перспективы для развития, в том числе — энергетики на местных источниках.

С другой стороны, Таймырский район имеет выход к Северному морскому пути и, одновременно, граничит с крупным Норильским горнопромышленным центром. Таймырский район отличается более высокой численностью населения, чем Туруханский и Эвенкийский районы, вместе взятые, при несколько меньшей территории (см. табл. 1). При этом, в отличие от Туруханского и Эвенкийского районов с относительно дисперсным расселением, практически все население (более 95%) Таймырского района сосредоточено в трех населенных пунктах: городе Дудинке (19 тыс.) и поселках Караул (3.8 тыс.) и Хатанга (5.4 тыс.). Все три населенных пункта привязаны к Севморпути; Дудинка также к Норильску. Исходя из текущего потепления климата, ведущего к сокращению площади морских льдов и увеличению безледного периода в арктических морях, а также изменения геополитической

¹⁶ <https://sro150.ru/index.php/metodiki/371-metodika-rascheta-vybrosov-parnikovyykh-gazov> (дата обращения: 02.04.2025).

¹⁷ <https://ru.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data> (дата обращения: 02.04.2025).

и экономической конъюнктуры — переориентации на восточноазиатские рынки, можно предположить улучшение перспектив использования Севморпути в качестве транспортного коридора. Программа его развития утверждена в качестве официального документа¹⁸. Это открывает перед Таймырским районом дополнительные возможности, а также означает увеличение его потребностей в новых энергетических мощностях.

Таким образом, существуют принципиальные различия между районами. Туруханский и Эвенкийский районы можно рассматривать как сельскую периферию Красноярского края с возможным очаговым или линейным вдоль Енисея развитием небольших промышленных производств. Вряд ли ситуация принципиально изменится в обозримой перспективе.

Таймырский район имеет собственный источник экономического роста и развития, связанный с крупной и перспективной морской магистралью и ближайшим крупным промышленным центром. Как следствие, и более активная разработка природных ресурсов региона в обозримой перспективе более вероятна в Таймырском районе, чем в Эвенкийском.

В этой ситуации Туруханский и особенно Эвенкийский район становятся своего рода обширным природным хинтерландом между Красноярском и Транссибирской магистралью, с одной стороны, и Таймыром — с другой.

В связи с этим, в контексте возобновляемой энергетики, для Таймыра наиболее реалистичным сценарием выглядит опора на относительно крупные ветропарки, привязанные к крупным населенным пунктам и, вероятно, связанные с Норильским энергорайоном. При этом автономное энергообеспечение на основе местных ВИЭ для ряда небольших и отдаленных точек выглядит довольно сложной задачей.

Тем не менее сложней и дороже являются экологические последствия использования традиционного углеводородного топлива. Так, 29 мая 2020 г. на Норильской ТЭЦ-3 произошел разлив топлива, было загрязнено более 180 тыс. м². Из резервуара вылились более 21 тыс. т дизельного топлива и попали в реки Амбарная и Далдыкан. В р. Амбарная попало около 15 тыс. т. Предельно допустимая концентрация (ПДК) вредных веществ в реке превысила норму в 10 000 раз. Кроме того, в грунт попали еще около 6 тыс. т нефтепродуктов. На территории Красноярского края из-за разлива была объявлена чрезвычайная ситуация федерального масштаба¹⁹.

В свою очередь, для Туруханского района, Эвенкии и прилегающих северных частей Енисейского, Северо-Енисейского, Мотыгинского, Богучанского и Кежемского районов перспективным в обозримом будущем является развитие диверсифицированной (включающей солнечную, гидро- и биоэнергетику) энергетики, представленной многочисленными малыми автономными мощностями в привязке к местным населенным пунктам и отдельным домохозяйствам. В отдаленной перспективе ситуация может измениться в случае дальнейшего усиления восточного вектора политики и экономики России, что может повлечь за собой более интенсивное освоение ресурсов данных территорий.

¹⁸ <http://government.ru/docs/46171/> (дата обращения: 16.07.2025).

¹⁹ <https://www.forbes.ru/obshchestvo-photogallery/402193-krupneyshaya-katastrofa-v-arktike-cto-izvestno-o-razlive-topliva> (дата обращения: 02.04.2025).

Заключение

Энергоизолированные территории Красноярского края можно разделить на две части: 1) северная — относящаяся к тундровой и лесотундровой зоне — это территория Таймырского Долгано-Ненецкого района (включая Дудинку и Диксон), лежащая, главным образом, к северу от линии Северного полярного круга; 2) южная — относящаяся, в основном, к северо-таежной зоне и включающая территории Туруханского, Эвенкийского (в т.ч. населенные пункты Игарка, Туруханск, Тура), и прилегающих к ним Енисейского, Северо-Енисейского, Мотыгинского, Богучанского и Кежемского районов (см. карту на рис. 1). В силу комплекса природных и экономико-географических условий в северной части, прилегающей к Северному Ледовитому океану и Севморпути, целесообразным представляется развитие прежде всего ветроэнергетики, в том числе строительство крупных ветростанций; в южной, внутриконтинентальной, предпочтительнее диверсифицированная малая автономная энергетика, включающая солнечные, гидроэнергетические, биоэнергетические мощности.

Полное замещение привозного ископаемого топлива местными ВИЭ на энергоизолированных территориях не представляется возможным в силу высоких инвестиционных затрат и нестабильности ВИЭ, однако целесообразно постепенное наращивание мощностей ВИЭ в составе гибридных (ДЭС-ВИЭ) систем, что позволит сэкономить часть топлива и сократить объемы его завоза. Сроки окупаемости проектов увеличения доли СЭС и ВЭС с точки зрения экономии привозного топлива оцениваются в величину 3–4 года, а с учетом снижения внешних издержек могут быть дополнительно сокращены.

Список литературы

1. Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России: науч. издание / Т.И. Андреев, Т.С. Габдрахманова, О.В. Данилова и др. — РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, 2015. — 160 с.
2. Корпачев В.П., Андрияс А.А., Пережилин А.И. Оценка объема отходов лесозаготовок в Красноярском крае // Вестник КрасГАУ. 2010. № 7. С. 7–10.
3. Татаринцева А.П. Методические указания по определению объемов вторичных древесных ресурсов. Утверждено Минлесбумпромом СССР. Гослесхозом СССР. Москва. 1988.
4. Майорова Л.П. К вопросу оценки объемов вторичных древесных ресурсов. Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2006. № 1(2), С. 65–80.
5. Макаренко Е.Л. Оценка образования отходов лесозаготовки и деревообработки в центральной экологической зоне Байкальской природной территории // Успехи современного естествознания. 2020. № 5. С. 63–69.
6. Дегтярев К.С., Синюгин О.А. Территориальная организация возобновляемой энергетики России // Окружающая среда и энергосодержание. 2024. № 1, с. 36–50.
7. Местников Н.П. Разработка способов повышения энергоэффективности солнечных электростанций в условиях Севера // Доклад на XIV Всероссийской научной молодежной школе “Возобновляемые источники энергии. Роль возобновляемой энергетики при переходе к углерод-нейтральной экономике”. Москва, географический факультет МГУ, 21.11.2024.
8. Обручев С.В. Тунгусский уленосный бассейн / Сергей Обручев. — М.: Тип. “Моск. изд-во”, 1919. 32 с., 1 л. карт.; 28 см.
9. Аблажей А.М., Аблажей Н.Н. Эвенкийская ГЭС: “за” и “против” (к истории обсуждения мегапроекта) // Исторический курьер. 2022. № 1 (21). С. 184–216. URL: <http://istkurier.ru/data/2022/ISTKURIER-2022-1-17.pdf>

10. Ветроэнергетика Красноярского края / А.В. Бастрон [и др.]; Краснояр. гос. аграр. ун-т. — Красноярск, 2015. 252 с.
11. Курочкина Ю.В., Носков М.Ф. Оценка возможности использования возобновляемых источников энергии в децентрализованных районах Красноярского края. // Гидроэлектростанции в XXI веке: сборник материалов заочного этапа VII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов (Саяногорск; Черемушки, 12 мая 2020 г.). Саяногорск; Черемушки: СШФ СФУ, 2020. С. 337–344. Библиогр.: с. 344 (4 назв.).
12. Соколов Ю.И. Риски северного завоза // Проблемы анализа риска. Т. 16. 2019. № 4. С. 32–47. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2019-16-4-32-47>
13. Дегтярев К.С., Березкин М.Ю., Синюгин О.А. Оценка инвестиционных затрат на переход к безуглеродной экономике в России к 2060 году // Окружающая среда и энергоснабжение. 2022. № 2. С. 29–39.
14. Renewable Power Generation Costs in 2022. IRENA, 2023.
15. Cole, Wesley and Akash Karmakar. 2023. Cost projections for utility-scale battery storage: 2023 update. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-6A40-85332. <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/85332.pdf>
16. Сердитова Н.Е. Теория экстерналий издержек окружающей среды / Н.Е. Сердитова // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2005. № 1. С. 145–162. EDN LVNUTK
17. Welsch Heinz (2016). Electricity externalities, siting, and the energy mix: a survey. Oldenburg Discussion Papers in Economics. No. V-394-16, University of Oldenburg, Department of Economics, Oldenburg.
18. Дегтярев К.С., Синюгин О.А., Березкин М.Ю. Развитие финансово-рыночных инструментов низкоуглеродного развития в России // Окружающая среда и энергоснабжение. 2023. № 2. С. 16–29.

Prospects for the Use of Renewable Energy Sources in the North of the Krasnoyarsk Territory

M.Yu. Berezkin, K.S. Degtyarev*, O.A. Sinyugin

Lomonosov Moscow State University

*E-mail: kir1111@rambler.ru

Received 09.04.2025

Revised 17.07.2025

Accepted 24.07.2025

The article evaluates the volume and structure of local renewable energy resources in the northern regions of the Krasnoyarsk Territory, characterized by extreme natural conditions, low population density and isolation from main power transmission lines. This is the territory north of Angara, the main part of which falls on the Taimyr Dolgan-Nenets, Evenki and Turukhansky districts. Electricity in these areas is produced using expensive imported fossil fuels, and an urgent task is to assess the possibilities of replacing it with local renewable energy resources — solar, wind, hydro, and bioenergy. The article examines the potential of these sources, differentiates the territory in terms of their volume and territorial distribution. There are two zones within the study area. In the northern one, the Taimyr region, the development of wind energy, including the construction of large wind farms, is preferable. In the south one, represented by Evenki, Turukhansk and adjacent districts, small autonomous diversified energy

sector, represented by solar power plants, hydroelectric power plants and bioenergy stations, is promising. Taimyr is a territory linked to the Northern Sea Route and the Norilsk industrial district. Thus, the territory between it and the economically developed south of the Krasnoyarsk Territory becomes a kind of vast natural hinterland. It is impossible to completely replace imported fuels with local resources due to the instability of renewable sources, but gradually increasing their share within the framework of hybrid energy complexes is effective. Diesel fuel savings are 0.3–0.8 tons per year, and CO₂ emissions reduction is 1–2 tons per year for every 1 kW of installed solar or wind power plant capacity. The payback period for a unit of installed capacity based on renewable sources will be 3–4 years, and reducing external costs provides additional economic benefits.

Keywords: Krasnoyarsk Territory, Taimyr district, Evenki district, renewable energy sources, solar energy, wind energy, hydropower, bioenergy, renewable energy economics, energy supply

References

1. Atlas of renewable energy sources in the Russian Territory: scientific edition / T.I. Andreenko, T.S. Gabderahmanova, O.V. Danilova et al. RHTU named after D.I. Mendeleev, 2015, 160 p. Atlas resursov vozobnovlyaemoi energii na territorii Rossii. (in Russ.)
2. Korpachev V.P., Andriyas A.A., Perezhilin A.I. Estimation of the lumbering waste in Krasnoyarsk Region // The Bulletin of KrasGAU, 2010, 7, 7–10. Ocenka obema otxodov lesozagotovok v Krasnoyarskom krae. Vestnik KrasGAU (in Russ.).
3. Tatarintseva A.P. Methodological guidelines for determining the volume of secondary wood resources. Approved by the USSR Ministry of Forestry and Industry. Gosleskhov of the USSR. Moscow. 1988. Tatarinceva A.P. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu obemov vtorichnyx drevesnyx resursov. Utverzhdeno Minlesbumpromom SSSR. Gosleskhozom SSSR. (in Russ.)
4. Mayorova L.P. On the issue of estimating the volume of secondary wood resources. Bulletin of the Far-East State University, 2006, 1(2), 65–80. K voprosu ocenki obemov vtorichnyx drevesnyx resursov. Vestnik Tixookeanskogo gosudarstvennogo universiteta. (in Russ.)
5. Makarenko E.L. Assessment of forestry and woodworking waste formation in central ecological area of the Baikal natural territories // Advances of the Modern Natural Sciences [Uspekhi Sovremennogo Estestvoznaniya]. — 2020, 5, 63–69. Ocenka obrazovaniya otxodov lesozagotovki i derevoobrabotki v centralnoj ekologicheskoy zone Bajkalskoj prirodnoj territorii. Uspexi sovremennogo estestvoznaniya. (in Russ.)
6. Degtyarev K.S., Sinyugin O.A. Territorial design of renewable power industry in Russia // Journal of Environmental Earth and Energy Study, 2024, 1, 36–50. (in Russ.)
7. Mestnikov N.P. Development of ways to increase the energy efficiency of solar power plants in the conditions of the North // Report at the XIV All-Russian Scientific Youth School “Renewable energy sources. The role of renewable energy in the transition to a carbon-neutral economy”. Moscow, Faculty of Geography, Moscow State University, 11/21/2024 (in Russ.)
8. Obruchev S.V. Tunguska coal-bearing basin — Moscow: Tip. “Moscow. publishing house”, 1919. 32 p. (in Russ.)
9. Ablazhey A.M., Ablazhey N.N. Evenki HPP: “pros” and “cons” (on the history of the mega-project discussion) // Historical Courier (Istoricheskij kur'er), 2022, 1 (21), 184–216. URL: <http://istkurier.ru/data/2022/ISTKURIER-2022-1-17.pdf> (in Russ.)
10. Wind energy of Krasnoyarsk Region / A.V. Bastron [et al.]; Krasnoyarsk State Agrarian University, 2015, 252 p. (in Russ.)
11. Kurochkina Yu.V., Noskov M.F. Assessment of the possibility of using renewable energy sources in decentralized areas of the Krasnoyarsk Territory // Hydroelectric power plants

in the XXI century: a collection of materials from the correspondence stage of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists, specialists, postgraduates and students (Sayanogorsk; Cheryomushki, May 12, 2020). Sayanogorsk; Cheryomushki: SSHF SibFU, 2020, 337–344. (in Russ.)

12. Sokolov Yu. I. Risks of northern importation (Riski severnogo zavoza) // Problems of risk analysis. Vol. 16. 2019. 4, 32–47. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2019-16-4-32-47> (in Russ.)

13. Degtyarev K.S., Sinyugin O.A., Berezkin M.Yu. Estimations of the investment costs for transition to carbon-free economy in Russia by 2060 // Journal of Environmental Earth and Energy Study, 2022, 2, 29–39. (in Russ.)

14. Renewable Power Generation Costs in 2022. IRENA, 2023.

15. Cole, Wesley and Akash Karmakar. 2023. Cost projections for utility-scale battery storage: 2023 update. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-6A40-85332. <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/85332.pdf>

16. Serditova N.E. Theory of environmental externalities // Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University, 2005, 1, 145–162. EDN LVNUTK

17. Welsch Heinz (2016). Electricity externalities, siting, and the energy mix: a survey. Oldenburg Discussion Papers in Economics, No. V-394-16, University of Oldenburg, Department of Economics, Oldenburg.

18. Degtyarev K.S., Sinyugin O.A., Berezkin M.Yu. Development of financial and market instruments of low-carbon development in Russia // Journal of Environmental Earth and Energy Study, 2023, 2, 16–29. (in Russ.)

УДК 556.16:504.064(282.256.82)

ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТОКА НАНОСОВ РЕК В БАСЕЙНЕ ИНДИГИРКИ

© 2025 г. Д.В. Магрицкий*, Д.И. Школьный, П.Г. Илюшина

*Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия***E-mail: magdima@yandex.ru*

Поступила в редакцию 17.04.2025 г.

После доработки 09.07.2025 г.

Принята к публикации 25.07.2025 г.

С 1990-х гг. в бассейне р. Индигирка существенно изменились климатические условия формирования стока и состояние многолетнемерзлых пород, установлено увеличение водности и температуры воды рек — на 20% (и менее) и на 0.5–1°C. Несмотря на это, сток взвешенных наносов в 1990–2000-е гг. уменьшился на 6–33%, и лишь с середины–конца 2000-х гг. наблюдается его резкое увеличение (вплоть до величин 50–220%). К отсутствию первоначальной положительной динамики могли привести в том числе негативные процессы в горнодобывающей отрасли и в системе гидрологического мониторинга. Поэтому задачами исследования стали анализ первичной гидрологической информации, многолетней динамики расходов воды и наносов, температуры воды рек в бассейне Индигирки, особенностей развития местной добычи полезных ископаемых, оценка вклада в многолетнюю изменчивость стока наносов антропогенных и естественных факторов. Исходными данными послужили материалы 22 постов, разновременные спутниковые снимки, разнообразные данные по горнодобывающей отрасли. Определены реки и районы бассейна, находящиеся под воздействием горнодобычи, обоснованы аналитические связи между годовым стоком наносов и его гидрологическими факторами. Установлено, что негативные процессы в горнодобывающей отрасли на рубеже XX и XXI вв. объясняют менее 20–40% уменьшения стока наносов, остальное обусловлено естественными гидрологическими изменениями. Последующий “взрывной” рост стока наносов обеспечили как гидрометеорологические, так и антропогенные факторы. Впервые проведен комплексный анализ достоверности данных стационарных наблюдений; создана геоинформационная база разрабатываемых месторождений и нарушенных пойменно-русловых комплексов.

Ключевые слова: река, пост, мониторинг, сток воды и наносов, добыча полезных ископаемых, многолетние изменения

DOI: 10.31857/S0869607125030091, EDN: LTYNVT

Введение

Извлечение полезных ископаемых из недр Земли (открытым или подземным способами), их первичная обработка и получение концентрата (далее — *горная добыча*, или *горнодобыча*, *недропользование*) наряду с эксплуатацией водохранилищ и распашкой водосборов служит мощным антропогенным фактором нарушения естественного режима стока наносов рек. В отличие от водохранилищ, горнодобыча увеличивает сток наносов за счет: 1) сброса в реки технологических (сточных) вод,

сильно насыщенных взвесями; 2) выбросов взвесей в атмосферу во время взрывных работ и работы самосвалов в карьерах, с последующим выпадением из воздуха в реки; 3) разрушения почвенно-растительного покрова, на восстановление которого в холодных условиях может потребоваться несколько десятилетий, изменения температурного режима многолетнемерзлых пород и активизации термоэрозионных процессов; 4) переработки русел, речной поймы и изменения характера русловых процессов; 5) создания отвалов пустых/отработанных пород, в последующем интенсивно размываемых дождями и склоновыми потоками; 6) техногенных аварий, например прорыва прудов-отстойников, хвостохранилищ [1, 8, 11, 12, 14, 16, 25, 32]. Причем третий и в какой-то мере четвертый, пятый и шестой факторы будут продолжать увеличивать сток наносов и после прекращения добычи. Влияние деятельности горнодобывающих предприятий может распространяться на значительные расстояния [1, 13, 21, 32, 39]. Если оно достигает гидрологического поста, где измеряют сток наносов, эти изменения будут обнаружены. Однако, если пост был открыт после начала добычи, этого не произойдет, и использование таких данных способно привести к ошибочным выводам и решениям. Как раз такая ситуация имеет место для азиатской части страны, где массовый мониторинг стока наносов начался в 1950–1960-е гг. (с максимальным количеством постов с середины 1970-х по 1980-е гг.), когда значительная часть месторождений уже разрабатывались. При этом вопрос учета влияния добычи полезных ископаемых на данные постов, использовавшиеся, например, при составлении карты “Средней мутности рек СССР”, при обосновании уравнений расчета модуля стока наносов для эрозионных районов [6, 17, 28, 30] практически обойден вниманием. В [9] этот аспект рассматривается через призму изменений естественных ландшафтов вследствие сведения лесов и распашки земель. В работе [4] вопрос возможного влияния добычи полезных ископаемых на сток наносов решен выделением таких районов на новой карте “Средней годовой мутности рек”, составленной по данным до середины 1990-х гг.

В 2019 г. авторами была подготовлена база данных по почти 200 постам (с наблюдениями за расходами наносов) на реках водосборов арктических морей России. Их анализ привел к неожиданным выводам [20]: несмотря на доминирование в регионе рек с общим увеличением водного стока [31], а также рост температуры воды и теплового стока [37, 38, 43, 44] как одного из факторов термоэрозии многолетнемерзлых пород [34], большинство постов демонстрировали статистически значимое уменьшение стока наносов, прежде всего за счет снижения мутности с 1990-х гг. Причин такой тенденции могло быть несколько — резкое сокращение хозяйственной деятельности, изменения в самой системе стационарного мониторинга, климатические изменения и их гидрологические последствия. Впоследствии доминирующую роль негативных процессов в горнодобывающей отрасли удалось доказать на примере рек бассейна р. Алдан [21], где уменьшение стока наносов было особенно значительным, хотя у фонового объекта — р. Ботомы — оно не обнаружено.

К северу от р. Алдан расположен бассейн р. Индигирка, где с середины XX в. также осуществляется масштабная добыча полезных ископаемых, которая до сих пор практически не изучена. Здесь ее воздействие на сток наносов рек, вклад в многолетнюю изменчивость имеет существенные отличия. Чтобы их объяснить, задачами проведенного исследования стали, во-первых, анализ горнодобывающей деятельности в бассейне Индигирки — в прошлом и настоящем, во-вторых, изучение многолетних колебаний стока воды и наносов, характеристик водного и термического режима рек, обоснование эмпирических зависимостей между стоком наносов и его

гидрологическими факторами, в-третьих, по итогам решения первых двух задач, — оценка роли горнодобычи и естественных факторов в современных изменениях стока наносов Индигирки и ее притоков.

Материалы и методы исследований

Информационной основой для исследований послужили несколько типов данных. Прежде всего это ряды среднемесячных, среднегодовых и максимальных расходов воды Q , температур воды T , мутности воды S и расходов взвешенных наносов R по 22 гидрологическим постам. Причем на 17 постах, на которых когда-либо измеряли мутность воды и расходы взвешенных наносов (рис. 1), 3 поста расположены на главной реке, 7 постов — на притоках с площадью водосбора (F) меньше 200 км^2 , 4 — на средних реках с $F > 2000 \text{ км}^2$. На всех постах, за исключением Воронцова, расходы наносов определяются основным методом: через среднюю мутность, рассчитываемую по единичной мутности и переходному коэффициенту, и расход воды. На посту Воронцово сток наносов вычисляется с декадным шагом по графикам связи $R = f(Q)$.

Начало массовых измерений s и R датируется в бассейне Индигирки 1950–1970-ми гг., т.е. уже в условиях недропользования (табл. 1). К настоящему времени

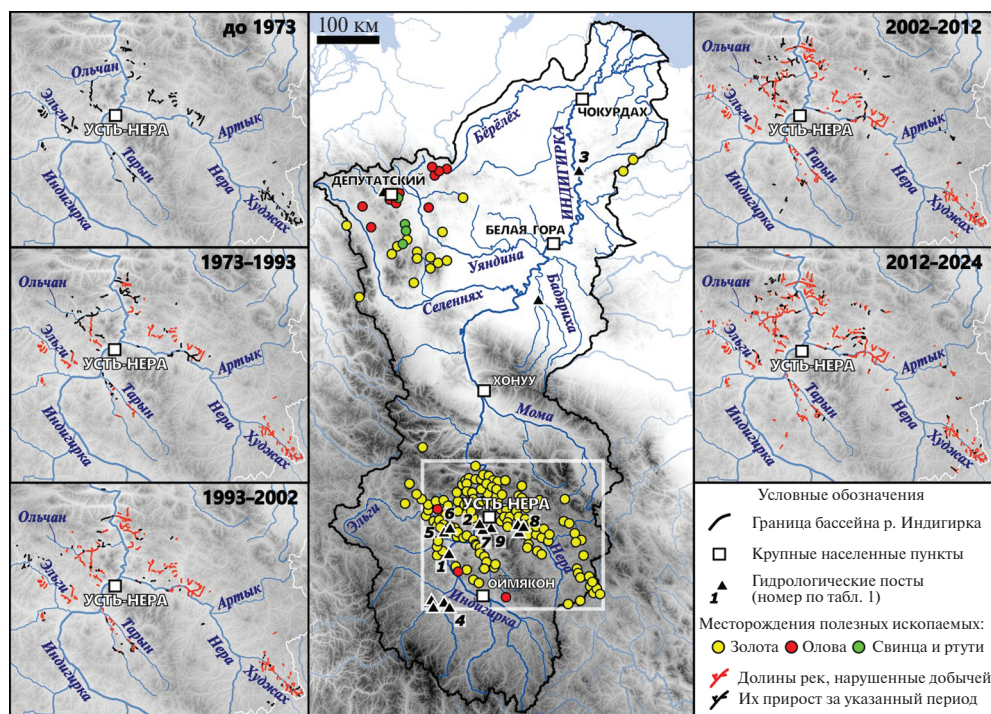


Рис. 1. Схема бассейна р. Индигирка с указанием месторождений и гидрологических постов. На врезках (слева и справа от основной карты) показана динамика прироста нарушенных речных долин в средней и южной части бассейна. Номера постов, по которым использованы данные в исследовании, соответствуют нумерации в табл. 1.

Fig. 1. Scheme of the Indigirka River basin with mineral deposit fields and hydrological gauges. On insets — the dynamics of increase of disturbed river valleys. The numbering of the posts corresponds to the numbering in the table 1.

Таблица 1. Средние за пятилетия и десятилетия среднегодовые расходы взвешенных наносов (кг/с, числитель) и мутность воды (г/м³, знаменатель)

Table 1. Averaged (over pentads and decades) the annual discharges of suspended sediments (kg/s, numerator) and water turbidity (g/m ³ , denominator)		1951— 1955	1956— 1960	1961— 1970	1971— 1980	1986— 1990	1991— 1995	1996— 2000	2001— 2005	2006— 2010	2011— 2015	2016— 2020
Река — пост, площадь водосбора, км ²												
1. р. Индигирка — ГМС Юрты, 51100		н. д.	39** 164	20.6 89.0	23.0 94.1	10.9 44.4	3.3** 19.5	н. д.	18.5* 72.5	н. д.	н. д.	н. д.
		25 60.1	42.2 94.6	48.5 110	39.2 97.8	40.4 94	24.2 70.7	37.1 75.6	38.2 80.6	22.2 48.2	53** 91.4	н. д.
2. р. Индигирка — п. Индигирский, 83500		н. д.	339 220	469 281	307 203	300** 203	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
		н. д.	н. д.	н. д.	0.076* 25.8	0.054 23.6	0.074 32.4	0.063** 22.8	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
3. р. Индигирка — ГМС Воронцово, 305000		н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
		н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
4. р. Ючутей-Юрях — ГМС Агайкан, 1160		н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
		н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
5. р. Эльги — “5 км выше устья р. Артык-Юрях”, 17600		н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
		н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
6. р. Артык-Юрях — “3.5 км от устья”, 644		н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
		н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
7. руч. Чаптахай — устье, 25.8***		н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
		н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
8. р. Нера — п. Ала-Чубук, 22300		н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
		н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
9. руч. Амбар-Юрюегэ — г.п. Ремпункт, 16.6		н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
		н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.

* по неполным данным, ** по 1—3 годам, *** расходы наносов в г/с, н. д. — нет данных.

на Индигирке и Нере мониторинг наносов прекращен; на р. Эльги и Артык-Юрях, ручьях Чаптахай и Дунай измерения продолжают [48]. Как следствие, ряды мутности воды и расходов наносов сравнительно короткие, не охватывают последних лет, имеют много пропусков, которые по возможности заполнялись авторами по связям вида $R = f(Q)$ (при $r > 0.7$).

При анализе исходных данных по мутности и расходам наносов выяснено, что чаще всего встречающиеся причины их пониженной точности — это перенос станции (например, ближе к берегу) и нерепрезентативность места отбора единичных проб воды на мутность (причина № 1), малые навески наносов на фильтрах (№ 2), недостаточное число фактических измерений расходов наносов (№ 3), слабая или неоднозначная связь между единичной и средней мутностью или между R и Q (№ 4), ошибки в измерениях Q (№ 5). Тем не менее в гидрологических ежегодниках размещают данные с предельными отклонениями менее ± 15 –20 [26]. Мало того, в 1978–1980 гг. была проведена комплексная проверка публикуемых данных балансовым методом, показавшая их приемлемую точность. Также авторами статьи выяснено, что первые упоминания о серьезных ошибках датируются серединой 1970-х гг., и таких случаев становилось все больше со второй половины 1980-х гг. и особенно с 1990-х гг. Много ненадежных данных у Юрты: в существенной мере — это 1972, 1974, 1984, 1988–1990 и 2005 гг., в меньшей мере (за отдельные месяцы — обычно за май–июнь) — 1978, 1983, 1986, 1987, 1991, 1993 гг. На Индигирском снижение достоверности связано с нерепрезентативностью точки отбора проб воды: в течение всего сезона (1978, 1986, 1988, 1993) или в отдельные месяцы (1985, 1991, 1999, 2006, 2007 и 2011 гг.), а также по причине № 2 (1994). В Воронцово — это 1974, 1978, 1983–1985 гг. (причина № 1, 2); пост на р. Эльги (№ 1) — 1988, 1989, 2000 гг. (в течение всего сезона) и 1991, 2006–2008, 2011 гг. (в отдельные месяцы), пост на р. Нера — соответственно 1984, 1987, 2006, 2011 гг. и 1986, 1989–1991, 1993–1995, 1999, 2007–2010 гг.

Второй массив данных составили сведения по разрабатываемым (в настоящем и прошлом) месторождениям полезных ископаемых: об их местоположении, времени начала и этапах освоения, масштабах добычи и их многолетней динамике, изменениях в характере добычи. В работе использованы только открытые данные: векторно-растровые слои и атрибутивные к ним таблицы с сайта “ГИС — атлас “Недра России” [45], ежегодные “Государственные доклады о состоянии окружающей среды Республики Саха (Якутия)” [46], сведения из СМИ, научных и справочных публикаций, с сайтов компаний и др. Месторождения, эксплуатируемые с 1980–1990-х гг., определялись в том числе по спутниковым снимкам.

Третий массив данных сформировали спутниковые снимки (ДД33) — систем Landsat-5 и Landsat-8 за период с 2007 по 2024 г. Поиск и обработка снимков выполнялись при помощи облачного ресурса Google Earth Engine [47]. Были выбраны только безоблачные массивы снимков за июнь–сентябрь. Они использовались для определения мутности речных вод (по значениям яркости) и распространения техногенных взвесей вниз по течению от разработок, а также для альтернативной проверки достоверности современных стационарных наблюдений (рис. 2). Поскольку для расчетов количественных значений мутности воды используют красный спектральный канал [35, 36, 42], то извлекались значения яркости именно в нем. Они сравнивались со значениями измеренной на постах весовой мутности. Такое сравнение было выполнено для постов Индигирский, “5 км выше устья р. Артык-Юрях” и Ала-Чубук.

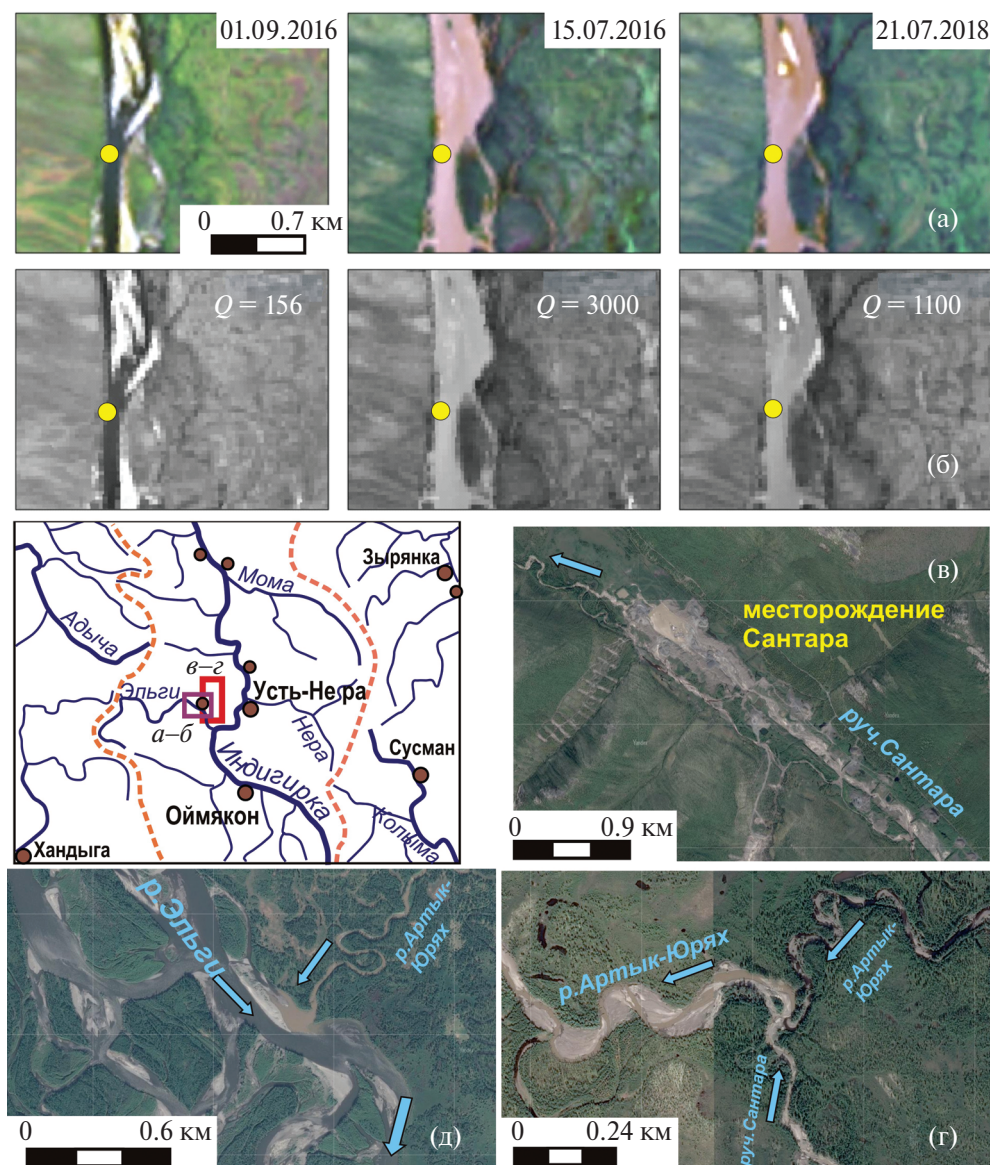


Рис. 2. Фрагменты космических снимков Landsat-8 на участок р. Эльги в районе гидрологического поста (а-б) и по длине руч. Сантара и р. Артык-Юрях — от разработок россыпного золота до впадения в р. Эльги (пример): а — снимки в натуральной цветопередаче, б — спектральные каналы красного диапазона; слева направо величины яркости увеличиваются; в — Сантарское месторождение и руч. Сантара, г — впадение руч. Сантара в р. Артык-Юрях (в 2.5 км ниже дамбы хвостохранилища), д — впадение р. Артык-Юрях в р. Эльги (в 45 км ниже устья руч. Сантара).

Fig. 2. Fragments of Landsat-8 satellite images on the El'ga River reaches near the gauge (a-b) and along the Santara and the Artyk-Yuryakh rivers — from gold deposit to the flow into the El'ga River (as example): a — images in natural color, b — spectral channels of the red range; brightness values increase from left to right; c — Santarskoye gold deposit and Santara stream, g — flow of the Santara into the Artyk-Yuryakh River (2.5 km below the dam of the tailings dump), d — flow of the Artyk-Yuryakh River into the El'gi River (45 km below the mouth of the Santara).

При обработке и анализе данных применялось несколько подходов. Многолетние колебания Q , R , S и T исследовались (с помощью статистических и графических методов) на предмет содержания в них тенденций, нарушения временной однородности рядов — на основе критериев Фишера (F-test, при $\alpha = 5\%$), Стьюдента (t-test), Манна-Уитни (MU-test), установления “переломного” года (с помощью Pettit’s test, суммарных (СИК) и разностных (РИК) интегральных кривых). Проведено сопоставление многолетних колебаний мутности воды, расходов наносов, расходов и температуры воды между собой, а также с показателями горнодобычи. Одним из таких показателей стала протяженность нарушенных (открытыми разработками) речных долин и ее многолетние изменения, определявшаяся по спутниковым снимкам. При этом использовалась подготовленная авторами база данных по россыпным разработкам на реках Дальнего Востока [40]. Для определения временной изменчивости этого показателя дополнительно для территории бассейна были подобраны снимки за 1973 г. (Landsat-1), 1994 г. (Spot-3), 2002 г. (Landsat-7) и 2013 г. (Landsat-8), визуальное дешифрирование которых позволило определить период первичной вскрыши для каждого отдельного участка добычи.

Для оценки степени влияния на сток наносов природных и антропогенных факторов для каждого из постов с длинной серией наблюдений были изучены связи между среднегодовыми расходами наносов (R_r), с одной стороны, и расходами воды, температурой воды, тепловым стоком, с другой. Корреляционный анализ позволил определиться с основными предикторами, а регрессионный — с видом и адекватностью эмпирических моделей, согласно [5]. Зависимости были получены за так называемый индустриальный период, длившийся до начала 1990-х гг.:

$$R_r \text{ (Индибирский)} = 0.149Q_r + 0.0076Q_{mx} - 53.2 \text{ (adjR}^2 = 0.79\text{)}, \quad (1)$$

$$R_r \text{ (Воронцово)} = 0.042Q_{mx} + 0.049Q_{VII} + 25.4T_{VI} - 458 \text{ (adjR}^2 = 0.73\text{)}, \quad (2)$$

$$R_r \text{ (Агаякан)} = 0.001Q_{mx} + 0.023Q_r - 0.04 \text{ (adjR}^2 = 0.92\text{)}, \quad (3)$$

$$R_r \text{ (5 км)} = 0.141Q_r - 0.031Q_{IX} + 0.15Q_X - 8.65 \text{ (adjR}^2 = 0.63\text{)}, \quad (4)$$

$$R_r \text{ (Ала-Чубук)} = 0.242Q_r + 0.0065Q_{mx} - 22.7 \text{ (adjR}^2 = 0.75\text{)}, \quad (5)$$

где Q_r и Q_{mx} — среднегодовые и максимальные расходы воды, Q_{VII} , Q_{IX} , Q_X , T_{VI} — среднемесячные расходы и температуры воды с обозначением соответствующего месяца, adjR^2 — скорректированный коэффициент достоверности. Уравнения помогли рассчитать R_r в современный период, которые были сравнены с фактическими данными. Результатом стало определение момента и степени изменения антропогенной нагрузки на сток наносов с 1990-х гг.

Результаты и обсуждение

Многолетняя динамика гидрологических факторов стока наносов. В бассейне р. Индибирка современный период отличает заметное увеличение водности рек [27, 31]. Начало этих нестационарных — для годового стока (по t-test и MU-test) — изменений датируется серединой 1990-х г. (рис. 3). По новым данным, увеличение годового стока составило в 1996–2022 гг. около 20% (в сравнении с 1950–1995 гг.), снижаясь в бассейне р. Нера до 5% и меньше. Его обеспечивают такие же положительные изменения месячного стока, прежде всего в мае (увеличение — в среднем на 40–60%), июне (10–25%), июле (< 10–20%) и октябре (30–50%). В августе,

и опять же в бассейне Неры, ситуация не такая однозначная, что довольно важно, поскольку в этот месяц проходит 1/3–1/4 годового стока наносов местных рек. Максимальные расходы тоже выросли: от 6% на посту Индигирский до 11% у р. Нера и 33% у р. Эльги. Увеличение $Q_{\max}$ началось с запаздыванием в 5–15 лет (в сравнении с годовым стоком), оно не было статистически значимым и слабо затронуло южные районы бассейна Индигирки.

Температура воды — второй важный фактор формирования стока наносов рек в криолитозоне, влияющий на интенсивность термоэрозии. Температура во все месяцы теплого сезона года повысилась: в летние месяцы — на 0.5–1°C, в сентябре — менее чем на 0.5°C [37]. Рост температуры в реках фиксируется с конца 1980-х и с 1990-х гг. (рис. 3), что согласуется с началом выраженного регионального

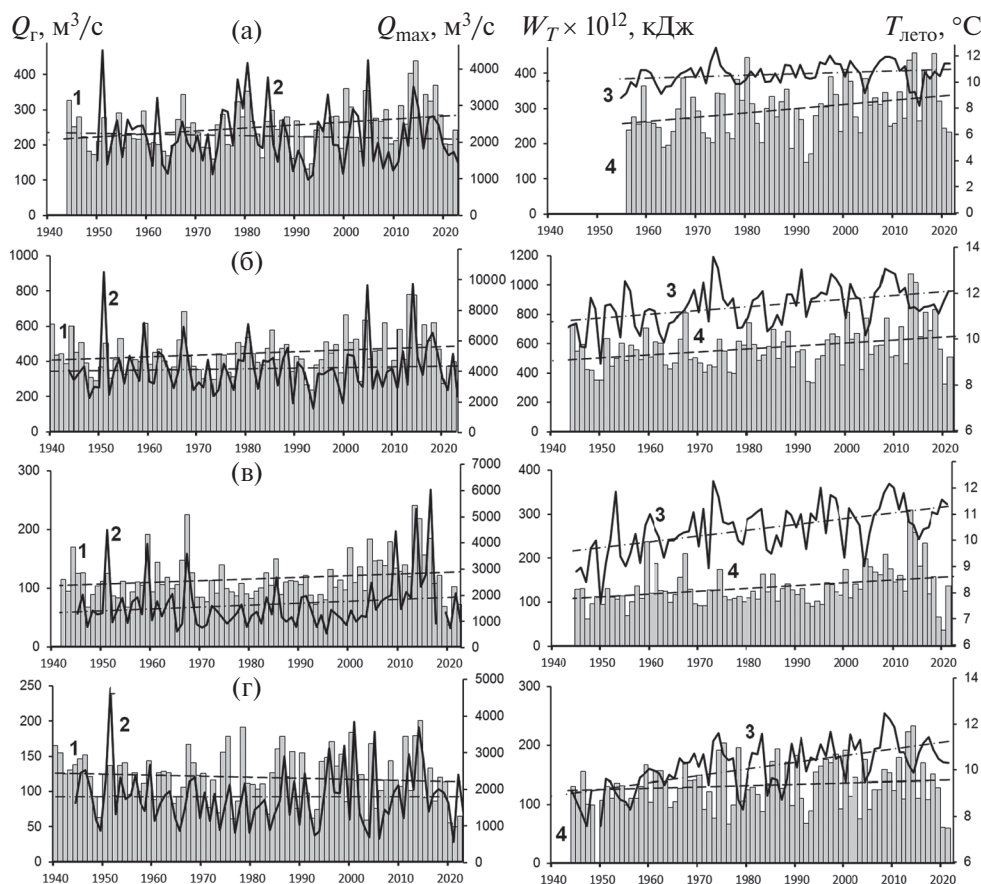


Рис. 3. Многолетние изменения среднегодовых (1) и максимальных (2) расходов воды, средней за лето температуры воды (3) и годовой величины теплового стока (4) с линейными трендами. Посты: а — Юрты (р. Индигирка), б — Индигирский (р. Индигирка), в — “5 км выше устья р. Артык-Юрях” (р. Эльги), г — Ала-Чубук (р. Нера).

Fig. 3. Long-term changes of average annual (1) and maximum (2) water discharges, and average summer water temperature (3), and annual heat runoff (4) with linear trends. Gauging stations: а — Yurty (Indigirka River), б — Indigirsky (Indigirka River), в — “5 km above the mouth of the Artyk-Yuryakh” (El’gi River), г — Ala-Chubuk (Nera River).

климатического потепления с 1988 г., которое усилилось в 2000-х гг. [7, 19]. Причем бассейн Индигирки относится к районам с существенными положительными аномалиями: весной они составили в 2000–2019 гг. в среднем 2.5°C (в сравнении с 1961–1990 гг.), летом — 1.2°C , осенью — $2.5\text{--}3^{\circ}\text{C}$. Интегральным результатом увеличения водности рек и нагрева речных вод стало статистически значимое увеличение теплового стока — на 10–20% [38].

Третий фактор — наледи (тарыны) речных и подземных вод, широко распространенные в бассейне Индигирки, достигающие самых больших в стране и мире размеров [15, 23]. Многолетняя их динамика влияет не только на водный сток, но и на сток наносов, поскольку в случае снижения наледности освобождаются обширные пространства днищ речных долин — *“наледные поляны”*, лишенные или слабо заросшие растительностью, заполненные аллювием и становящиеся мощным источником дополнительных наносов. По сведениям из [15], общее число и площадь наледей в 1950-х гг. достигали 897 и 2064 км^2 , а по данным за 2013–2017 гг. [22] — 1213 и 1287 км^2 ; наледность выше поста Индигирский была 0.82% [15], а стала 0.56% [22], в бассейне р. Эльги тоже снижение — с 0.49 до 0.23%. Однако новые результаты из [23] по 71 крупнейшим наледям Северо-Востока России, изученным по спутниковым снимкам за 1973–2021 гг., по сути, опровергают вывод о сильном уменьшении числа и площади наледей ввиду, вероятно, завышенных (почти в 2 раза) значений в [15]. Последние были получены вследствие каталогизации в основном не реальных наледей, а наледных полей, причем дешифрованных по летним аэрофотоснимкам. Мало того, межгодовая изменчивость числа и размеров наледей невероятно высокая (порой с полным их исчезновением в одни годы и новым образованием в последующие), в среднем составляя 20%. Да и реакция наледей на климатическое потепление не такая уж однозначная. Таким образом, влияние этого фактора пока неочевидно, и оно требует отдельного изучения.

Еще одним важным следствием (для стока наносов) потепления в регионе, изменения величины и режима атмосферных осадков стало увеличение продолжительности и глубины сезонного протаивания верхнего слоя почвогрунтов, снижение его льдистости, рост температуры ММП [7, 41], тем самым способствуя их эрозии.

В целом современные гидрометеорологические условия, как и изменения в криолитозоне, были благоприятными, начиная с 1990-х гг. и особенно в XXI в., для формирования стока наносов рек в бассейне Индигирки и его увеличения.

Недропользование в бассейне Индигирки. Основу недропользования в бассейне Индигирки в XX в. составляли добыча золота и олова. Добыча россыпного золота началась в 1942 г. — в пределах обширной Яно-Колымской золотоносной провинции. Через два года в бассейне р. Нера запустили прииск “Победа”, а затем — прииски Маршалский (в бассейне р. Эльги), им. Покрышкина (р. Тарын), “Ольчан” (р. Ольчан) и др. Они объединяли разные месторождения и участки, порой далеко расположенные друг от друга; добыча на них велась открытым, смешанным и реже подземным способами. Новые россыпи сравнительно быстро вырабатывались и забрасывались. В результате на рубеже 1950–1960-х гг. сложилась сложная ситуация с объемами золотодобычи, но уже в 1960-х гг. в бассейне Индигирки золота добывалось больше, чем на Алдане [33]. В 1965–1967 гг. золотоносные месторождения в якутской части бассейна были переданы в “Индигирзолото”. В 1975 г., на базе уникального Сарылахского золотосурьмяного месторождения, в основном с подземной добычей, была построена Сарылахская обогатительная фабрика (ГОК). С 1977 г. в бассейне р. Эльги подземным способом разрабатывается крупное Бадранское рудное месторождение золота.

Первые тонны россыпного олова были добыты в 1951 г. на богатом месторождении Депутатское и одноименном прииске [24], расположенном в бассейне р. Уяндина. С 1958 г. Усть-Янский улус в Якутии, с месторождениями в низовьях Яны и Индигирки, бассейне р. Хрома, стал одним из главных поставщиков олова в России: в 1960-х гг. на республику приходилось ~30% общесоюзного объема добычи, из которых больше половины добывалось на россыпных месторождениях, т.е. с наибольшим вредом пойменно-речным ландшафтам и стоку наносов рек. В 1989 г. были выведены на полную мощность рудник Западный и Депутатский ГОК. В 1991–1992 гг. на территории общей площадью 21 тыс. км² работало 6 оловодобывающих предприятий, которые разрабатывали 13 россыпных месторождений [14]. Объем перерабатываемой горной массы составлял свыше 20 млн м³; объем водопотребления — 12 млн м³, а объем сточных вод — 8–10 млн. м³. В этой части бассейна добывалось также золото (рис. 1).

Таким образом, к 1980-м — началу 1990-х гг. в бассейне Индигирки сформировалось два основных горнодобывающих района (рис. 1). Первый район, с центром в пос. Усть-Нера, занимает верхнюю и среднюю часть бассейна, охватывая районы Черского хребта, Эльгинского и Оймяконского плоскогорий, бассейны левых притоков Индигирки — рр. Эльги (впадает выше поста Индигирский), Сарыллах (то же), Нарын-Юрях (то же), Ольчан, Бергеннях, Арга-Хатынгнах и Иньяли, правых притоков — рр. Тарын (выше поста Индигирский), Нера, Учюгей-Юрях, Тирехтях, Бол. Куобах-Баса, Хатынгнах и Еченка. Район специализировался главным образом на добыче россыпного и рудного золота. Здесь немногим более 300 известных месторождений [29, 45], из которых ~5% рудных. К 1973 г. в районе насчитывалось около 423 км нарушенных (добычей) естественных пойменно-русловых комплексов (ПРК), в основном в бассейнах рр. Эльги, Тарын и Нера, а к началу 1990-х гг. добавилось еще 214 км, в том числе за счет месторождений в бассейнах правобережных притоков, впадающих в Индигирку ниже по течению от устья Неры. Еще 77 км измененных ПРК точно датировать не удалось. Второй горнодобывающий район, с центром в пгт Депутатский, приурочен главным образом к верховьям р. Уяндина. Северный его отсек занимают месторождения оловянных, оловянно-вольфрамовых, свинцовых руд и ртути, южный — участки добычи россыпного золота. Протяженность нарушенных ПРК составила примерно 150 км, что почти в 4.5 раза меньше, чем в первом районе. Пост Воронцово, закрытый почти 30 лет назад, замыкал оба горнодобывающих района.

В первой половине 1990-х гг. добыча золота в первом горнопромышленном районе стала снижаться, достигнув минимума во второй половине 1990-х гг. Об этом косвенно свидетельствуют общие (по Якутии) данные (рис. 4), а также сведения по золотодобыче АО “Индигирзолото”: в 1991 г. — 10.2 т, 1993 г. — 9.65 т, 1995 г. — 6.86 т, 1996 — 3.93 т [10]. Прирост новых измененных ПРК за 1993–2002 гг. составил не менее 65 км (еще 77–96 км точно датировать не удалось). В 2014 г. было ликвидировано АО “Индигирзолото”, но входившие в него предприятия продолжили работу (самостоятельно или в составе других золотодобывающих компаний), осваивая новые золотоносные участки.

С 2011 г. объемы добычи золота в Саха (Якутии) постепенно нарастали, реагируя на его значительное подорожание, и резко — с 2018 г. (рис. 4). Осенью 2023 г. стоимость тройской унции золота превысила 2000 долл. США, а в марте 2025 г. — 3000 долларов. В 2020 г. были превышены рекорды советского периода (36.5 т/год в 1975 г.), а в 2024 г. Республика Саха (Якутия) вышла на первое место в РФ по объемам

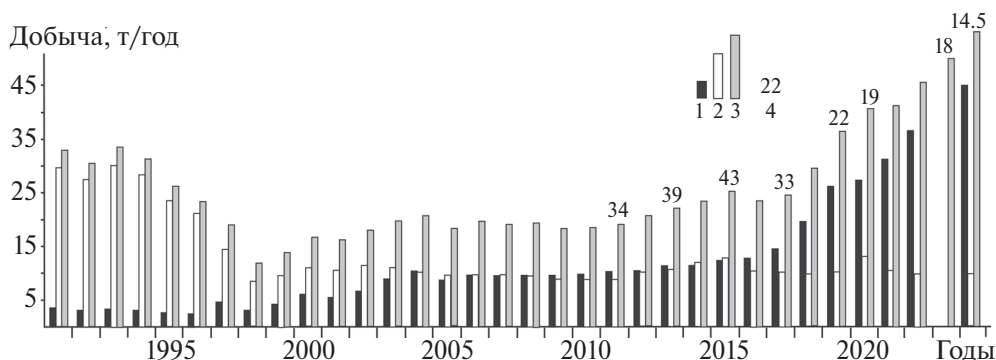


Рис. 4. Динамика добычи золота в Республики Саха (Якутия) за 1991–2024 гг. по данным из [3, 10, 48]: 1 — добыча рудного золота, 2 — добыча россыпного золота, 3 — суммарная добыча, 4 — доля Оймяконского улуса в общереспубликанской добыче (%).

Fig. 4. Dynamics of gold production in the Republic of Sakha (Yakutia) for 1991–2024 according to data from [3, 10, 48]: 1 — mining of ore gold, 2 — mining of placer gold, 3 — total production, 4 — share of Oymyakonsky ulus in national production (%).

золотодобычи — 55 т/год. Это стало возможным благодаря увеличению производства рудного золота, добываемого карьерным и шахтным способами. Пик добычи в Оймяконском улусе (основном золотодобывающем районе в бассейне Индигирки) был достигнут в 2015 г. — около 43% общереспубликанской добычи [3]. В 2015 г. здесь добывались примерно столько же, сколько и на рубеже 1980–1990-х гг. [10], причем более 80% добычи приходилось на россыпные месторождения. В 2017 г. в бассейне р. Тарын на базе крупного рудного месторождения “Дражное” был запущен Тарынский ГОК, а в 2020–2021 гг. начаты горные работы на карьере “Тарын”, и заработала золотоизвлекающая фабрика (ЗИФ). В бассейне р. Эльги в 2013–2016 гг. проведена реконструкция рудника Бадран и его ЗИФ. Тем не менее после 2015 г. добыча в Оймяконском улусе сократилась: в среднем добывалось от 7.5 до 9 т/год; доля улуса сократилась до 18–19% в 2020–2023 гг. (рис. 4). Но это не уменьшило антропогенную нагрузку на сток наносов, поскольку из-за увеличения доли россыпных месторождений с низкой концентрацией металла требовалось перерабатывать больше породы. Еще одной особенностью современной золотодобычи стала повторная вскрыша отвалов на отработанных участках. Если за 1973–1993 и 1993–2002 гг. протяженность таких ПРК была всего 4.4 и 15.6 км, то в 2002–2013 и 2013–2024 гг. она составила уже 82.6 и 122 км. В целом с 2002 по 2013 гг. суммарная протяженность нарушенных ПРК увеличилась на 203 км, а с 2013 по 2024 гг. — на 163 км (под вопросом — еще 19 км), в значительной мере за счет месторождений между бассейном р. Нерой и с. Чумпу-Кытыл (рис. 1). Всего до 2024 гг. 1165 км речных русел с поймами были охвачены (когда-либо или сейчас) добычей золота. В будущем добыча золота, вероятнее всего, вырастет, прежде всего, благодаря освоению крупного Малтанского золотосурьмяного месторождения в бассейне р. Тарын.

Намного хуже оказалась ситуация с добычей олова. В 1990-х гг. ее объемы сокращаются, участки забрасываются, населенные пункты пустеют. Во второй половине 1990-х гг. добыча фактически не велась, за исключением месторождения “Тирехтах” в бассейне р. Селеннях, где с 1995 г. она проводилась открытым и подземным способами. В 1999 г. был закрыт рудник “Западный”, в 2007 г. законсервировано

месторождение “Тирехтях”, в 2009 г. закрыт Депутатский ГОК, но из его хвостохранилища, которое перестали эксплуатировать с 1997 г., сточные воды продолжали поступать в речную сеть [46]. Добыча золота во втором горнопромышленном районе прекратилась в конце 1990-х гг. [29]. Ее возобновило ООО “Янзолото”: с 2013 г. на р. Ачгыгый-Кумах-Юрюе (бассейн р. Селеннях), с 2015 г. по р. Тарын-Юрях (бассейн р. Уяндина), с 2024 г. в совершенно новом месте — в бассейне р. Большая Эрча. С 2021 г. вновь началась добыча (на месторождении “Тирехтях”) и обогащение оловосодержащих руд, пока в небольших объемах.

Причины и тенденции изменения стока наносов. На р. Индигирка мутность воды и расходы взвешенных наносов ранее измеряли на трех постах. Два поста — Юрты и Индигирский — расположены в верхнем течении реки, а пост Воронцово — в низовьях (рис. 1). За единый период наблюдений (1956–1986) средний расход наносов и мутность воды на них составили 21.3 кг/с и 90 г/м³ (Индигирский), 44 кг/с и 100 г/м³ (Индигирский), 372 кг/с и 230 г/м³ (Воронцово). То есть наибольшее увеличение стока наносов происходит между постами Индигирский и Воронцово, главным образом за счет размыва русла и берегов, особенно при выходе Индигирки на равнину. К вершине дельты сток увеличивается примерно на 100 тыс. т/год; еще ~17 тыс. т/год поступает в пограничные рукава дельты [18]. В сравнении с другими большими реками российской Арктики годовой сток взвешенных наносов в низовьях Индигирки можно считать большим. Причина кроется в режиме реки и условиях его формирования [2, 8, 28].

Современный период в колебаниях годового стока наносов Индигирки и ее притоков характеризуется его заметным уменьшением в 1990-х и 2000-х гг., а после — существенным увеличением (рис. 5). Эти изменения содержат как антропогенную, так и естественную составляющие. Тогда как инструментально-методические нарушения в рядах не доказаны, даже с помощью спутниковых снимков.

Во-первых, приемлемого качества спутниковые снимки на рассматриваемый район были лишь с 2005/2007 гг. Во-вторых, публикуемые в гидрологических ежегодниках осредненные по декадам мутности воды плохо увязываются с мгновенной съемкой поверхности рек из космоса. Однако несколько съемок совпали (по датам) с максимальными за летне-осенний сезон значениями мутности воды. Построенная по ним связь позволила прийти к некоторым качественным выводам. Возможно, отдельные декадные значения измеренной на постах мутности занижены: на р. Эльги — в 2007, 2009, 2011, 2013, 2017, 2018 гг. (примерно в 1.5–3 раза), т.е. в большее число лет, чем указано в гидрологических ежегодниках; на посту Индигирский — в 2011 г. Дополнительно для постов Индигирский ($Q_{\text{И}}$) и Ала-Чубук были получены тесные связи ($r \sim 0.6\text{--}0.84$) между значениями яркости (B) и среднесуточными расходами воды, поскольку изменения расходов воды на этой территории сопровождается изменениями концентрации взвесей в речном потоке (рис. 2а, б). Пример их дан ниже:

$$Q_{\text{И}} (2007\text{--}2016) = 391 \times \text{EXP}(23.5 \times B), (R^2 = 0.58), \quad (6)$$

$$Q_{\text{И}} (2017\text{--}2022) = 255 \times \text{EXP}(25.5 \times B), (R^2 = 0.71). \quad (7)$$

На посту Индигирский, находящемся ниже впадения в Индигирку рр. Эльги и Тарын (с развитой горнодобычей на водосборах (рис. 1)) и в 10 км выше устья р. Нера, первый подпериод длился с 1992 по 2010 г. и выделяется уменьшением стока наносов на 31% по сравнению с 1970–1980-ми гг. На р. Эльги, р. Нера

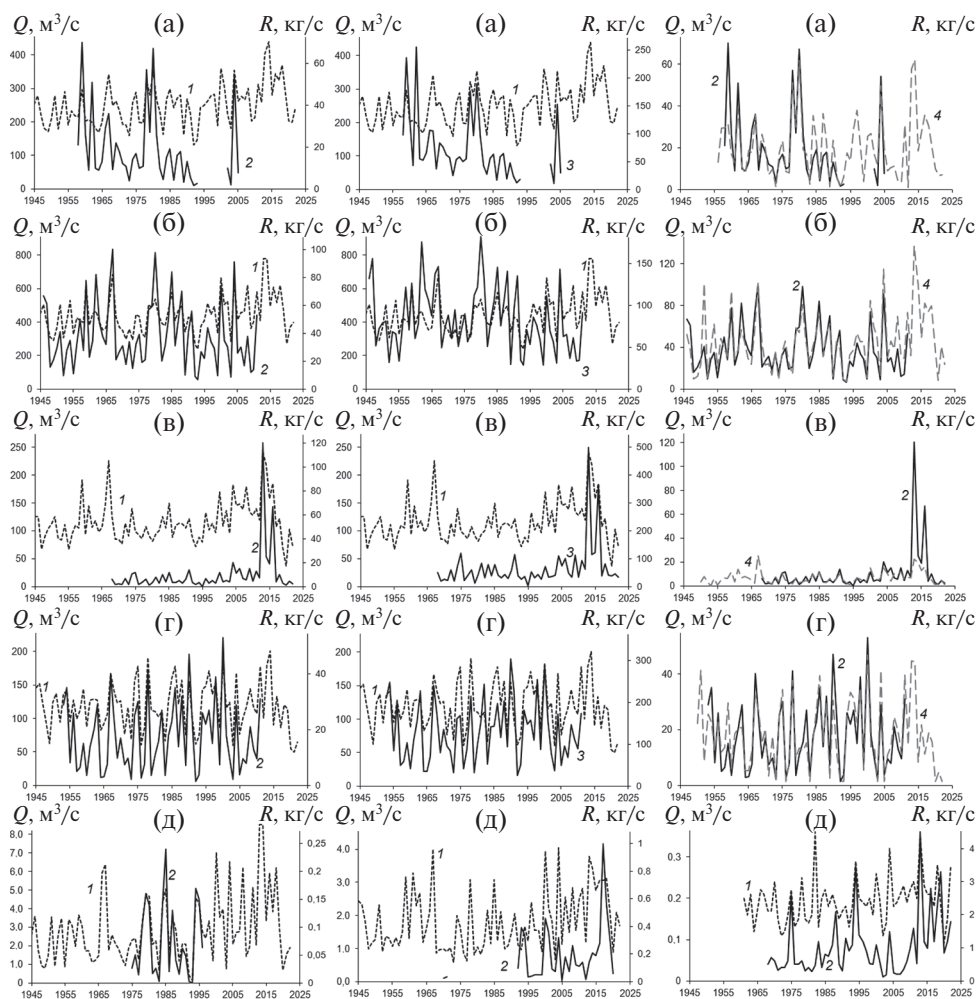


Рис. 5. Многолетние колебания среднегодовых расходов воды (1), расходов взвешенных наносов (2) и мутности воды (3), рассчитанных расходов наносов (4). Посты: *а* — Юрты (р. Индигирка), *б* — Индигирский (р. Индигирка), *в* — “5 км выше устья р. Артык-Юрях” (р. Эльги), *г* — Ала-Чубук (р. Нера), *д* — Ага-якан (р. Ючугей-Юрях), *е* — “3.5 км выше устья” (р. Артык-Юрях), *ж* — Ремпункт (руч. Амбар-Юрюетэ).

Fig. 5. Long-term fluctuations in the annual discharge of water (1), suspended sediments (2) and turbidity of water (3), calculated sediment discharges (4). Gauging stations: *a* — Yurty (Indigirka R.), *b* — Indigirsky (Indigirka R.), *c* — “5 km above the mouth of the Artyk-Yuryakh” (El’gi R.), *d* — Ala-Chubuk (Nera R.), *e* — Agayakan (Yuchugey-Yuryakh R.), *f* — “3.5 km above the mouth” (Artyk-Yuryakh R.), *g* — Rempunkt (Ambar-Yuryute).

и руч. Амбар-Юрюетэ пониженный сток наносов наблюдался в 1992–2003 гг. (–26%), 1992–2010 гг. (–6%) и 1998–2009 гг. (–33%).

Второй подпериод, по сути, “перекрыл” предыдущее снижение (табл.1, рис. 5): на Эльги сток наносов превысил свои величины в 1992–2003 и 1971–1991 гг. на 335 и 220%, руч. Амбар-Юрюетэ (Дунай) — на 250 и 135% по сравнению с 1998–2009 и 1971–1991 гг., р. Артык-Юрях — на 78% по отношению к 1992–2010 гг. Одной из причин могло быть увеличение числа новых участков добычи, расконсервация

старых и в целом рост объемов до середины 2010-х гг. Кроме того, несмотря на контроль со стороны надзорных органов и экологических служб, сбросы неочищенных стоков имели место. Вот несколько примеров [46]. В сентябре 2015 г. содержание взвесей в руч. Удум (правый приток р. Ольчан) возрастало в 38 раз, в 2017 г. — в 469 раз, в 2019 г. — в 25 раз. В 2017 г. сбросы в р. Бол. Тарын на участке “Мал. Тарын—Тенистый” увеличивали мутность речных вод в 1627 раз — с 3 до 4880 г/м³; за сутки предприятие сбрасывало 427 т взвешенных веществ. В августе 2019 г. на р. Бытыктах (левый приток Индигирки) превышение мутности над фоновыми значениями составило 75 раз. И это лишь те события, о которых стало известно. На рис. 2 (в–г) приведен пример такого “мутяевого загрязнения” со стороны месторождения на руч. Сантара, несмотря на наличие хвостохранилища. Здесь золотоносные россыпи разрабатывались в 1962, 1992–1994 гг. и по-новому, т.е. на базе отвалов, с 2013 г. Видно, что, несмотря на небольшие размеры руч. Сантара и самого месторождения, большую его удаленность от р. Эльги (~48 км), незначимую долю в стоке Эльги (для р. Артык-Юрях ~1.5%, для руч. Сантара — доли процента), добыча привела к интенсивному выносу и отложению наносов вдоль р. Артык-Юрях, формированию обширного шлейфа мутности в месте впадения реки в Эльги, который ниже по течению хотя и “разбавляется”, но все же на некотором протяжении хорошо виден вдоль левого берега. И таких “точек техногенного воздействия” на сток наносов Индигирки и ее притоков несколько десятков.

Многолетние колебания среднегодовых расходов наносов и воды хорошо согласуются: коэффициент корреляции r варьирует от 0.70 до 0.86. Исключением служит пост на р. Артык-Юрях, ввиду небольших размеров водотока и сильного влияния золотодобычи. Еще более синхронизированы колебания расходов наносов и мутности воды ($r \sim 0.80\text{--}0.98$), причем теснота этой связи одна из самых высоких среди северных рек России [8, 30]. Довольно высокая скоррелированность также между R и s , с одной стороны, и $Q_{\text{мх}}$, с другой, — $r \sim 0.64\text{--}0.82$ и $r \sim 0.40\text{--}0.86$. Мощным дополнительным фактором, влияющим на размер годового стока наносов, является характер внутригодового распределения расходов. Речь идет прежде всего о количестве и величине паводков в июле и августе, когда эрозионная и термоэрозионная активность дождей и склоновых потоков максимальна [2, 28]. В годы, когда летне-осенних паводков много и/или они сопоставимы по величинам с весенним половодьем, общий сток наносов Индигирки выше, и порой намного. Местные жители называют особенно мутные паводковые воды “черной водой”. Связь между месячными расходами наносов и воды в июле заметная и высокая — $r \sim 0.51\text{--}0.82$; далее следуют июнь и август с $r \sim 0.30\text{--}0.65$. Между среднегодовыми R , s , с одной стороны, и T , с другой, связь обратная, с достижением статистически значимых значений r в июле ($-0.28\text{--}-0.41$) и, реже, в июне. Между тепловым стоком W_t и R связи (на уровне месячных значений) менее тесные, чем у R и Q . Коэффициенты корреляции связей $R=f(T)$ и $R=f(W_t)$, построенных для современного и предыдущего (индустриального) периода, статистически значимо не различаются. Это свидетельствует об отсутствии значимого влияния теплового фактора на сток наносов рек бассейна верхней и средней Индигирки даже в условиях климатического потепления.

По уравнениям регрессии (1–5) были рассчитаны среднегодовые расходы наносов (R_t) для “индустриального” (до начала 1990-х гг.) и современного периодов (рис. 5). Первые хорошо согласуются с измеренными на постах расходами наносов и свидетельствуют о том, что изменившиеся (начиная с 1990-х гг.) гидрометеорологические условия должны были (при сохранении прежних масштабов

недропользования) как минимум вызвать незначительные изменения стока наносов рек, как максимум — привести к его существенному увеличению. Причем это верно в отношении рек, как затронутых хозяйственной деятельностью, так и нет (пример — пост Юрты). Согласно расчетам, изменения расходов наносов в 1992–2010 и 2011–2022 гг. в сравнении с фактическими R за период 1971–1991 гг. составили бы -3.2 и $+47.5\%$ (Юрты), 0 и $+45.6\%$ (Индиgirский), $+21$ и $+45.3\%$ (“5 км выше...”), $+2$ и $+3.3\%$ (Ала-Чубук). Основной рост пришелся бы на 2010-е г., как и в случае с наблюдаемыми расходами наносов. Однако причина уменьшения стока наносов в 1990-х и частично в 2000-х гг. не только в негативных процессах в горнодобывающей отрасли. На посту Индиgirский разность наблюдаемых среднемноголетних расходов наносов в 1992–2010 гг. и 1971–1991 гг. равна минус 930 тыс. т в год. Из этой величины на неблагоприятные изменения в месячном стоке, выражающиеся в снижении водности в июле и августе, приходится $\sim 61\%$. Те же факторы были, вероятнее всего, ответственны за сокращение стока наносов с конца 1960-х по конец 1970-х гг.

На р. Эльги увеличение стока наносов с 2004 г. подтверждают как фактические, так и расчетные данные (рис. 5); явное расхождение с расчетными значениями было лишь в аномальные 2013 и 2016 гг. Как и в случае с постом Индиgirский, роль гидрологических и антропогенных факторов здесь примерно сопоставима. Выше поста “5 км выше...” золото добывалось и добывается на ручьях Кокарин, Талалах, Бол. и Мал. Делююеннях, в бассейне р. Тобычан. Причем именно в середине 2010-х гг. здесь отмечено возобновление хозяйственной деятельности и расширение площадей с нарушенными ПРК. В то же время 2004–2017 гг. отличаются очень высокой водностью летних месяцев и самыми большими Q_{mx} (именно в 2013 и 2016 гг.) за всю историю наблюдений на р. Эльги. Установлено, что роль естественных гидрологических факторов в повышенном стоке наносов достигает в 2004–2022 гг. около 84%, и она сопоставима с их вкладом в сокращение стока наносов в 1992–2003 гг. ($\sim 81\%$). Другими факторами появления аномальных 2013 и 2016 гг. могли быть спрямление излучины в 1 км выше поста, негативная динамика речных наледей с середины 2000-х гг. (пример — наледь на р. Тобычан). Основное антропогенное воздействие на сток наносов р. Эльги (выше поста), вероятнее всего, было с середины 1940-х по 1960-е гг., т.е. до начала стационарных наблюдений. После оно было умеренным, хотя между 1993 и 2003 гг. выше поста были обнаружены (по ДД33) новые участки измененных ПРК. Еще один результат, полученный благодаря ДД33 и сравнению их с суточными расходами воды, свидетельствует о том, что с 2017 г. в бассейне Эльги большие мутности воды стали наблюдаться при меньших (чем ранее) расходах воды. То же было обнаружено для постов Индиgirский (уравнения 1.6, 1.7) и Ала-Чубук. Ниже поста “5 км выше...” взвеси техногенного происхождения могут поступать в Эльги из р. Артык-Юрях (рис. 2), руч. Диринг-Юрях (интенсивная добыча в 1945–1987 гг. и с 1992 г.) и руч. Быйытта. На р. Артык-Юрях новое расширение добычи произошло с 2013 по 2017 г. Причем в 2017 г. зафиксирован пик в расходах наносов и мутности воды, который не согласуется с Q_{mx} . На большом месторождении Бадран, разрабатываемом с 1977 г. в бассейне правого притока Эльги — р. Большой Селирикан, действует обратная схема водопользования.

Для р. Нера, впадающей в Индиgirку ниже поста Индиgirский, влияние горнодобывающих предприятий на сток наносов длится с середины 1940-х гг. Оно было существенным, согласно фактическим и расчетным данным, и примерно

одинаковым в течение всего исторического периода. В начале современного периода масштабы природопользования в бассейне Неры, как и сам ее сток наносов, в некоторой мере уменьшились. С 1993 по 2012 г. протяженность новых нарушенных ПРК была относительно небольшой. Поэтому неслучайно результаты расчетов показали, что это снижение практически полностью (~100%) может быть объяснено гидрологическими факторами. В 2010-х гг. антропогенные и гидрологические факторы, наоборот, были благоприятными для формирования повышенного стока наносов, но из-за прекращения с 2012 г. наблюдений за наносами на посту Ала-Чубук об этом можно судить лишь на основе расчетных данных или измерений на соседних водотоках.

Сравнение многолетнего хода характеристик стока наносов рассматриваемых рек с другими реками азиатской части страны [20] и, в частности, в бассейне соседнего Алдана [21], показывает существенно меньшее его снижение у рек верхней части бассейна Индигирки. Причин несколько. Во-первых, здесь не было повсеместного сокращения горнодобывающей деятельности, и в XXI в. она начала быстро восстанавливаться. Кроме того, доля открытых разработок с большими объемами переработки пород с низким содержанием металла была и остается высокой (см. выше). Во-вторых, прекращение добычи россыпного золота устраняет лишь прямое ее воздействие на сток наносов. Оставшиеся после разработок отвалы пустой породы, хвостохранилища, разрушенный почвенно-растительный покров и ослабленные многолетнемерзлые породы, переработанные русла и др. длительное время (от 5–10 лет) продолжают увеличивать сток наносов [25, 32]. В-третьих, при таких высоких величинах мутности воды и темпах плановой деформации русел, как в бассейне Индигирки, естественные факторы, а именно сток воды и его изменчивость, кратно превышают воздействие разработок.

Заключение

Сток наносов рек в средней части бассейна р. Индигирки с начала 1990-х гг. претерпел значимые изменения: вначале снижение — до середины — второй половины 2000-х гг., после — очень существенное увеличение. В среднем течении реки — на посту Индигирский — первый подпериод длился с 1992 по 2010 г., и сокращение стока наносов составило 31% по сравнению с 1970–1980-ми гг. На р. Эльги, р. Нера и руч. Амбар-Юрюетэ пониженный сток наносов наблюдался соответственно в 1992–2003 гг. (–26%), 1992–2010 гг. (–6%) и 1998–2009 гг. (–33%). Второй подпериод, по сути, “перекрыл” предыдущее снижение: на р. Эльги сток наносов превысил свои величины в 1992–2003 и 1971–1991 гг. на 335 и 220%, руч. Амбар-Юрюетэ (Дунай) — на 250 и 135% по сравнению с 1998–2009 и 1971–1991 гг., р. Артык-Юрх — на 78% по отношению к 1992–2010 гг. Для поста Индигирский, согласно расчетам, в 2011–2022 гг. сток наносов больше на 46%, чем в 1971–1991 гг. Эти изменения содержат как естественную, так и антропогенную составляющие, тогда как серьезных инструментально-методических нарушений в рядах исходных данных не выявлено. Антропогенное воздействие в бассейне Индигирки обусловлено прежде всего добычей золота (в основном верхняя и средняя часть бассейна) и олова (нижняя часть). Ее начало приходится на середину XX в., и она существенно увеличивает сток наносов рек. В 1990-х и 2000-х гг. в горнодобывающей отрасли доминировали негативные процессы (закрытие предприятий, консервация месторождений, снижение объемов добычи и др.), но они объясняют не более 20–40% уменьшения стока наносов в первый подпериод. Остальное обусловлено прежде всего уменьшением

водности рек в августе, когда проходит от 1/4 до 1/3 годового стока наносов местных рек. Тогда как остальные гидроклиматические факторы — увеличение годового стока воды рек, рост температур воздуха и воды, теплового стока и др., наоборот, были благоприятными для интенсификации бассейновой и русловой эрозии и поступления взвесей в речную сеть. Во второй подпериод все факторы были максимально благоприятны для формирования повышенного стока наносов, что и обеспечило его “взрывной” рост.

Дополнительным важным результатом стало успешное сочетание разных методов и источников данных при изучении и оценке антропогенного воздействия на сток наносов, анализе качества стационарных данных наблюдений.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках гранта РНФ № 24-17-00084.

Список литературы

1. Алексеевский Н.И., Сидорчук А.Ю. Ускоренная эрозия в нарушенных горными работами ландшафтах (на примере бассейнов рек Омолая и Яны) // Экологические проблемы эрозии почв и русловых процессов. М., 1992. С. 187–198.
2. Бабич Д.Б., Коротаев В.Н., Магрицкий Д.В., Михайлов В.Н. Нижняя Индигирка: устьевые и русловые процессы. М.: ГЕОС, 2001. 202 с.
3. Батугина Н.С., Ноговицын Р.Р. Добыча золота в Республике Саха (Якутия). Тенденции и перспективы // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2021. № 1-6 (175). С. 75–80.
4. Бобровицкая Н.Н. Водноэрозионные процессы на склонах и сток наносов рек в современных условиях // Труды VI Всероссийского гидрологического съезда. М., 2008. С. 228–233.
5. Боровиков В.П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере. СПб.: ПИТЕР, 2003. 688 с.
6. ВСН 01-73. Указания по расчету стока наносов. Л., 1973. 28 с.
7. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М, 2014. 1018 с.
8. Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования / под ред. Н.И. Алексеевского. М.: ГЕОС, 2007. 585 с.
9. Дедков А.П., Мозжерин В.И. Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1984. 261 с.
10. Ефремов Э.И., Никифорова В.В. Отраслевые особенности и территориальные аспекты развития сырьевой экономики Республики Саха (Якутия). СПб.: “Реноме”, 2014. 224 с.
11. Замана Л.В., Вахнина И.Л. Влияние россыпной золотодобычи на природные комплексы речных долин бассейна р. Амур (Восточное Забайкалье, Россия) // Геосферные исследования. 2020. № 2. С. 83–89.
12. Захарова Т.Г. Изменение качества речных вод в результате развития горнодобывающих предприятий // Антропогенное воздействие на водные ресурсы Якутии. Якутск, 1984. С. 36–39.
13. Золотые реки: Выпуск 1. Амурский бассейн / под ред. Е.А. Симонова. Владивосток: WWF, 2012 г. 120 с.
14. Иванов В.В. Трансформация природных комплексов при недропользовании в условиях Якутии. Новосибирск: Наука, 2015. 248 с.
15. Кадастр к карте наледей Северо-Востока СССР масштаба 1:2000000. Магадан: ЦКТЭ СВ ГУ, 1958. 398 с.

16. Костромин М.В., Юргенсон Г.А., Позлутко С.Г. Проблемы дражной разработки континентальных россыпей. Новосибирск: Наука, 2007. 180 с.
17. Лисицына К.Н. Сток взвешенных наносов Сибири // Тр. ГГИ. 1974. Вып. 210. С. 48–72.
18. Магрицкий Д.В. Факторы и закономерности пространственной и многолетней изменчивости поступления речных наносов в моря Российской Арктики // Вопросы географии. Сер. География полярных регионов. 2016. Вып. 142. С.444–466.
19. Магрицкий Д.В. Климатические изменения на северо-востоке азиатской части России // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции “Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России”. Иркутск, 2023. С. 345–353.
20. Магрицкий Д.В. Климатически обусловленные и антропогенные изменения стока взвешенных наносов главных арктических рек Сибири и Дальнего Востока РФ // Труды IV Всероссийской конференции “Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития”. СПб., 2020. С. 248–253.
21. Магрицкий Д.В. Сток наносов рек бассейна Алдана и горнодобывающая деятельность // Известия РГО. 2023. № 2. С. 73–87.
22. Макарьева О.М., Шихов А.Н., Осташов А.А., Нестерова Н.В. Наледи бассейна р. Индигирка по современным снимкам Landsat и историческим данным // Лед и снег. 2019. Т. 59. № 2. С. 201–212.
23. Макарьева О.М., Шихов А.Н., Землянская А.А., Алексеев В.Р., Нестерова Н.В., Осташов А.А. Гигантские наледи-тарыны Северо-Востока России по данным Кадастра (1958 г.) и космическим снимкам 1973–2021 гг. // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 6, с. 27–39.
24. Матвеев А.И., Еремеева Н.Г. Технологическая оценка месторождений олова Якутии. Новосибирск: акад. Изд. “Гео”, 2011. 119 с.
25. Миронова С.И. Результаты научно-практических исследований нарушенных земель Якутии // 2021. № 5. С. 128–132.
26. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 6. Часть III. Составление и подготовка к печати гидрологического ежегодника. Л., 1958. 290 с.
27. Научно-прикладной справочник: Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек РФ. СПб., 2021. 190 с.
28. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 17. Лено-Индигирский район. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 652 с.
29. СКИОВО. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна р. Индигирка. Книга 1. М.: ООО “ВЕД”, 2011. 196 с.
30. Сток наносов, его изучение и географическое распределение / под общ. ред. А.В. Караушева. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 240 с.
31. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Гельфан А.Н., Сазонов 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. Том 4. № 3. С. 251–269.
32. Чалов С.Р., Прокопьева К.Н., Школьный Д.И., Цыпленков А.С. Воздействие отработанных месторождений россыпной платины на речную систему р. Вывенки (Камчатский край) // Известия ИГУ. 2023. Том 45. С. 127–149.
33. Якутия. М.: Наука, 1965. 467 с.
34. Costard F., Dupeyrat L., Gautier E., Carey-Gailhardis E. Fluvial thermal erosion investigations along a rapidly eroding river bank: Application to the Lena River (Central Siberia) // Earth Surf. Process. Landforms. 2003. No 28. Pp. 1349–1359.

35. Dogliotti A.I., Ruddick K.G., Nechad B., Doxaran D., Knaeps E. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters // *Remote Sensing of Environment*. 2015. Vol. 156. Pp. 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020>
36. Klein K.P., Lantuit H., Heim B., Doxaran D., Juhls B., Nitze I., Walch D., Poste A., Søreide Janne E. The Arctic Nearshore Turbidity Algorithm (ANTA) — A multi sensor turbidity algorithm for Arctic nearshore environments // *Science of Remote Sensing*. 2021. Vol. 4. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2021.100036>
37. Magritsky D.V., Vasilenko A.N., Frolova N.L. and Shevchenko A.I. Temporal and spatial patterns of changes in thermal regime of the rivers in the Northeast of the Asian part of Russia. 1. Assessment of Changes in the Water Temperature // *Water Resources*. 2023 (a). Vol. 50, No. 2. Pp. 190–201.
38. Magritsky D.V., Vasilenko A.N., Frolova N.L. Temporal and spatial patterns of changes in thermal regime of the rivers in the Northeast of the Asian part of Russia. 2. Changes in the Heat Flux // *Water Resources*. 2023(б). Vol. 50. No. 2. Pp. 202–214.
39. Shikhov A., Ilyushina P., Makarieva O., Zemlianskova A., Mozgina M. Satellite-based mapping of gold-mining-related land-cover changes in the Magadan Region, Northeast Russia // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. No 14: 3564.
40. Shkolnyi D., Magritsky D., Chalov S. Impact of open-cast placer mining on sediment transport across Far Eastern rivers of Russia // *International Journal of Sediment Research*. 2024. Vol. 39. No. 5. Pp. 702–713.
41. Streletskiy D.A., Maslakov A., Grosse G., Shiklomanov N.I., Farquharson L., Zwieback S., Iwahana G., Bartsch A., Liu Liu, Strozzi T., Lee H., Debolskiy M.V. Thawing permafrost is subsidizing in the Northern Hemisphere- review and perspectives // *Environmental Research Letters*. 2025. Vol. 20. No 1. Pp. 1–16.
42. Tao H., Song K., Wen Z., Liu G., Shang Y., Fang C., Wang Q. Remote sensing of total suspended matter of inland waters: Past, current status, and future directions // *Ecological Informatics*. 2025. Vol. 86. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103062>
43. Vasilenko A., Frolova N., Grigoriev V.Y., Magritsky D., Shevchenko A., Winde F. Spatio-temporal variability of water temperature of arctic rivers in Russia over the past 60 years // *Appl. Sci*. 2024. No 14:10942. Pp. 1–27.
44. Vasilenko A.N., Magritsky D.V., Frolova N.L., Shevchenko A.I. Features of a long-term heat flux formation of the large Russian Arctic rivers and its transformations in estuaries under the influence of climate-induced and dam-induced effects // *Geography, Environment, Sustainability*. 2022. No 4(15). Pp. 158–170.
45. <http://atlaspacket.vsegei.ru/#ab5af961d7b653251> — открытая Геоинформационная система: Атлас “Недра России” (дата обращения: 02.11.2023).
46. <https://minpriroda.sakha.gov.ru/> — официальный сайт Министерства экологии, природопользования и лесного хозяйства Республики Саха (Якутия) (дата обращения: 21.03.2025).
47. <https://earthengine.google.com/> — интернет-платформа Google Earth Engine (дата обращения: 27.03.2025).
48. <http://hydroweb.meteo.ru> — Информационный портал «Гидрологическая сеть Росгидромета и Белгидромета. Реки, каналы, озера и водохранилища» (дата обращения: 27.03.2025).
49. <https://gold.lprime.ru> — ПРАЙМ ЗОЛОТО — Вестник золотопромышленника, отраслевой портал агентства “Прайм” (дата обращения: 07.07.2025).

Natural and Anthropogenic Changes in River Suspended Sediment Runoff in the Indigirka River Basin

D.V. Magritsky*, D.I. Shkolnyi, P.G. Ilyushina

Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

**E-mail: magdima@yandex.ru*

Received 17.04.2025

Revised 09.07.2025

Accepted 25.07.2025

The hydrometeorological conditions of river flow formation and the state of permafrost in the Indigirka River basin have changed since the 1990s. An increase of water runoff in the basin (by 20% or less) and water temperature (by 0.5–1°C) was a reaction to these changes. Therefore, an increase in sediment yield was to be expected. But that didn't happen. It decreased by 6–33% in the 1990s and 2000s. But, subsequently, sediment yield increased by 50–220%. The reasons for the lack of positive dynamics could be negative processes in the mining industry since the 1990s, as well as changes in the monitoring system. Therefore, the objectives of the study were to analyze the gauge hydrological data, the long-term dynamics of water and sediment runoff, the stream temperature of rivers in the Indigirka River basin, the features of local mining, and the assessment of the contribution of anthropogenic and natural factors to the long-term variability of sediment runoff. Materials from 22 hydrological gauges in the Indigirka basin, satellite images, and various mining industry data were the information basis of this research. The rivers and areas in the Indigirka River basin affected by mining have been identified. The analytical links between the annual sediment runoff and its hydrological factors were substantiated. It was found that the negative processes in the mining industry at the turn of the 20th and 21st centuries explain less than 20–40% of the decrease of sediment runoff, the rest of the decrease in runoff is due to natural hydrological changes. After, a significant increase in sediment runoff was provided by both hydrometeorological and anthropogenic factors. For the first time, a comprehensive analysis of the reliability of stationary observation data has been carried out; a GIS of developed deposits and disturbed floodplain-channel complexes has been created.

Keywords: river, gauging station, monitoring, water and sediment runoff, mining, long-term changes

References

1. Alekseevskij N.I., Sidorchuk A.Ju. Uskorennaja jerozija v narushennyh gornymi rabotami landshaftah (na primere bassejnov rek Omoloja i Jany) // *Jekologicheskie problemy jerozii pochv i rusel lovyh processov*. M., 1992. S.187–198.
2. Babich D.B., Korotaev V.N., Magriczkij D.V., Mikhajlov V.N. Nizhnaya Indigirka: ust'evy'e i ruslovy'e processy'. M.: GEOS, 2001. 202 s.
3. Batugina N.S., Nogovicyn R.R. Doby'cha zolota v Respublike Saxa (Yakutiya). Tendencii i perspektivy' // *Mineral'ny'e resursy' Rossii. E'konomika i upravlenie*. 2021. № 1–6 (175). S. 75–80.
4. Bobroviczskaya N.N. Vodnoe'rozionny'e processy' na sklonax i stok nanosov rek v sovremenny'x usloviyax // *Trudy' VI Vserossijskogo gidrologicheskogo s'ezda*. M., 2008. S. 228–233.
5. Borovikov V.P. STATISTICA. Iskustvo analiza danny'x na komp'yutere. SPb.: PITER, 2003. 688 s.
6. VSN 01-73. Ukazaniya po raschetu stoka nanosov. L., 1973. 28 s.
7. Vtoroj ocenochny'j doklad Rosgidrometa ob izmeneniyax klimata i ix posledstviyax na territorii Rossijskoj Federacii. M, 2014. 1018 s.

8. Geojekologicheskoe sostojanie arkticheskogo poberezh'ja Rossii i bezopasnost' prirodopol'zovaniya / pod red. N. I. Alekseevskogo. M.: GEOS, 2007. 585 s.
9. Dedkov A.P., Mozzherin V.I. E'roziya i stok nanosov na Zemle. Kazan': Izd-vo Kazan. un-ta, 1984. 261 s.
10. Efremov E.I., Nikiforova V.V. Otrasley'e osobennosti i territorial'ny'e aspekty' razvitiya sy'r'evoy e'konomiki Respubliki Saxa (Yakutiya). SPb.: "Renome", 2014. 224 s.
11. Zamana L.V., Vaxnina I.L. Vliyanie rossy'pnoj zolotodoby'chi na prirodny'e komplekсы rechny'x dolin bassejna r. Amur (Vostochnoe Zabajkal'e, Rossiya) // Geosferny'e issledovaniya. 2020. № 2. S. 83–89.
12. Zaharova T.G. Izmenenie kachestva rechny'x vod v rezul'tate razvitiya gornodobyvajushhih predpriyatij // Antropogennoe vozdejstvie na vodnye resursy Jakutii. Jakutsk, 1984. S. 36–39.
13. Zoloty'e reki: Vy'pusk 1. Amurskij bassejn / pod red. E. A. Simonova. Vladivostok: WWF, 2012 g. 120 s.
14. Ivanov V.V. Transformacija prirodny'x kompleksov pri nedropol'zovanii v uslovijah Jakutii. Novosibirsk: Nauka, 2015. 248 s.
15. Kadastr k karte naledej Severo-Vostoka SSSR masshtaba 1:2000000. Magadan: CzKTE' SV GU, 1958. 398 s.
16. Kostromin M.V., Yurgenson G.A., Pozlutko S.G. Problemy' drazhnoj razrabotki kontinental'ny'x rossy'pej. Novosibirsk: Nauka, 2007. 180 s.
17. Lisicya K.N. Stok vzveshenny'x nanosov Sibiri // Tr. GGI. 1974. Vy'p. 210. S. 48–72.
18. Magriczkij D.V. Faktory' i zakonomernosti prostranstvennoj i mnogoletnej izmenchivosti postupleniya rechny'x nanosov v morya Rossijskoj Arktiki // Voprosy' geografii. Ser. Geografiya pol'yarny'x regionov. 2016. Vy'p. 142. S. 444–466.
19. Magriczkij D.V. Klimaticheskie izmeneniya na severo-vostoke aziatskoj chasti Rossii // Materialy' Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Sovremennyy'e tendencii i perspektivy' razvitiya gidrometeorologii v Rossii". Irkutsk, 2023. S. 345–353.
20. Magriczkij D.V. Klimaticheski obuslovlennyye i antropogennyye izmeneniya stoka vzveshenny'x nanosov glavny'x arkticheskix rek Sibiri i Dal'nego Vostoka RF // Trudy IV Vserossijskoj konferencii "Gidrometeorologija i jekologija: dostizhenija i perspektivy razvitiya". SPb., 2020. S. 248–253.
21. Magriczkij D.V. Stok nanosov rek bassejna Aldana i gornodoby'vayushhaya deyatel'nost' // Izvestiya RGO. 2023. № 2. S. 73–87.
22. Makar'eva O.M., Shixov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V. Naledi bassejna r. Indigirka po sovremennym snimkam Landsat i istoricheskim dannym // Led i sneg. 2019. T. 59. № 2. S. 201–212.
23. Makar'eva O.M., Shixov A.N., Zemlyanskova A.A., Alekseev V.R., Nesterova N.V., Ostashov A.A. Gigantskie naledi-tary'ny' Severo-Vostoka Rossii po dannym Kadastra (1958 g.) i kosmicheskim snimkam 1973–2021 gg. // Kriosfera Zemli, 2023, t. XXVII, № 6, s. 27–39.
24. Matveev A.I., Eremeeva N.G. Texnologicheskaya ocenka mestorozhdenij olova Yakutii. Novosibirsk: akad. Izd. "Geo", 2011. 119 s.
25. Mironova S.I. Rezul'taty' nauchno-prakticheskix issledovanij narushenny'x zemel' Yakutii // 2021. № 5. S. 128–132.
26. Nastavleniya gidrometeorologicheskimi stanciyami i postami. Vy'pusk 6. Chast' III Sostavlenie i podgotovka k pečati gidrologicheskogo ezhegodnika. L., 1958 g. 290 s.
27. Nauchno-prikladnoj spravochnik: Mnogoletnie kolebanija i izmenchivost' vodny'x resursov i osnovny'x harakteristik stoka rek RF. SPb., 2021. 190 s.
28. Resursy' poverxnostny'x vod SSSR. Tom 17. Leno-Indigirskij rajon. L.: Gidrometeoizdat, 1972. 652 s.
29. SKIOVO. Sxema kompleksnogo ispol'zovaniya i ohrany' vodny'x ob'ektov bassejna r. Indigirka. Kniga 1. M.: OOO "VED", 2011. 196 s.
30. Stok nanosov, ego izuchenie i geograficheskoe raspredelenie / pod obshh. red. A.V. Karausheva. L.: Gidrometeoizdat, 1977. 240 s.
31. Frolova N.L., Magriczkij D.V., Kireeva M.B., Grigor'ev V.Yu., Gel'fan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I. Stok rek Rossii pri proisxozhdyashix i prognoziруemy'x izmeneniyax klimata: obzor

publikacij. 1. Ocenka izmenenij vodnogo rezhima rek rossii po danny'm nablyudenij // Vodny'e resursy. 2022. Tom 4. № 3. S. 251–269.

32. Chalov S.R., Prokop'eva K.N., Shkol'nyj D.I., Cyplenkov A.S. Vozdejstvie otrabotanny'x mestorozhdenij rossy'pnoj platiny' na rechnuyu sistemu r.Vy'venki (Kamchatskij kraj) // Izvestiya IGU. 2023. Tom 45. S. 127–149.

33. Yakutiya. M.: Nauka, 1965. 467 s.

34. Costard F., Dupeyrat L., Gautier E., Carey-Gailhardis E. Fluvial thermal erosion investigations along a rapidly eroding river bank: Application to the Lena River (Central Siberia) // Earth Surf. Process. Landforms. 2003. No. 28. Pp. 1349–1359.

35. Dogliotti A.I., Ruddick K.G., Nechad B., Doxaran D., Knaeps E. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters // Remote Sensing of Environment. 2015. Vol. 156. Pp. 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020>

36. Klein K.P., Lantuit H., Heim B., Doxaran D., Juhls B., Nitze I., Walch D., Poste A., Søreide Janne E. The Arctic Nearshore Turbidity Algorithm (ANTA) — A multi sensor turbidity algorithm for Arctic nearshore environments // Science of Remote Sensing. 2021. Vol. 4. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2021.100036>

37. Magritsky D.V., Vasilenko A.N., Frolova N.L. and Shevchenko A.I. Temporal and spatial patterns of changes in thermal regime of the rivers in the Northeast of the Asian part of Russia. 1. Assessment of Changes in the Water Temperature // Water Resources. 2023 (a). Vol. 50, No. 2. Pp. 190–201.

38. Magritsky D.V., Vasilenko A.N., Frolova N.L. Temporal and spatial patterns of changes in thermal regime of the rivers in the Northeast of the Asian part of Russia. 2. Changes in the Heat Flux // Water Resources. 2023(b). Vol. 50. No. 2. Pp. 202–214.

39. Shikhov A., Ilyushina P., Makarieva O., Zemlianskova A., Mozhina M. Satellite-based mapping of gold-mining-related land-cover changes in the Magadan Region, Northeast Russia // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. No. 14: 3564.

40. Shkolnyi D., Magritsky D., Chalov S. Impact of open-cast placer mining on sediment transport across Far Eastern rivers of Russia // International Journal of Sediment Research. 2024. Vol. 39. No. 5. Pp. 702–713.

41. Streletskiy D.A., Maslakov A., Grosse G., Shiklomanov N.I., Farquharson L., Zwieback S., Iwahana G., Bartsch A., Liu Liu, Strozzi T., Lee H., Debolskiy M.V. Thawing permafrost is subsid-ing in the Northern Hemisphere-review and perspectives // Environmental Research Letters. 2025. Vol. 20. No. 1. Pp. 1–16.

42. Tao H., Song K., Wen Z., Liu G., Shang Y., Fang C., Wang Q. Remote sensing of total suspended matter of inland waters: Past, current status, and future directions // Ecological Informatics. 2025. Vol. 86. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103062>

43. Vasilenko A., Frolova N., Grigoriev V.Y., Magritsky D., Shevchenko A., Winde F. Spatio-temporal variability of water temperature of arctic rivers in Russia over the past 60 years // Appl. Sci. 2024. No 14:10942. Pp. 1–27.

44. Vasilenko A.N., Magritsky D.V., Frolova N.L., Shevchenko A.I. Features of a long-term heat flux formation of the large Russian Arctic rivers and its transformations in estuaries under the influence of climate-induced and dam-induced effects // Geography, Environment, Sustainability. 2022. No 4(15). Pp. 158–170.

45. <http://atlaspacket.vsegei.ru/#ab5af961d7b653251> — open Geoinformation system: Atlas “The Bowels of Russia”.

46. <https://minpriroda.sakha.gov.ru/> — official website of the Ministry of Ecology, Nature Management and Forestry of the Republic of Sakha (Yakutia).

47. <https://earthengine.google.com/> — Google Earth Engine Internet platform (accessed: 27.03.2025).

48. <http://hydroweb.meteo.ru> — The information portal “The hydrological network of Roshydromet and Belhydromet. Rivers, canals, lakes and reservoirs” (accessed:27.03.2025).

49. <https://gold.lprime.ru> — PRIME GOLD — Bulletin of the Gold industrialist, the industry portal of the Prime agency (accessed 07.07.2025).

УДК 551.734.5+72.033(470.25-25)

О СТРОИТЕЛЬНОМ КАМНЕ ПСКОВСКИХ ЗЕМЕЛЬ В ЭПОХУ СРЕДНЕВЕКОВЬЯ

© 2025 г. М.Г. Цинкобурова*, М.Л. Барановская

*Санкт-Петербургский Горный университет императрицы Екатерины II***E-mail: maschek@mail.ru*

Поступила в редакцию 07.02.2025 г.

После доработки 19.07.2025 г.

Принята к публикации 27.07.2025 г.

Изучены литолого-фациальные особенности карбонатных пород верхнего девона, развитых в окрестностях городов Псков и Изборск и сформирован перечень критериев, позволяющих проводить макроскопическую диагностику разностей известняков в объектах историко-культурного наследия Пскова и Псковских земель. Проанализирован характер строительного материала, использованного в объектах оборонного зодчества эпохи средневековья региона. Проведенный анализ продемонстрировал взаимосвязь особенностей геологического строения и строительных материалов фортификационных сооружений Псковских земель. Недостаток каменных строительных материалов отчасти определил строительство исключительно деревянных и земляно-деревянных крепостей юга региона (район развития карбонатных, терригенно-карбонатных и терригенных пород среднего и верхнего франа, перекрытых мощной толщей отложений плейстоцена). Строительство северных крепостей (Изборск и Псков), расположенных в области развития карбонатных пород нижнего франа, обнажающихся в береговых обрывах нижнего течения р. Великой и ее притоков, было в камне. Ускоренные сроки крепостного строительства крепости Пскова и развитие в ближайших окрестностях древнего Пскова пород одного стратиграфического уровня приводили к отсутствию критериев выбора используемого каменного материала. Гдовская крепость была первой и единственной защитой земель Пскова с севера, этим было обусловлено строительство Гдовской крепости в камне, хотя геологическая ситуация Гдова (область развития терригенных пород эйфеля и живета, на большей части территории перекрытых отложениями квартера) также не благоприятствовала широкому развитию каменных строительных материалов. Характер валунного материала, обнаруженного в уцелевшем фрагменте стены Гдовской крепости, позволяет предположить, что на строительство активно использовался обломочный материал из моренных отложений.

Ключевые слова: Главное девонское поле, верхний девон, нижний фран, строительный камень, облицовочный камень, крепости средневекового Пскова

DOI: 10.31857/S0869607125030104, EDN: LTZCEN

Введение

Из всех городов средневековой Руси Псков обладал уникальным по интенсивности, скорости и площади масштабам каменного строительства. Только в самом Пскове за период с XIII по XV—начало XVI в. было построено 5 крепостных стен, к середине XV в. длина стен Псковской крепости составляла 10 км. Помимо этого, шло строительство в камне церквей, монастырей, жилых зданий. Работы,

посвященные изучению характера каменных строительных материалов, в первую очередь иностранные, демонстрируют большие перспективы анализа характера используемого каменного материала для решения широкого спектра задач: как исторической и историко-географической направленности (локализация мест древних горных разработок, путей и способов транспортировки строительных материалов), так и в искусствоведческо-реставрационной области (выяснение уровня мастерства древних каменотесов и строителей, рекомендации при проведении реставрационных работ). Для земель средневекового Пскова существует большое количество работ историко-искусствоведческого характера [1, 2, 7–12, 14, 16]. В настоящее время имеются специализированные публикации и сводки по использованию различных видов пород (гранитов, мраморов, песчаников, известняков) в качестве облицовочного камня [24, 25], интенсивности и механизму выветривания каменного материала [22, 23], работы, отражающие региональную специфику облицовочного камня. Одними из первых отечественных работ, посвященных детальному изучению характера облицовочного камня в объектах историко-культурного наследия средневековой Руси, были исследования группы отечественных стратиграфов, палеонтологов и литологов в 50-е годы XX в. [2, 5]. Для северо-запада России есть недавние публикации по использованию девонских (среднефранских) известняков в средневековом зодчестве Великого Новгорода [21]. Несмотря на то что изучение истории Псковской архитектуры началось в конце XIX—начале XX в. [1], детальное исследование каменного материала, используемого в средневековых сооружениях Пскова и Псковских земель, никогда не проводилось. Цель статьи — рассмотреть особенности строительных каменных материалов в трех наиболее хорошо сохранившихся средневековых крепостях (Псковской, Изборской и Гдовской).

Краткая характеристика особенностей геологического строения Псковских земель

В геологическом плане территория земли Псковской относительно однообразна и локализована в пределах Главного девонского поля. Северная часть региона приходится на область развития глинисто-терригенных пород среднего девона (эйфель и живет), южная — глинисто-терригенных, существенно карбонатных и глинисто-карбонатных пород верхнего девона (фран) (рис. 1). Породы девона представляют собой типичный пример отложений мелководной части эпиконтинентального палеозойского морского бассейна с крайне невыдержанным режимом седиментации. В свете этого для пород девона свойственны большая литолого-фациальная изменчивость по латерали, многочисленные перерывы, ритмичное повторение в разрезе литологически схожих пород. Карбонатная составляющая разреза франа представлена разной степени трещиноватости и крепости микритовыми и кластическими известняками, ракушняками (криноидными, криноидно-брахиоподовыми, брахиоподовыми, пелециподовыми), онколитовыми и строматопоро-онколитовыми известняками. В большинстве своем карбонатные породы франа в разной степени доломитизированы.

Область развития карбонатных пород франа начинается от северных предместий Пскова и тянется до южных границ Псковских земель. Со стратиграфической точки зрения карбонатная толща охватывает почти весь фран (кроме нижней и верхней части) и относится к интервалу от плавиньского до стипинайского горизонта (табл. 1).

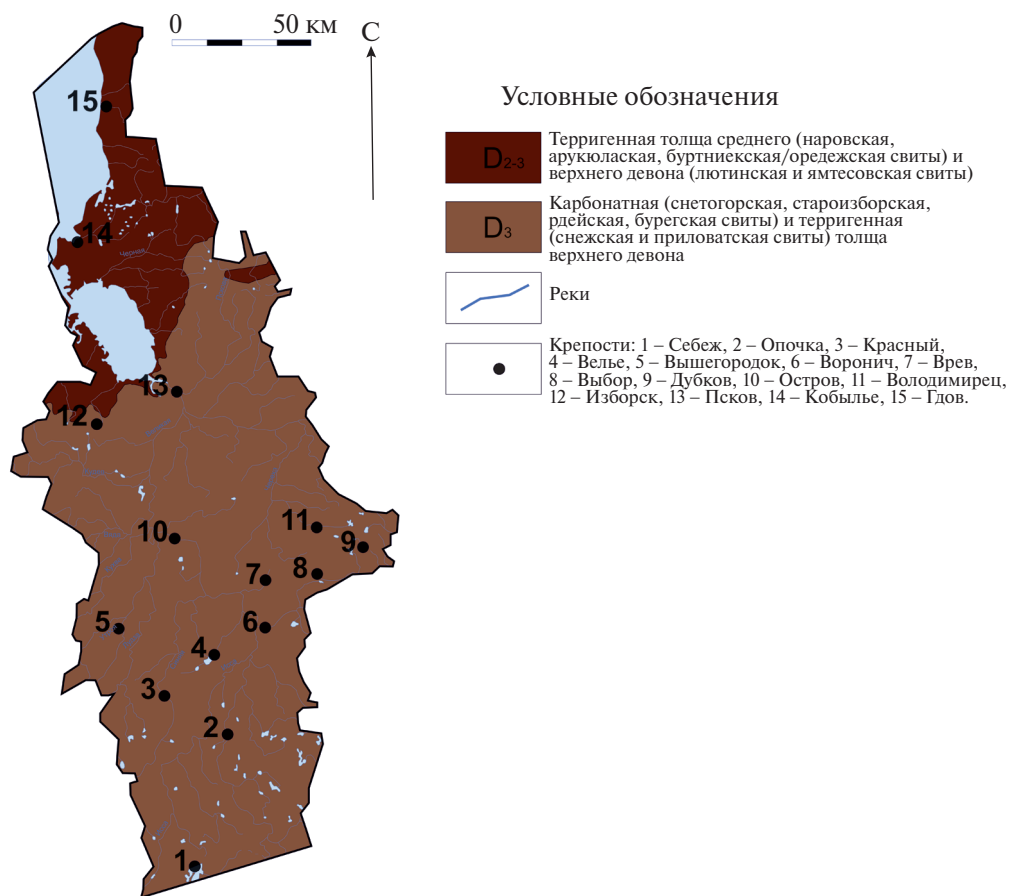


Рис. 1. Схема распространения терригенной и карбонатной толщи девона (по [4])¹ с наложенной информацией о распределении крепостей Псковских земель в XVI–XVII вв. (по Б.Н. Харлашов [18])².

Fig 1. The distribution scheme of the terrigenous and carbonate sediments of the Devonian (according to [4]) with superimposed information on the distribution of fortresses of the Pskov lands in the XVI–XVII centuries (according to B.N. Harlashov [18]).

¹ Верхняя терригенная толща (верхний фран, снежская и ловатская свиты) развита только на самой южной периферии листа.

² Изборск (1330 г. — дата постройки новой крепости на Жеравьей горе каменная), Гдов (1431 г., каменная), Остров (1342 г., каменная), Воронич (1342), Велье (1368), Дубков (до 1406 г.), Черница (до 1406 г.), Опочка (1414), Врев (до 1426 г.), Выбор (1431), Володимирец (1462), Городец (Вышегородок, 1476–1478), Красный Городец (1464). Крепости Воронач, Выбор, Володимирец, Красный Городец — земляно-деревянные, крепости Черница и Городец (Вышегородок) — деревянные; крепость Велье (земляно-дерево-каменная); крепость Врев (деревянная). Все крепости разрушены во время Ливонской войны. Крепость Дубков (деревянная), в XVII в. уже не существовала. Крепость Опочка (земляно-деревянная), уничтожена пожаром в 1774 г. Вышегородок — деревянная крепость была построена в 1478 г., разрушена рыцарями Ливонского ордена в 1479 г. Принадлежность населенного пункта Себеж неоднократно менялась, деревянная крепость Себеж была возведена в 1535 г. Крепость Котельно была разрушена в 1428 г., вместо нее была построена крепость Выбор. Земляно-деревянная крепость Коложе была разрушена в 1406 г., вместо нее построена крепость Опочка. Характеристика крепостей дана по П.А. Раппопорту [12].

На большей части территории породы девона перекрыты невыдержанным по мощности и литологическому составу чехлом четвертичных отложений. Естественные обнажения пород девона приурочены к береговым обрывам, однако в течение XX в. произошло значительное ухудшение обнаженности территории, обусловленное как естественными, так и искусственными причинами [20].

Таблица 1. Стратиграфическая характеристика карбонатных и терригенно-карбонатных пород франа, развитых в пределах Псковских земель

Table 1. Stratigraphic characteristics of Frasnian carbonate and terrigenous-carbonate rocks developed within the Pskov lands

Подъярус	Региональные и субрегиональные стратиграфические подразделения ¹		Свиты	Характер пород ²
	Горизонты	Слои		
Верхний	Стипинайский		Смотинско-ловатская	Доломитизированные известняки и глины
	Памушский		Приловатская	Песчаники, алевролиты, глины
	Снежский	Снежские	Снежская	
Средний	Даугавский	Бурегские	Бурегская	Доломитизированные известняки, органо-генные известняки
		Ильменские	Рдейская	Известняки, органо-генные известняки, глины, ракушники
		Свинордские		Известняки, органо-генные известняки с прослоями известковистых глин
		Порховские		
Нижний	Дубниковский	Дубниковские	Староизборская	Известняки, доломитизированные известняки, доломиты, ракушники, глины, гипс
	Плявиньский	Чудовские		Известняки, доломитизированные известняки, органо-генные известняки, с подчиненными прослоями известковистых глин и ракушников
		Псковские		
		Снетогорские	Снетогорская	Доломиты с прослоями мергелей

¹ Региональные стратиграфические подразделения даны по работе А.О. Иванова [6].

² С учетом высокой степени литолого-фациальной изменчивости пород верхнего девона литологическая характеристика стратонов дается для районов приповерхностного их распространения на территории Псковских земель [4, 15].

Методика

Авторами были детально послойно изучены и опробованы стратотипические и опорные разрезы субрегиональных и местных стратиграфических подразделений карбонатного нижнего и среднего франа (табл. 2) Изборско-Ильменской структурно-фациальной зоны (в пределах которой расположена территория, относящаяся к землям средневекового Пскова). В лабораторных условиях было уточнено послойное макроскопическое описание и из всех слоев карбонатные породы были изучены в шлифах, после чего были выделены основные литотипы карбонатных пород псковских слоев.

В процессе описания для пород нижнего франа, в области развития которых расположены крепости Псковская и Изборская крепость, был сформирован перечень критериев, позволяющих проводить макроскопическую диагностику разностей известняков в объектах историко-культурного наследия Пскова и Псковских земель. Притом что сейчас детальная диагностика карбонатных пород нуждается в микроскопических исследованиях, авторам помимо обязательного изучения микроструктур, микротекстур и более детального выяснения состава известняков было необходимо выделить коррелирующиеся с выделенными литотипами известняков макропризнаки, чтобы иметь возможности визуального узнавания (не сопровождающегося

Таблица 2. Изученные стратотипические и опорные разрезы карбонатных пород нижнего франа окрестностей Псковских земель

Table 2. Studied stratotypic and reference sections of carbonate rocks of the Lower Frasnian of the Pskov lands

Район	Расположение изученного разреза	Стратиграфический интервал
Псковской крепости	На правом берегу п. Великая в пос. Писковичи	Снетогорская свита
	На правом берегу р. Великой у Снетогорского монастыря	Снетогорская и староизборская (низы) свиты, стратотип снетогорских слоев
	Серия обнажений на левом берегу р. Великой в пос. Родина	Снетогорская свита
	Обнажение на правом берегу р. Каменка в д. Гнилуха	Низы староизборской свиты
	Обнажение на левом берегу р. Мирожка в г. Псков вблизи Юбилейной улицы	Низы староизборской свиты
	Обнажение на левом берегу р. Великая в г. Псков у моста им. 50-летия Октября	Низы староизборской свиты, стратотип псковских слоев
	Протяженные обнажения на левом и правом берегах р. Великая в районе Выбутские пороги	Староизборская свита
	Отработанный известняковый карьер у д. Раздолье	Староизборская свита
Изборской крепости	Известняковый карьер Коломно	Староизборская свита
	Отработанный известняковый карьер на восточной окраине Изборска	Староизборская свита
	Обнажение Славянские ключи	Староизборская свита

отбором образцов и микроскопическими исследованиями) выделенных разностей известняков в древних сооружениях. К таким макропризнакам относятся биотекстуры (хорошо узнаются сильно биотурбированные известняки со следами *Balanoglossites sp.*), характерные лито- и биокласты (ожелезненные пеллеты, биокласты в грейнстоунах, баундстоуны, крупные биокласты в пакстоунах) (табл. 3).

При выборе для изучения объектов историко-культурного наследия авторы старались учитывать информацию о более поздних реконструкциях и реставрациях [11], чтобы в ходе исследований уделять внимание, в первую очередь, оригинальному каменному материалу, соответствующему времени постройки. Так характеризуя состояние сохранности башен Псковского кремля и Окольного города, И.К. Лабутина выделила три категории: башни, сохранившиеся максимально, башни восстановленные частично (Кремль — Плоская, Кутняя; Окольный город — Высокая, Варламовская, Петровская), башни, возведенные заново (Кремль — Средняя, Часовая, Довмонтова (Смердя), Рыбницкая, Власьевская) [11]. Авторами на высоту человеческого роста были макроскопически обследованы плитки известняков в нижней части наиболее хорошо сохранившихся башен Кремля и Окольного города (первая группа) и стена Окольного города (табл. 3). Помимо этого, авторами был описан оригинальный каменный материал в фундаменте ряда церквей Довмонтова города (табл. 3).

Крепость Изборска также испытала серию реставраций, последняя реставрация была в 2012–2013 гг., при этом верхние части башен и стен были в значительной степени надстроены, на башне Луковка оборудована обзорная площадка, на участке между башнями Колокольная и Луковка обустроен подъем на крепостные стены. В связи с этим авторами при макроскопическом описании известняковых плит в постройках также максимальное внимание уделялось нижней части башен Изборской крепости (с внешней и внутренней стороны), характеризующейся наибольшей сохранностью оригинального каменного материала (Колокольная, Луковка, Талавская, Рябиновка, Вышка).

Таблица 3. Исследованные объекты оборонного зодчества Пскова

Table 3. Investigated objects of Pskov defense architecture

Псков	Кремль, фундаменты церквей Довмонтова города	Церковь Федора Стратилата Святой Софии Святого Кирилла Иерусалимского на Гребле Дмитрия Солунского Воскресенская Алексия Митрополита
	Башни Окольного города	Петровская Михайловская Гремячая Глухая Мстиславская Покровская
	Стена Окольного города	

Результаты

Из трех сохранившихся крепостей две (Псков и Изборск) находятся в области распространения карбонатных пород плявиньского горизонта (в меньшей степени также и дубниковского — Изборск), а Гдов — глинисто-терригенных пород эйфеля (черноярский горизонт, аракулаская свита).

Город Псков. Как было отмечено, Псковская крепость расположена в области распространения известняков плявиньского горизонта, а именно нижней части староизборской свиты (соотносящейся с псковскими слоями) (рис. 1). На северной окраине Пскова (район Снетогорского монастыря) развиты породы снетогорской свиты (снетогорские слои). Плявиньский этап соответствует крупной франской трансгрессии, достигающей первого максимума уже в первую половину псковского времени. В районе Пскова псковские известняки представлены различными вышеперечисленными разностями известняков, переслаивающимися с маломощными прослоями известковистых глин, и в настоящее время обнажающимися на территории города в береговых обрывах Великой, Псковы и их притоков. Район Пскова в псковское время относился к приподнятому участку морского дна раннефранского морского бассейна, т.н. Лужско-Талавской террасе [15]. В связи с этим здесь наблюдается сокращенный разрез псковских слоев, выпадение из разрезов некоторых ритмов и, тем самым, довольно частая повторяемость в разрезе одних разностей известняков. Анализируя характер известняков в стенах Окольного города и Псковского Крома, авторы увидели явное доминирование двух разностей известняков (Цинкобурова et al., в печати) — микритовых сильно биотурбированных известняков и криноидных и брахиоподово-криноидных известняков (рис. 2). Указанные разности известняков широко распространены в псковских слоях на территории Пскова и встречаются как в средневековых постройках (крепостных и культовом зодчестве), так и в сооружениях с более поздней реконструкцией или реставрированных стенах.



Рис. 2. Сильно биотурбированные микритовые и криноидные известняки: (а) — биотурбированные известняки в фундаменте церкви священномученика Тимофея Газского, XIV в., Довмонтов город; (б) — криноидные известняки в стене Окольного города, башня Глухая, XVI в.

Fig. 2. Highly bioturbated micrite and crinoid limestones: (a) bioturbated limestones in the foundation of the Church of St. Timothy of Gaza, 14th century, Dovmont's town; (b) crinoid limestones in the wall of the Roundabout town, Glukhaya Tower, 16th century.

Более редкими разностями известняков, используемыми в качестве строительного материала, являются различные “шламовые” (кластические) известняки (рис. 3а) и строматопоро-онколитовые известняки. Наряду с доминирующими разностями известняков, характеризующимися относительной крепостью, встречаются участки, выполненные сильно трещиноватыми, непрочными известняками (рис. 3б).

Изборск. В окрестностях Изборска разрез псковских слоев представлен несоизмеримо более полно, чем в Пскове, кроме того здесь встречаются также выходы снетогорских, чудовских, дубниковских слоев (снетогорская и староизборская свиты) и терригенной части основания франа [15] (рис. 1). Изборская крепость расположена на холме, в склонах которого и сейчас наблюдаются обнажения псковских слоев. В облицовке стен крепости обнаружены различные типы известняков снетогорской и староизборской свит. Как и в фортификационных и культовых сооружениях Пскова доминируют более крепкие разности — микритовые известняки с разной степенью биотурбации и доломитизации (рис. 4), кластические известняки, широко развиты в качестве облицовочного материала нижней внешней части башни Луковка строматопоро-онколитовые известняки.

Встречаются также органогенные известняки (рис. 5), в отличие от органогенных известняков, обнаруженных в крепостных стенах Пскова, органогенные известняки в стенах Изборской крепости характеризуются другой степенью прочности. Брахиоподово-гастроподовые, гастроподово-пелециподовые ракушники, сильно биотурбированные известняки активно использовались и при реставрации стен крепости, в частности, при последней реставрации 2012 г.

Гдов. Гдов расположен в районе развития терригенных (преимущественно песчаных) пород среднего девона (верхи эйфеля, арукюлаская свита) (рис. 1) [4]. В отличие от Псковской и Изборской крепостей, в Гдове частично сохранилась только одна (юго-западная) стена крепости, а также есть фрагменты с различной

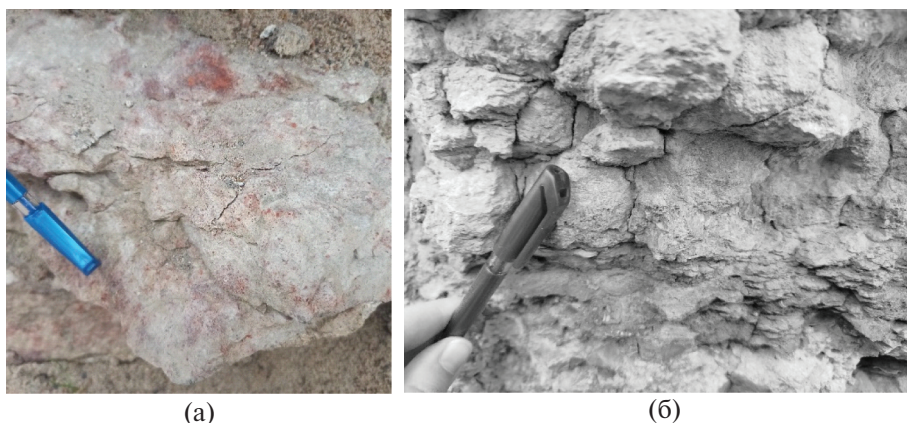


Рис. 3. Более редкие разности известняков: (а) — микритовые известняки с редкими ходами илоедов и известняки с ожелезненными литокластами в фундаменте церкви Дмитрия Солунского, 1143 (1352, 1453, 1523); (б) — сильно трещиноватые глинистые известняки с прослоями известковистых глин в стене Окольного города, Михайловская башня (1-я четверть XVI в.).

Fig. 3. Rarer limestone differences: (a) — micrite limestones with rare traces of the bioturbation and limestones with ferrous lithoclasts in the foundation of the Church of Dmitry Solunsky, 1143 (1352, 1453, 1523); (b) — strongly fractured clay limestones with layers of calcareous clays in the wall of the Roundabout town, Mikhailovskaya Tower (1st quarter of the XVI century).



Рис. 4. Сильно биотурбированные микритовые известняки в облицовке наружного участка нижней части башни Луковка.

Fig. 4. Highly bioturbated micrite limestones in the lining of the outer section of the lower part of the Lukovka tower.



(a)



(б)

Рис. 5. Органогенные известняки с крупными биокластами в кладке стен Изборской крепости: (а) — известняк с крупным фрагментом стебля криноидеи; (б) — известняк с крупной створкой двустворки и разрозненными несортированными члениками стеблей криноидеи.

Fig. 5. Organogenic limestones with large bioclasts in the masonry of the walls of the Izborsk fortress: (a) — limestone with a large fragment of the crinoid stem; (b) — limestone with a large valve bivalve's and scattered unsorted segments of crinoid stems.

наружной частью на северо-западной и юго-восточной стене. Сохранившаяся стена демонстрирует чередование валунов магматических (преимущественно граниты) и метаморфических пород и известняковых глыб (известняки микритовые и алевроитистые), при этом наблюдается явное преобладание валунов (рис. 6). Среди плиток известняков в пределах всех 3 стен доминируют толсто плитчатые (около 10 см толщина плиток) серые доломитизированные микритовые известняки с неровными, слегка бугристыми поверхностями напластования. Встречается очень редкий мелкий детрит члеников стеблей криноидеи и ринхонеллиформных брахиопод. Излом раковистый. Также обнаружены пестроцветные красновато-серые ожелезненные микритовые доломитизированные известняки.



Рис. 6. Сохранившаяся стена Гдовской крепости: (а) — фрагмент сохранившейся стены с хорошо видимым чередованием валунов магматических пород и известняковых плит; (б) — общий вид сохранившейся стены.

Fig. 6. The preserved wall of the Gdov fortress: (a) — a fragment of the preserved wall with a clearly visible alternation of boulders of magmatic rocks and limestone slabs; (b) — a general view of the preserved wall.

Обсуждение

Анализ строительного материала в объектах средневекового зодчества Пскова продемонстрировал достаточно большую неизбирательность к сырью средневековых строителей, возможно, отчасти обусловленную быстрыми сроками строительства. Также наблюдается хаотичная ориентировка известняковых плит в стенах Кремля, Окольного города и башен, что свидетельствует о том, что в первую очередь выполнялась главная цель: быстрое проведение строительных работ, не учитывая декоративные и инженерно-геологические особенности строительного материала. Неизбежно образующиеся неровности, шероховатости скрывали под слоем штукатурки. По всей вероятности, указанные особенности касались только оборонного строительства, а не гражданской архитектуры, где, по свидетельству Ю.П. Спегальского [6], разные по прочностным свойствам и водопроницаемости типы известняков использовались в различных частях зданий (фундамент и подвалы, верхние этажи).

Характеризуя особенности каменного материала, используемого в облицовке Изборской крепости, известный псковский краевед и искусствовед С.А. Цвылев отмечал другое качество известняков (в частности морозостойкость), способствовавшее относительно лучшей сохранности элементов декора крепостных стен Изборска (плитняковых крестов, орнамента) [19]. По нашему мнению, это связано с упомянутым выше большим разнообразием нижефранских известняков в окрестностях Изборска и возможностью подбора более широкого спектра разновидностей известняков. Разнообразие каменного материала, используемого в Изборской крепости, было усугублено, по всей вероятности, тем, что при строительстве крепости на Жеравьей горе согласно данным В.В. Седова [14] был перенесен материал из старого городища, расположенного на расстоянии около 1.5 км. В окрестностях городища развиты известняки более низких стратиграфических уровней, чем на склонах Жеравьей горы.

Как было отмечено выше, детальное изучение каменного материала, использованного в объектах средневекового зодчества северо-запада Руси (для некоторых объектов средневекового Новгорода) было только в работе И. Антипова [21]. В Новгороде, как и в Пскове, широко использовались карбонатные породы

верхнего девона. Сравнивая данные авторов с указанной работой, посвященной каменному материалу в Новгородском зодчестве, можно отметить, что наиболее активно использовались доломитизированные микритовые известняки (табл. 4), хотя и в Новгороде использовали достаточно широкий спектр карбонатных пород, явно руководствуясь в первую очередь удобством отработки и транспортировки. Проведенные на настоящий момент выборочные исследования характера каменного материала в средневековых постройках Великого Новгорода демонстрируют использование верхнефранских известняков (смотинско-ловатская свита и бургеская свита), развитых в Южном Приильменье.

В вышеупомянутой работе С.А. Цвылева отмечено, что Гдовская и Ивангородская крепости «*строены из местного известняка*» [19, с. 33], на использование девонских плитняков, чередующихся с валунами, указывали А.Н. Кирпичников, В.В. Косточкин, крупнейшие специалисты по истории и археологии северо-запада России [7, 9]. При этом В.В. Косточкин отмечал, что более поздние починки крепостных стен проводились исключительно деревом. В Гдовском районе развита морена лужской стадии осташковского оледенения (на большей части территории перекрывающая породы девона), завалуненность территории невыдержанная от слабой до высокой на отдельных участках (до 100 валунов на 1 га) [3]. Это позволило активно использовать при строительстве валунный материал. Характер плиток известняков отличается достаточно большим однообразием, нетипичным для Псковской и Изборской крепостей. Чистые микритовые известняки с характерным раковистым изломом более похожи на известняки ракуверского горизонта печуркинской свиты (верхний ордовик), развитыми в виде полосы субширотного простирания в 50 км к северу и северо-востоку от Гдова [4].

Рассмотренные в работе крепости располагались на севере региона, в то время как подавляющее большинство крепостей тяготели к южной половине земель Пскова (рис. 1). С геологической точки зрения это область развития глинисто-терригенно-карбонатной толщи среднефранского возраста (рдейская и бургеская свиты, при этом в составе рдейской свиты значительную часть играют глинисто-терригенные породы) и существенно глинисто-терригенной толщи верхнего франа (снежская и приловатская свиты). Однако указанные крепости были построены в области резкого наращивания мощности гляциальных, флювиогляциальных и лимногляциальных плейстоценовых отложений [4]. На большей части территории (соответствует Великорецкой равнине, Соротьской низменности, склонам Бежаницкой возвышенности) породы девона перекрыты мощным чехлом отложений квартера. Исключением являются районы крепости Остров, вблизи которой и сейчас наблюдаются хорошие обнажения коренных пород как в береговых обрывах р. Великой, так и ее притоков (Вяды, Кухвы, Утрои).

Неравномерный характер распространения обнажений коренных пород связан с общими особенностями геологического строения и геологической истории Псковской области и всего северо-запада Русской плиты. Как отмечал О.М. Татарников [17], длительный (с позднего палеозоя, мезозой и кайнозой) режим субэразмальной денудации, сочетание различных в плане устойчивости к процессам денудации отложений и моноклиналиное залегание пород палеозоя определили куэстовый характер местности, более отчетливо проявившийся на доледниковом этапе развития области и во многом определивший характер ледниковой экзарации и аккумуляции.

Таблица 4. Девонские известняки в объектах историко-культурного наследия на территории Главного девонского поля по данным авторов и по литературным данным

Table 4. Devonian limestones in historical and cultural heritage sites on the territory of the Main Devonian Field according to the authors and literature data

	Группы литотипов	Характерные признаки литотипов	Объекты оборонного (Псков), культового и гражданского (Новгород) зодчества
Цинкобурова, Барановская, 2025	Литотипы Л1–Л3, малстоуны	Л1. Светло-серые сильно доломитизированные известняки с тонкими ветвистыми следами илоедов и редким мелким макроскопически различимым детритом криноидей	Церкви Довмонта города (Федора Стратилата, Святой Софии, Святого Кирилла Иерусалимского на Гребле, Дмитрия Солунского, Воскресенская, Алексия Митрополита), башни Окольного города (Петровская, Михайловская, Гремячая, Глухая), стена Окольного города
		Л2. Плотные серые искристые доломитизированные известняки с редким мелким детритом криноидей, брахиопод, остракод, гастропод	
		Л3. Светло-серые и кремовые сильно биотурбированные средне и тонкоплитчатые известняки с прямыми субцилиндрическими вертикальными и U-образными, иногда хаотично расположенными следами <i>Balanoglossites sp.</i>	Церкви Довмонта города (Федора Стратилата, Святой Софии, Святого Кирилла Иерусалимского на Гребле, Алексия Митрополита), башни Окольного города (Петровская, Михайловская, Гремячая, Глухая), стена Окольного города
	Литотипы Л4–Л6, вакстоуны и пакстоуны (брахиоподово-криноидные, криноидные)	Л4. Серые доломитизированные известняки. Детрит мелкий, представлен криноидеями, остракодами брахиоподами. Сильно ожелезненные пеллеты, ожелезнения от края, что создает ощущение корочки. Внутри ожелезненных пеллет брахиоподовый микродетрит	Церкви Довмонта города (Дмитрия Солунского, Алексия Митрополита), Башни Окольного города (Глухая)
		Л5. Серые доломитизированные известняки (вакстоуны-пакстоуны) с включениями макроскопически различных ожелезненных литокластов (пеллеты) и детритом достаточно крупных брахиопод, реже мелкий детрит криноидей, остракод. Пеллеты вытянуты в одну сторону и ориентированы параллельно поверхности напластования	
		Л6. Мелкодетритовые серые доломитизированные известняки (брахиоподово-криноидные вакстоуны и криноидные вакстоуны с подчиненным количеством детрита брахиопод) с ожелезненными пеллетами с микритовым заполнением	Церкви Довмонта города (Федора Стратилата, Святой Софии, Святого Кирилла Иерусалимского на Гребле), Башни Окольного города (Глухая), стена Окольного города

Таблица 4. Продолжение

	Группы литотипов	Характерные признаки литотипов	Объекты оборонного (Псков), культового и гражданского (Новгород) зодчества
Цинкобурова, Барановская, 2025	Литотипы Л17–Л19, грейнстоуны (брахиоподово-криноидные, брахиоподовые), строматопоровые баундстоуны	Л17. Серые пятнистые, в разной степени доломитизированные строматопоровые известняки (баундстоуны) с редким макроскопически различимым детритом ринхонеллиформных брахиопод, помимо брахиопод биокласты представлены криноидеями и остракодами. Диаметр строматопоровых желваков варьирует в пределах от 1–1.5 см до 3–4 см	Церкви Довмонта города (Святого Кирилла Иерусалимского на Гребле), Башни Окольного города (Михайловская)
		Л18. Зеленовато- и желтовато-серые брахиоподовые ракушники (брахиоподовые грейнстоуны), среди брахиопод доминируют представители местного зонального вида <i>Ladogia meyendorfi</i> (Vern.) представленные преимущественно разрозненными целыми и обломанными створками с хорошо сохранившейся тонкой струйчатостью	Башни Окольного города (Глухая)
		Л19. Желтовато-серые брахиоподово-криноидные известняки (грейнстоуны)	Церкви Довмонта города (Дмитрия Солунского, Воскресенская, Алексия Митрополита), башни Окольного города (Петровская, Михайловская, Гремячая, Глухая)
	Хардграунды с железистой импрегнацией, следами сверления <i>Trypanites Mägdefrau</i> и склеробионтами — продуктидами <i>Irboskites fixates</i> Bekker и микроконхидами. Заполнение следов часто перекристаллизовано		Стена Окольного города
	По Antipov et al., 2020	Доломитизированные микритовые известняки	Палата архиепископа Василия Калики
			Церковь Рождества Пресвятой Богородицы в Десятинном монастыре
		Алевритовые вторичные доломиты	Владычная палата Георгиевский собор Юрьева монастыря

¹ Смотинско-ловатская свита стипинайского горизонта верхнего франа.

Таблица 4. Окончание

	Группы литотипов	Характерные признаки литотипов	Объекты оборонного (Псков), культового и гражданского (Новгород) зодчества
По Antipov et al., 2020	D ₃ br ² , средняя пачка	Вторичные доломиты со следами илоедов	Палата архиепископа Василия Калики
		Доломитизированные микритовые известняки с железисто-марганцевыми дендритами	Церковь Петра и Павла на Синичьей горе
			Церковь Воскресения Христова на озере Мячино
	D ₃ br, верхняя пачка	Детрито-микритовые известняки (водорослево-остракодовые вакстоуны)	Георгиевский собор Юрьева монастыря
	D ₃ il, верхняя пачка	Кварцевые песчаники	Церковь Воскресения Христова на озере Мячино

Большая часть территории Псковской области расположена в пределах Девонской куэсты. В свою очередь ледниковая экзарация и ледниковая и водно-ледниковая аккумуляция на многих участках существенно изменили доледниковый рельеф и привели к формированию серии островных и маргинальных возвышенностей и гляциодепрессионных низменностей. Уступ Девонской куэсты (аструктурный склон), проходящий по линии Рига–Псков, в значительной степени нивелирован [17]. К зоне уступа приурочены обнажения карбонатных пород нижнего франа в окрестностях Пскова и Изборска. Центр и юг псковских земель в основном расположены в пределах структурного склона Девонской куэсты, характеризующегося мозаичным характером как мезо- (Бежаницкая, Судомская, Себежская, Великолукская возвышенности. Невельское поднятие, Соротьская, Усвятская низменности), так и микрорельефа. Это приводит к наращиванию мощности четвертичных отложений на значительных территориях, более плохой и менее равномерной обнаженности коренных пород. К тому же, как было отмечено выше (рис. 1), южная половина области расположена в области развития глинисто-терригенно-карбонатных пород среднего и верхнего франа.

Возможно, отчасти геологическими особенностями местности обусловлен характер строительства большинства южных крепостей региона (земляно-деревянные крепости), только крепость Острова была каменной. К сожалению, в настоящее время от некогда мощнейшей крепости Острова осталось только 3 маленьких (длиной около 2 м и высотой около 1.5 м) разрозненных фрагмента крепостных стен. Указанными особенностями местности объясняется отмеченное П.А. Раппопортом [12] широкое развитие крепостей островного типа с защитой, часто обеспеченной естественными преградами.

Уточнение характера материала карбонатных пород в сохранившейся стене Гдовской крепости и конкретизация их стратиграфической принадлежности авторами планируется в ходе микроскопических исследований микропроб карбонатного материала, полученного из стен Гдовской крепости. Однозначно, что доставка каменного материала к Гдовской крепости осуществлялась на значительно большее расстояние, чем в ситуации с крепостями Пскова, Острова и Изборска.

¹ Бурегские слои даугавского горизонта верхнего франа.

Заключение

Проведенный анализ каменного материала в средневековых оборонных постройках Пскова позволяет сделать следующие выводы.

1. В оборонных постройках преобладают различные разности доломитизированных известняков, характеризующиеся относительной крепостью, однако явно отличные друг от друга по степени биотурбации, количеству и качеству биокластов.

2. Единичное появление менее крепких разностей известняков (брахиоподовых ракушняков с прослоями глин) в облицовке Михайловской башни, возможно, связано или с поспешным ремонтом башни, или с ускоренным строительством этой части стены Окольного города.

3. За исключением Гдова, каменный материал брался в непосредственной близости от оборонительных сооружений. В связи с этим каменные крепости (Псков, Изборск, Остров) расположенные в зоне близкого приповерхностного залегания карбонатных пород плявиньского, дубниковского и даугавского горизонтов нижнего и среднего франа (аструктурный склон Девонской куэсты).

4. Геоморфологические и геологические особенности местности повлияли на характер строительства оборонительных сооружений. Мозаичный характер рельефа, особенности состава коренных пород (глинисто-терригенно-карбонатная толща среднего франа), более плохая и крайне неравномерная обнаженность на юге Псковских земель (структурный склон Девонской куэсты) не благоприятствовали каменному строительству, поэтому для этого региона характерны земляно-деревянные крепости.

5. Строительство Гдовской крепости в камне, не смотря на неблагоприятные геологические условия (отсутствие в ближайших окрестностях карбонатных пород), подчеркивает стратегическую важность Гдовской крепости, северного форпоста псковских земель.

Список литературы

1. Антипов И.В., Скобкарева Д.С. Архитектура Пскова XIV–XVI в.: основные итоги и перспективы изучения // Древняя Русь. Вопросы медиевистики. 2020. № 2. С. 172–188. <https://doi.org/10.25986/IRI.2020.80.2.0013>
2. Воронин Н.Н. У истоков русского национального зодчества. М.: Ежегодник Живопись. Архитектура, 1952. С. 257–316.
3. Геология четвертичных отложений Северо-Запада Европейской части СССР. Под ред. Н.И. Алухтина и И.И. Краснова. Л.: Недра, 1967. 344 с.
4. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Центрально-Европейская. Лист О-35 — Псков, (N-35), О-36 — Санкт-Петербург (2012) Объяснительная записка СПб.: ВСЕГЕИ, 2012. 510 с.
5. Звягинцев Л.И., Викторов А.М. Белый камень Подмосковья. М.: Недра, 1989. 116 с.
6. Иванов А.О. Комплексы позвоночных и зоны верхнего живета и нижнего франа Восточно-Европейской платформы и Урала // Вестник геонаук. 2023. № 1(337). С. 23–29. <https://doi.org/https://doi.org/10.19110/geov.2023.1.3>. EDN: YTCRMR.
7. Кирпичников А. Крепость древнего Гдова. Н. СПб.: Вести, 2000. 56 с.
8. Клейменов В.И. К вопросу о военной организации Псковской земли в XIV–XV в.: контингенты из волости и городовые полки пригородов Пскова // Палеороссия. Древняя Русь: во времени, личности, идеях. 2023. Т. 21, № 1. С. 61–76. https://doi.org/10.47132/2618-9674_2023_1_61

9. Косточкин В.В. Кремль древнего Гдова (из истории псковского оборонного зодчества) // *Материалы и исследования по археологии СССР*. 1958. № 77. С. 67–100.
10. Косточкин В.В. Русское оборонное зодчество конца XIII — начала XVI веков. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 287 с.
11. Абутина И.К. Историческая топография Пскова в XIV–XV вв. М.: Наука, 2011. 342 с.
12. Раппопорт П.А. Очерки по истории военного зодчества Северо-Восточной и Северо-Западной Руси X–XV вв. М.; Л.: Изд-во Акад. наук СССР, Ленинград. отд-е, 1961. 242 с.
13. Рейтлингер Е.А. Белый камень построек древней Руси // *Природа*. 1964. № 4. С. 79–82.
14. Седов В.В. Изборск в раннем Средневековье. М.: Наука, 2007. 413 с.
15. Сорокин В.С. Этапы развития северо-запада Русской платформы во франком веке. Рига: Зинатне, 1978. 282 с.
16. Спегальский Ю.П. Каменное зодчество Пскова. Л.: Стройиздат, 1976. 120 с.
17. Татарников О. М. Рельеф и палеогеография Псковской области. Псков: ПГПУ, 2007. 127 с.
18. Харлашов Б.Н. Погосты и губы Псковской земли в XIV–XVI вв. (К вопросу об административно-территориальном делении) // *Вестник Псковского Вольного университета*. 1995. Т. 2, вып. 4–6. С. 76.
19. Цвылев С.А. “Самородный камень” в зодчестве древнего Пскова. Псков, ГБУК “Псковская областная универсальная научная библиотека”, 2015. 60 с.
20. Цинкобурова М.Г., Норова Л.П., Смирнов Д.М., Барановская М.Л. Об утрате объектов геологического наследия Главного девонского поля // *Горный журнал*. 2024. № 9. С. 90–96. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.09.14>
21. Antipov I., Antonov A., Jolshin D., Savchenok A., Tarasenko A., Yakovlev D. Natural stone in the 14th–15th-century secular buildings of the Novgorod Kremlin // *Journal of Cultural Heritage*. 2021. 48. P. 312–318. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.11.014>
22. Barlogi A.A., Alogi N., Cobirzani E., Mosonyi E.R. (2016). Analysis of limestones from heritage buildings as damage diagnostics. // *Romanian Reports in Physics*. 2016. V. 68, № 1. P. 353–361.
23. Dreesen R., Duser M. Historical building stones in the province of Limburg (NE Belgium): role of petrography in provenance and durability assessment // *Materials Characterization*. 2004. № 53. P. 273–287.
24. Gonzalez-Fernandez B., Alonso F.J., Valdeyn L., Pando L. Upper Cretaceous Limestones as Stone Resources for the Monuments of Oviedo (Asturias, NW of Spain): Petrographic Variability and Stratigraphic Origin. // *Geoheritage*. 2022. P. 14–30. <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00672-1>
25. Limestone in the built environment — present-day challenges for the preservation of the past society. London: Special Publications by editor Pankhust B.T. 2010. № 331. 252 p. <https://doi.org/10.1144/SP331>
26. Winkler E.M. Stone: properties, durability in man’s environment New York: Springer-Verlag. 1973. 230 p.

About the Building Stone of the Pskov Lands in the Middle Ages

M.G. Tsinkoburova*, M.L. Baranovskaya

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University

**E-mail: maschek@mail.ru*

Received 07.02.2025

Revised 19.07.2025

Accepted 27.07.2025

The authors studied the lithological and facies features of Upper Devonian carbonate rocks developed in the vicinity of the cities Pskov and Izborsk and compiled a list of criteria that allow macroscopic diagnostics of limestone differences in the objects of historical and cultural heritage of Pskov and Pskov lands. The nature of the building material used in the objects of defense architecture of the medieval period of the region is analyzed. The analysis has demonstrated the interrelation of the features of the geological structure and building materials of fortifications of the Pskov lands. The lack of stone building materials partly determined the construction of exclusively wooden and earthen-wooden fortresses in the south of the region (the area of development of carbonate, terrigenous-carbonate and terrigenous rocks of the Middle and Upper Frasnian, overlain by a thick layer of the Pleistocene sediments). The construction of the northern fortresses (Izborsk and Pskov), located in the area of the development of carbonate rocks of the Lower Frasnian, exposed in the banks of the lower reaches of the Velikaya River and its tributaries, was in stone. The accelerated construction time of the Pskov fortress and the development of rocks of the same stratigraphic level in the immediate vicinity of ancient Pskov led to a lack of criteria for choosing the stone material used. The Gdov fortress was the first and only defense of Pskov's lands from the north, which was due to the emergency construction of the Gdov fortress in stone, although the geological situation in Gdov (the area of development of terrigenous rocks of Eifelian and Givetian, in most of the territory overlain by the Quaternary deposits) also did not favor the widespread development of stone building materials. The nature of the boulder material found in the surviving fragment of the Gdov fortress wall suggests that terrigenous material from moraine deposits was actively used for construction.

Keywords: Main Devonian Field, Upper Devonian, Lower Frasnian, building stone, facing stone, fortresses of medieval Pskov

References

1. Antipov I.V., Skobkareva D.S. *Arhitektura Pskova XIV–XVI v.: osnovnye itogi i perspektivy izucheniya // Drevnyaya Rus'. Voprosy medievistiki*. 2020. № 2. S. 172–188.
<https://doi.org/10.25986/IRI.2020.80.2.0013>
2. Voronin N.N. *U istokov russkogo nacional'nogo zodchestva*. M.: Ezhegodnik Zhivopis'. Arhitektura, 1952. S. 257–316.
3. *Geologiya chetvertichnyh otlozhenij Severo-Zapada Evropejskoj chasti SSSR*. Pod red. N.I. Apuhtina i I.I. Krasnova. L.: Nedra, 1967. 344 s.
4. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj federacii. Masshtab 1 : 1000000 (tret'e pokolenie). Seriya Central'no-Evropejskaya. List O-35 — Pskov (N-35), O-36 — Sankt-Peterburg* (2012). Ob"yasnitel'naya zapiska SPb: VSEGEI, 2012. 510 s.
5. Zvyaginets L.I., Viktorov A.M. *Belyj kamen' Podmoskov'ya*. M.: Nedra, 1989. 116 s.

6. Ivanov A. O. Kompleksy pozvonochnyh i zony verhnego zhiveta i nizhnego fra-na Vostochno-Evropejskoj platformy i Urala // Vestnik geonauk. 2023. № 1(337). S. 23–29. <https://doi.org/10.19110/geov.2023.1.3>. EDN: YTCRMR.
7. Kirpichnikov A. Krepost' drevnego Gdova. . N. SPb.: Vesti, 2000. 56 s.
8. Klejmenov V.I. K voprosu o voennoj organizacii Pskovskoj zemli v XIV–XV v.: kontingenty iz volosti i gorodovye polki prigorodov Pskova // Paleorossiya. Drevnyaya Rus': vo vremeni, lichnosti, ideyah. 2023. T. 21, № 1. S. 61–76. https://doi.org/10.47132/2618-9674_2023_1_61
9. Kostochkin V.V. Kreml' drevnego Gdova 9iz istorii pskovskogo oboronnoego zodchestva) // Materialy i issledovaniya po arheologii SSSR. 1958. 1958. № 77. S. 67–100.
10. Kostochkin V.V. Russkoe oboronnoe zodchestvo konca XIII — nachala XVI vekov. M.: Izd-vo AN SSSR, 1962. 287 s.
11. Labutina I.K. Istoricheskaya topografiya Pskova v XIV–XV vv. M.: Nauka, 2011. 342 s.
12. Rappoport P.A. Ocherki po istorii voennogo zodchestva Severo-Vostochnoj i Severo-Zapadnoj Rusi X–XV vv. M.-L.: Izd-vo Akad. nauk SSSR, Leningrad. otd-e, 1961. 242 s.
13. Rejtlinger E.A. Belyj kamen' postroek drevnej Rusi // Priroda. 1964. № 4. S. 79–82.
14. Sedov V.V. Izborsk v rannem Srednevekov'e. M.: Nauka, 2007. 413 s.
15. Sorokin V.S. Etapy razvitiya severo-zapada Russkoj platformy vo franskom veke. Riga: Zinatne, 1978. 282 s.
16. Spegal'skij Yu.P. Kamennoe zodchestvo Pskova. L.: Strojizdat, 1976. 120 s.
17. Tatarnikov O.M. Rel'ef i paleogeografiya Pskovskoj oblasti. Pskov: PGPU, 2007. 127 s.
18. Harlashov B.N. Pogosty i guby Pskovskoj zemli v XIV–XVI vv. (K voprosu ob administrativno-territorial'nom delenii) // Vestnik Pskovskogo Vol'nogo universiteta. 1995. T. 2, vyp. 4–6. S. 76.
19. Cvylev S.A. "Samorodnyj kamen'" v zodchestve drevnego Pskova. Pskov, GBUK "Pskovskaya oblastnaya universal'naya nauchnaya biblioteka", 2015. 60 s.
20. Tsinkoburova M.G., Norova L.P., Smirnov D.M., Baranovskaya M.L. Loss of geoheritage objects in the Main Devonian Field // Gornyj zhurnal. 2024. № 9. S. 90–96. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.09.14>
21. Antipov I., Antonov A., Jolshin D., Savchenok A., Tarasenko A., Yakovlev D. Natural stone in the 14th–15th-century secular buildings of the Novgorod Kremlin // Journal of Cultural Heritage. 2021. 48. P. 312–318. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.11.014>
22. Barlogi A.A., Alogi N., Cobirzani E., Mosonyi E.R. (2016). Analysis of limestones from heritage buildings as damage diagnostics. // Romanian Reports in Physics. 2016. V. 68, № 1. P. 353–361.
23. Dreesen R., Duser M. Historical building stones in the province of Limburg (NE Belgium): role of petrography in provenance and durability assessment. // Materials Characterization. 2004. № 53. P. 273–287.
24. Gonzalez-Fernandez B., Alonso F.J., Valdeyn L., Pando L. Upper cretaceous limestones as stone resources for the monuments of Oviedo (Asturias, NW of Spain): Petrographic Variability and Stratigraphic Origin. // Geoheritage. 2022. P. 14–30. <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00672-1>
25. Limestone in the built environment — present-day challenges for the preservation of the past society. London: Special Publications by editor Pankhurst B.T. 2010. № 331. 252 p. <https://doi.org/10.1144/SP331>
26. Winkler E.M. Stone: properties, durability in man's environment New York: Springer-Verlag. 1973. 230 p.

УДК 551.468.1 (571.66)

НАВОДНЕНИЕ НА ПОБЕРЕЖЬЕ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА 14–15 ДЕКАБРЯ 2023 г.

© 2025 г. Ю.В. Любицкий*, А.Н. Вражжин

*Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт,
Владивосток, Россия***E-mail: yuvadlub@gmail.com*

Поступила в редакцию 30.09.2024 г.

После доработки 16.06.2025 г.

Принята к публикации 28.07.2025 г.

Анализируются причины, условия и особенности формирования морского наводнения на побережье Камчатки в декабре 2023 г., возникшего в результате выхода на акваторию юго-западной части Берингова моря глубокого циклона. Приводятся сведения о затоплении десяти береговых населенных пунктов. Для исследования динамики процесса применялись численное гидродинамическое моделирование пространственно-временных изменений характеристик ветрового волнения (модель WAVEWATCH III), анемобарического нагона (двумерные модели совместной динамики воды и льда), методы расчета прилива и наката (метод Мазе). Установлено, что затопление населенных пунктов произошло в результате близости формирования во времени высокой полной воды прилива, максимальных значений анемобарического нагона и наката. При этом высота приливного уровня моря была близка к ее максимальному значению, возможному по астрономическим условиям. Показано, что все рассматриваемые факторы вносят значимый вклад в суммарный подъем уровня моря в береговых пунктах, что приводит к необходимости их учета в методах прогноза морских наводнений на побережье Камчатки. В ближайшие годы возможно увеличение числа и интенсивности наводнений в исследуемом районе вследствие происходящих климатических изменений и опускания побережья в результате современных вертикальных движений земной коры.

Ключевые слова: наводнение, побережье Камчатки, анемобарический нагон, прилив, накат, подъем уровня воды, численное моделирование

DOI: 10.31857/S0869607125030115, EDN: LUADHQ

Введение

На побережье многих районов Мирового океана во время прохождения над водной поверхностью ураганов, тайфунов, глубоких циклонов возникают наводнения, приводящие к затоплению населенных пунктов, транспортных коммуникаций, сельскохозяйственных угодий. Эти наводнения часто вызывают гибель людей, разрушения и экономический ущерб, сопоставимые, а иногда превышающие негативные последствия других природных катастроф, например, землетрясений и цунами [10, 25, 26, 35].

Затопление береговых объектов во время наводнений обычно происходит в результате совместного воздействия прилива, повышения уровня моря, вызванного ветром и падением атмосферного давления (анемобарический нагон), волнового нагона и волнового заплеска после обрушения волн.

Хорошо известны морские наводнения в Санкт-Петербурге [7, 13, 16], для предотвращения которых построен комплекс защитных сооружений [17]. Катастро-

фические наводнения неоднократно происходили на берегах Белого и Баренцева морей [6], Азовского моря [18], на севере Каспийского моря [14, 15].

Морские наводнения возникают практически на всем российском побережье Японского, Охотского и Берингова морей. Наиболее уязвимыми объектами являются южная часть о. Сахалин [4, 20], северо-западное побережье и Сахалинский залив Охотского моря [5, 9], Анадырский залив Берингова моря [2], побережье полуострова Камчатка. Последствия этих наводнений не столь катастрофичны по сравнению со многими другими районами Мирового океана. В основном это является следствием недостаточного хозяйственного освоения берегов проблемных районов. Наиболее крупные береговые населенные пункты: Владивосток, Петропавловск-Камчатский, Магадан — расположены на возвышенных берегах, и морские наводнения оказывают негативное влияние только на сооружения и коммуникации, размещенные непосредственно в пределах узкой береговой зоны.

Тем не менее морские наводнения на побережье дальневосточных морей представляют угрозу населению и приводят к существенным материальным убыткам. Поэтому исследование природы и особенностей их формирования является актуальной задачей, решение которой необходимо для разработки объективных и научно обоснованных методов прогноза этих явлений.

В настоящей статье рассмотрены условия и причины экстраординарного наводнения на побережье полуострова Камчатка (рис. 1), возникшего в середине декабря 2023 г.

Во время наводнения происходило подтопление населенных пунктов Апука, Ильпырский, Вывенка, Тымлат, Оссора, Корф, Ивашка (северо-восточное побережье Камчатки), Крутогоровский, Устьевое, Октябрьский (юго-западное побережье Камчатки) и расположенных вблизи них объектов¹ (см. рис. 1).

В Вывенке вышла из строя система электроснабжения², вода вплотную подошла к жилым домам. Были подтоплены придомовые территории и хозяйственные постройки. Затопило несколько улиц в Оссоре, Ильпырском и Ивашке³ (рис. 2). В Корфе под водой оказалась взлетно-посадочная полоса аэропорта. Залит склад ГСМ, повреждено здание аэропорта, вышло из строя светосигнальное оборудование. В Тымлате затопило рыбокомбинат⁴ (см. рис. 2). Рассматривалась необходимость эвакуации работников организации. В Апуке морская вода переливала косу, на которой расположено село, в районе школы-интерната и детского сада.

Залита водой и размыта автодорога, проходящая вдоль берега Охотского моря между м. Левашова и поселком Октябрьский, в результате поселок оказался в транспортной блокаде⁵. Движение всех видов транспорта по дороге было закрыто до 20 декабря. В Устьевом происходило переливание береговой косы морской водой вблизи складов и электростанции. В Крутогоровском вода вышла на улицы⁶.

¹ <https://news.ru/regions/beringovo-i-ohotskoe-morya-vyshli-iz-beregov-i-nachali-zataplivat-kamchatku/> (дата обращения: 13.03.2025).

² <https://www.ntv.ru/novosti/2803916/> (дата обращения: 13.03.2025).

³ <https://www.dv.kp.ru/online/news/5588993/> (дата обращения: 13.03.2025).

⁴ <https://www.mk.ru/incident/2023/12/18/v-seti-poyavilos-video-zatoplenno-go-morskoy-vodoy-rybnogo-kombinata-na-kamchatke.html> (дата обращения: 13.03.2025).

⁵ <https://rg.ru/2023/12/15/reg-dfo/na-kamchatke-iz-za-shtorma-podtopilo-neskolko-pribrezhnyh-poselkov.html> (дата обращения: 13.03.2025).

⁶ <https://sapa.media/shtorm-na-kamchatke-vyzval-navodnenie-v-chetyreh-naselennyh-punktah-20231215/> (дата обращения: 13.03.2025).

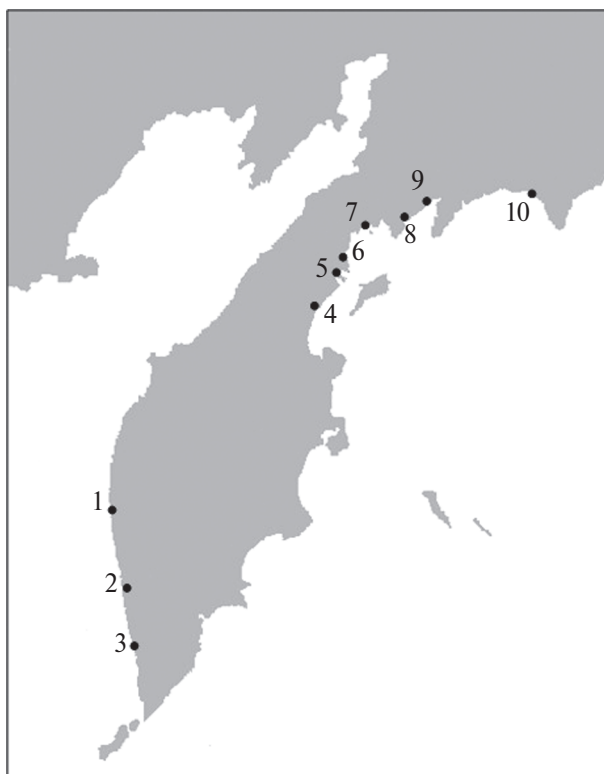


Рис. 1. Схема расположения населенных пунктов, в которых возникло наводнение. 1 — Крутогоровский, 2 — Устьевое, 3 — Октябрьский, 4 — Ивашка, 5 — Оссора, 6 — Тымлат, 7 — Ильпирский, 8 — Вывенка, 9 — Корф, 10 — Апука.

Fig. 1. Scheme of the location of the settlements where the flood occurred. 1 — Krutogorovsky, 2 — Ustyevoe, 3 — Oktyabrsky, 4 — Ivashka, 5 — Ossora, 6 — Tymlat, 7 — Ilpyrsky, 8 — Vyvenka, 9 — Korf, 10 — Apuka.

Материалы и методы

Сведения о затоплении населенных пунктов, береговых сооружений и объектов получены из оперативных сообщений гидрометеорологических станций и постов Росгидромета, материалов, опубликованных в средствах массовой информации, включая Интернет.

Характеристика синоптических условий, вызвавших наводнение, составлена на основе карт приземного анализа Японского метеорологического агентства (ЈМА), публикуемых в Интернете⁷ с дискретностью 6 часов.

Данных гидрометеорологических наблюдений, выполняемых в исследуемых районах на сети Росгидромета, недостаточно для детального исследования процессов возникновения и развития рассматриваемого явления. Во-первых, не во всех затопленных пунктах эти наблюдения выполняются. Во-вторых, наблюдения над волнением на береговых станциях и постах осуществляются визуально, следовательно, имеют недостаточно высокую точность. В-третьих, измерения уровня моря

⁷ <http://www.imocwx.com> (дата обращения: 13.03.2025).

производятся только на двух автоматизированных постах (АП) службы цунами Росгидромета — в поселке Тиличики, расположенном вблизи Корфа, и в Оссоре (см. рис. 1). К сожалению, АП в Оссоре вышел из строя в начале наводнения (в 13 часов 14 декабря), что не позволило зарегистрировать максимальный подъем уровня моря, в Тиличиках датчик измерений уровня моря работал неустойчиво, что привело к значительным пропускам в наблюдениях (9–14 часов 13 декабря, 7–9 часов 14 декабря).

Перечисленные причины привели к необходимости расчета характеристик волнения и уровня моря с помощью численных гидродинамических моделей, разработанных или адаптированных к дальневосточному региону в ФГБУ «ДВНИГМИ». Характеристики ветрового волнения на глубокой воде вычислялись с помощью дискретной модели WAVEWATCH III, в которой решается уравнение баланса энергии в спектральном виде [1, 34]. Нагонное повышение уровня моря под действием ветра и понижения приземного атмосферного давления (анемобарический нагон)



Рис. 2. Затопление береговых объектов во время наводнения. 1 — рыбокомбинат в Тымлате¹, 2 — Ильпирский².

Fig. 2. Flooding of coastal objects during a flood. 1 — fish processing plant in Tymlat, 2 — Ilpyrsky.

¹ <https://kam24.ru/news/main/20231218/102553.html#.KE5RU38a.dpuf> (дата обращения: 10.07.2024).

² <https://kamchatinfo.com/news/elements/detail/60167> (дата обращения: 10.07.2024).

рассчитывалось с помощью моделей совместной динамики воды и льда [11, 12]. Верификация численных моделей по данным наблюдений и опыт их эксплуатации в оперативной работе учреждений Росгидромета свидетельствуют о достаточно высокой точности получаемых с их помощью результатов.

Существенное влияние на затопление береговых объектов во время штормов оказывают эффекты, вызванные ветровым волнением (волновой нагон и волновой заплеск). Населенные пункты, которые затапливались во время наводнения в декабре 2023 г., расположены на песчано-галечных косах, в них практически отсутствуют гидротехнические сооружения, на которых происходит разрушение волн. Это позволяет ограничиться в расчетах волнового нагона и волнового заплеска методами, разработанными для пологих форм рельефа. Физические механизмы формирования данных эффектов различны. Волновой нагон возникает внутри зоны обрушения волн в области прибоя и представляет собой повышение среднего уровня моря вблизи берега в результате переноса масс воды и трансформации кинетической энергии волн в потенциальную энергию [8, 19, 28, 29]. Волновой заплеск имеет динамический характер — это возвратно-поступательный поток воды, набегающий на пологий берег, вызванный обрушением волн.

Проблема расчета характеристик волнового нагона и волнового заплеска является одной из самых сложных и малоизученных в динамике моря. Методы, разработанные для решения данной проблемы многочисленны и разнообразны [22, 30, 32, 33]. До настоящего времени не существует единого мнения, позволяющего отдать предпочтение одному из них. Так как целью статьи является исследование условий формирования конкретного опасного природного явления, а не сравнение и оценка качества различных методов вычисления волновых эффектов, в расчетах использовался метод Мазе, опубликованный в Руководстве по прибрежной инженерии США (Coastal Engineering Manual (ЕМ 1110-2-1100) [23]), широко применяемый в мировой практике.

Метод Мазе [23] предусматривает вычисление максимальной величины наката (run-up) — суммарного (включающего две составляющие — волновой нагон и волновой заплеск) подъема уровня воды относительно уровня моря, сформированного приливом и анемобарическим нагоном. В расчетах используются значительная (13% обеспеченности) высота волн (H_0), средняя длина (L_0) и период (T_0) волн на глубокой воде (в ближайшем к каждому береговому пункту узле сетки модели WAVEWATCH III); средний уклон рельефа местности между приблизительной глубиной начала разрушения волн, соответствующей изобате 10 м, и верхней границей берегового пляжа (β), полученный по крупномасштабным навигационным и топографическим картам. Вычисления выполняются в соответствии со следующим алгоритмом [23]:

— рассчитывается параметр подобия прибоя (число Иррибарена)

$$\xi = \operatorname{tg} \beta \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-1/2}, \quad (1)$$

— определяется максимальная величина наката

$$R_{\max} = 2.32 H_0 \xi^{0.77}. \quad (2)$$

Приливные колебания уровня моря в береговых пунктах рассчитывались по гармоническим постоянным восьми основных волн прилива (M2, S2, N2, K2, K1, O1,

Q1, P1), полученным по историческим материалам наблюдений в этих пунктах с помощью метода наименьших квадратов [24]. Используемый алгоритм включает расчет по дате начала рассматриваемого интервала времени комплекса астрономических параметров (средней долготы Солнца, средней долготы перигея лунной орбиты и др.), вычисление по этим параметрам астрономической части амплитуды (редукционного множителя) и фазы каждой приливной волны, расчет суммарного прилива с учетом угловых скоростей приливных волн. Для оценки максимальных возможных по астрономическим причинам высот прилива над средним уровнем моря предвычисление прилива выполнялось для периода продолжительностью 20 лет (2006—2025), при этом значения астрономических параметров пересчитывались каждые пять дней.

Результаты

Синоптические условия формирования наводнения

Наводнение было вызвано глубоким циклоном, возникшим 11 декабря над Желтым морем. Приземное атмосферное давление в его центре P_a в это время составляло 1020 гПа (рис. 3). Углубляясь ($P_a = 1008$ гПа), в 12 часов 12 декабря циклон пересек Японские острова и вышел на акваторию Тихого океана. В дальнейшем он двигался в северо-восточном направлении вдоль побережья Японии и Курильских островов (см. рис. 3).

В 12 часов 13 декабря циклон ($P_a = 990$ гПа) располагался вблизи южной оконечности полуострова Камчатка, после чего изменил направление движения — он начал перемещаться на север, продолжая углубляться. В 00 часов 14 декабря P_a составило 972 гПа (см. рис. 3), на северо-восточном побережье Камчатки скорость ветра восточного направления достигла 8–12 м/с, на юго-западном побережье полуострова ветер скоростью 3–5 м/с имел СЗ направление.

В 12 часов 14 декабря циклон вышел на акваторию юго-западной части Берингова моря и достиг максимального развития ($P_a = 952$ гПа). Это привело к резкому усилению ветра: скорость ветра восточного направления на северо-восточном побережье Камчатки достигла 25 м/с, на юго-западном побережье скорость ветра ЗСЗ—СЗ направлений при этом составляла 14–17 м/с.

Затем циклон начал перемещаться в западном направлении и пересек полуостров Камчатка (см. рис. 3). Направление и скорость ветра при этом в районах наводнения существенно не изменились. С 00 часов 15 декабря положение центра циклона практически сохранялось в течение нескольких суток, но циклон начал быстро заполняться. Например, в 00 часов 17 декабря P_a достигло значения 1002 гПа, скорость ветра в районах, где произошло наводнение, не превышала 3–7 м/с.

Факторы, вызвавшие наводнение

Прилив

В соответствии с классификацией А.И. Дуванина [3], приливы на юго-западном и северо-восточном побережьях Камчатки имеют неправильный полусуточный характер (табл. 1). Только в Апуке и Корфе они являются неправильными суточными (см. табл. 1), что объясняется искажением приливного хода уровня моря в этих пунктах по сравнению с открытым побережьем. В Апуке наблюдения, использованные для вычисления гармонических постоянных волн прилива, выполнялись в устье реки, в Корфе — в узкой протяженной мелководной бухте Скрытная.



Рис. 3. Траектория движения циклона, вызвавшего наводнение. Маркерами отмечено положение центра циклона. В подписях указано камчатское время (+12 часов ВСВ) и давление в центре циклона (гПа).

Fig. 3. Track of the cyclone that caused the flood. Markers show cyclone center positions. Kamchatka time (+12 UTC) and pressure in the center of cyclone (hPa) are in the labels.

Таблица 1. Характеристики прилива в береговых пунктах

Table 1. Characteristics of the tide at coastal stations

Пункт	R	Максимальная высота прилива над средним уровнем моря, см	
		во время наводнения	возможная по астрономическим причинам
Апука	2.01	71	80
Ильпырский	1.48	59	84
Корф	2.17	57	64
Оссора	1.53	85	94
Крутогоровский	1.82	219	229
Устьевое	1.98	221	228
Октябрьский	1.96	141	146

Примечание. $R = (H_{K1} + H_{O1})/H_{M2}$ (критерий А.И. Дуванина), где H_{K1} , H_{O1} , H_{M2} — амплитуды соответствующих волн прилива. При $0.5 < R \leq 2.0$ прилив является неправильным полусуточным, при $2.0 < R \leq 4.0$ — неправильным суточным.

Наибольшей величины неправильные полусуточные приливы достигают после полнолуния или новолуния, когда действие приливообразующих сил Луны и Солнца совпадает (сизигийные приливы). Наводнение на побережье Камчатки возникло во время сизигийных приливов (новолуние было 13 декабря).

Значительное влияние на величину полусуточных приливов оказывает склонение Луны (тропическое неравенство) из-за которого наибольшие по величине приливы в течение года формируются летом и зимой. Следует также отметить, что 2023 г. близок к максимуму прилива с периодом 18,61 года, вызванного наклоном орбиты Луны к плоскости эклиптики [27, 31].

Совпадение во времени перечисленных эффектов привело к формированию на побережье Камчатки в период наводнения максимальных высот прилива, близких к предельным высотам, возможным по астрономическим условиям (см. табл. 1).

Нагонное повышение уровня моря, вызванное действием ветра и изменениями приземного атмосферного давления

Сильный ветер и падение приземного атмосферного давления 14–15 декабря вызвали подъем уровня моря в исследуемых районах (рис. 4).

В пунктах, расположенных на побережье Карагинского залива (Ильпырский, Оссора, Ивашка), анемобарический нагон достиг наибольшей величины (79–82 см) практически синхронно (в 15–18 часов 14 декабря). Эти значения близки к оценкам максимумов анемобарических нагонов, возможных в данном районе, рассчитанных с помощью численного моделирования (90–100 см). В Корфе и Апуке максимальная величина анемобарического нагона сформировалась на несколько (3–7) часов позже и равна 44–47 см (в Тиличихах по данным наблюдений АП службы цунами она составила 48 см), что заметно меньше ее возможных значений (60–80 см). Вероятно, причиной данного эффекта являются особенности полей ветра над морем во время прохождения циклона.

На юго-западном побережье Камчатки наибольшие значения анемобарического нагона сформировались в 01–10 часов 15 декабря. Нагон не был экстраординарным — величина его максимума в береговых пунктах составила 26–36 см (см. рис. 4). Более значительные анемобарические нагоны в этом районе возникают регулярно, иногда несколько раз в год. Например, максимальные величины нагонов, рассчитанные по численной модели для периода 2013–2022 гг., составляют в Крутогоровском — 86 см, в Устьевом — 75 см, в Октябрьском — 60 см. Данная особенность объясняется характером синоптического процесса. После выхода циклона на западное побережье Камчатки циклон начал заполняться, что привело к уменьшению скорости ветра и повышению приземного атмосферного давления.

Интересно, что 18 декабря возник новый анемобарический нагон, вызванный циклоном, сформировавшимся в районе Корейского полуострова 15 декабря, хорошо выраженный на охотоморском побережье Камчатки и менее заметный на берегах Берингова моря. При этом в Октябрьском величина этого нагона была больше, чем во время наводнения. Тем не менее затопления поселков, расположенных на побережье Камчатки, во время данной штормовой ситуации не было, так как максимум анемобарического нагона и высокая полная вода прилива сформировались в разное время.

Накат

Значительное ветровое волнение возникло вначале в открытой части Берингова моря — максимальная высота волн на ее акватории достигала 9 м. Вблизи северо-восточного побережья Камчатки высота волн составляла 5–6 м (рис. 5). По мере продвижения циклона на север интенсивное волнение сформировалось также в северо-восточной части Охотского моря. Зона наибольших высот волн располагалась на входе в залив Шелихова, у юго-западного побережья Камчатки максимальные высоты волн достигали 6 м (см. рис. 5).

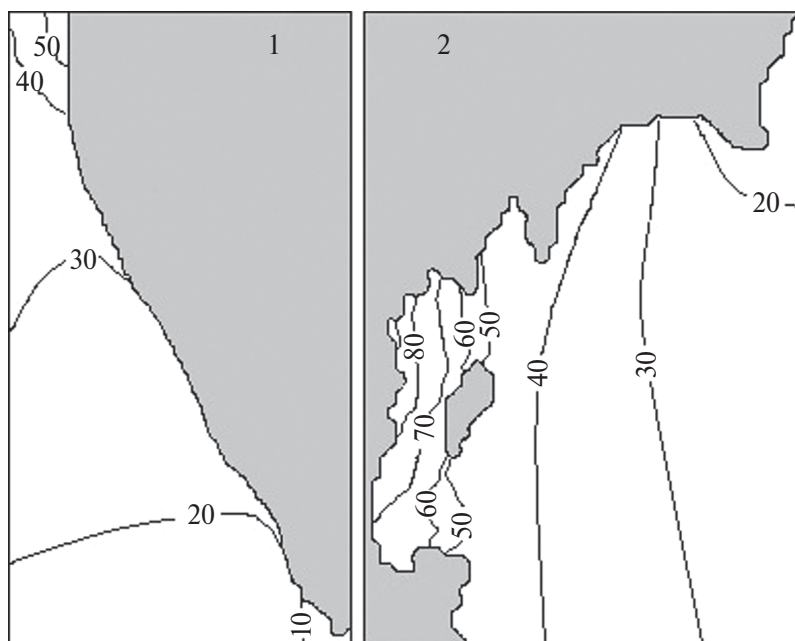


Рис. 4. Максимальные значения анемобарического нагона в районах, прилегающих к юго-западному (1) и северо-восточному (2) побережьям Камчатки во время наводнения, рассчитанные с помощью численного моделирования, см.

Fig. 4. Maximum values of anemobaric surge in areas adjacent to the southwestern (1) and northeastern (2) coasts of Kamchatka during the flood, calculated using numerical modeling, cm.

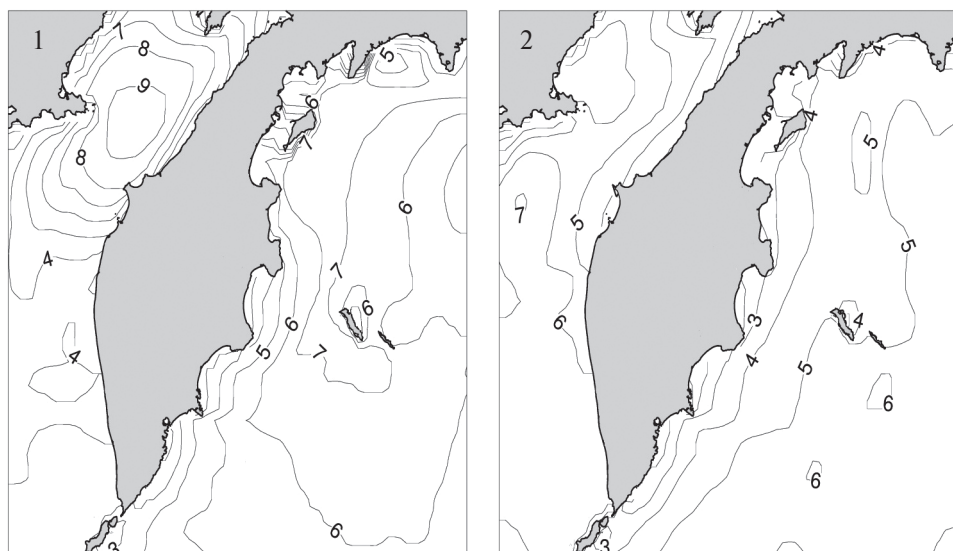


Рис. 5. Высота волн во время наводнения, рассчитанная по численной модели, м. 1 — 18 часов 14 декабря, 2 — 12 часов 15 декабря.

Fig. 5. Wave height during the flood, calculated using the numerical model, m. 1 — 18 hours on December 14, 2 — 12 hours on December 15.

На северо-восточном побережье Камчатки максимальные значения наката возникли в разное время: в Оссоре — в 12 часов 14 декабря, в Корфе, Ильпырском и Ивашке — в 18 часов 14 декабря, в Апуке — в период с 06 до 18 часов 15 декабря (рис. 6). В пунктах, расположенных на юго-западном побережье Камчатки, накат достиг максимальных значений синхронно — в 12 часов 15 декабря (см. рис. 6).

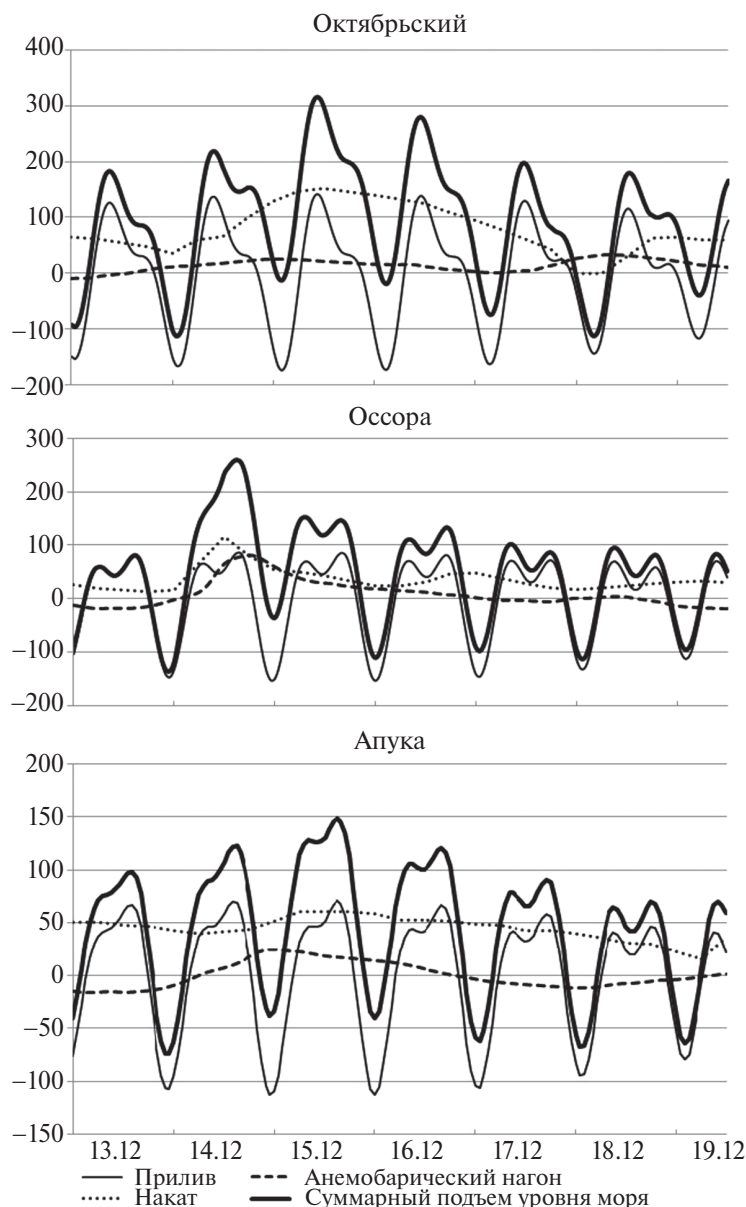


Рис. 6. Изменения суммарного подъема уровня воды и его составляющих 13–19 декабря 2023 г. относительно среднего уровня моря, см.

Fig. 6. Changes in the total water level rise and its components on December 13–19, 2023, relative to the mean sea level, cm.

Рассчитанные характеристики наката в разных береговых пунктах существенно отличаются между собой (табл. 2). Это объясняется двумя причинами. Во-первых, локальными условиями районов расположения этих пунктов, в частности ориентацией береговой черты, особенностями рельефа дна и берега (следует отметить, что величина наката из-за различия морфометрических характеристик может существенно отличаться в точках, расположенных друг от друга даже на расстоянии нескольких десятков метров). Во-вторых, погрешностями используемых в расчетах уклонов пляжа и дна в прибойной зоне — для получения надежных значений этих характеристик необходимы детальные топографические съемки и промеры глубин.

Таблица 2. Максимальные рассчитанные значения суммарного подъема уровня воды и его составляющих во время наводнения относительно среднего уровня моря, см

Table 2. Maximum calculated values of the total rise in water level and its components during a flood relative to the mean sea level, cm

Пункт	Прилив (полная вода)	Анемобари- ческий нагон	Прибли- зительная величина наката	Суммарный подъем уровня воды	
				при совпадении максимумов всех составляющих	при фактических условиях
Апука	71	24	61	156	149
Корф	57	44	130	231	209
Ильпырский	59	79	60	198	197
Оссора	85	82	116	283	260
Ивашка	85	79	250	414	403
Крутогоровский	219	36	365	620	619
Устьевое	221	29	174	424	421
Октябрьский	141	26	152	319	314

Обсуждение

Возможность затопления береговых объектов определяется сочетанием характеристик всех составляющих суммарного подъема уровня воды: прилива, анемобарического нагона и наката. Во многих ситуациях, например, когда анемобарический нагон и вызванные волнением эффекты имеют значительную величину, но они совпадают с малой водой прилива, опасные явления не возникают.

Во время наводнения 14–15 декабря 2023 г. максимальные значения составляющих суммарного подъема уровня воды в абсолютном большинстве пунктов сформировались в близкое время (см. рис. 6). Интервалы времени между высокими полными водами прилива и максимумами наката не превышают четырех часов. Промежутки времени между максимумами анемобарического нагона и высокими полными водами прилива составляют от 0 до 9 часов. При этом, поскольку продолжительность анемобарического нагона составляла несколько суток, отклонения его величины во время высокой полной воды от значения максимума невелики и не превышают 3–13 см.

Отмеченная особенность привела к возникновению значительного суммарного подъема уровня воды (см. табл. 2), который достиг максимума в Корфе, Ильпирском, Оссоре и Ивашке в 15–16 часов 14 декабря, в Крутогоровском, Устьевом и Октябрьском — в 10–12 часов 15 декабря. Полученные результаты хорошо согласуются с зарегистрированными сведениями о процессе затопления береговых объектов.

При синхронном формировании максимумов прилива, анемобарического нагона и наката оценки возможного суммарного подъема уровня воды превысили бы его фактические значения всего на 1–23 см (см. табл. 2). Это подтверждает сделанный ранее вывод, что основной причиной возникновения наводнения является крайне неблагоприятное сочетание вызвавших его факторов. Следует отметить, что все составляющие суммарного подъема уровня воды имеют значимую величину (см. табл. 2), что указывает на необходимость их комплексного учета при расчете и прогнозировании морских наводнений на побережье Камчатки. Заключение о вкладе каждой составляющей в суммарный подъем уровня воды можно сделать лишь после детального анализа других опасных ситуаций, наблюдавшихся в исследуемом районе.

Численное моделирование позволило адекватно воспроизвести аномальный по времени характер наводнения в Апуке (см. рис. 1), возникшего в 15 часов 15 декабря. Причиной этой аномалии являются особенности конфигурации береговой черты — в период наибольшего развития циклона ветер в данном районе был направлен от берега в сторону моря, что привело к некоторому понижению уровня моря.

Можно ожидать, что в ближайшие годы количество и интенсивность морских наводнений на побережье Камчатки будут увеличиваться в результате происходящих климатических изменений [21]. Не исключено, что последствия наводнений будут более разрушительными из-за повышения уровня Мирового океана, а также возможного опускания полуострова Камчатка в результате современных вертикальных движений земной коры (этот процесс прослеживается по данным многолетних наблюдений над уровнем моря в Петропавловске-Камчатском).

Заключение

Наводнение 14–15 декабря 2023 г. на побережье полуострова Камчатка, во время которого были затоплены населенные пункты и береговые объекты, возникло в результате выхода на акваторию юго-западной части Берингова моря глубокого циклона, минимальное приземное атмосферное давление в центре которого достигало значения 952 гПа. Циклон вызвал наводнение в двух районах: на северо-восточном и юго-западном побережьях Камчатки. В первом из этих районов наводнение возникло в основном 14 декабря (максимум в 15–16 часов) (в Апуке — 15 декабря), во втором — 15 декабря (максимум в 10–12 часов).

На побережье Карагинского залива наводнение имело катастрофический характер — рассчитанные значения суммарного подъема уровня воды относительно среднего уровня моря достигали величины 2–4 м (см. табл. 2). Близкие по интенсивности явления, исходя из публикаций в СМИ и информации, полученной от очевидцев, в Ильпирском, Оссоре и Ивашке возникают очень редко и были зарегистрированы только 3–4 ноября 1982 г., 14–15 января 1990 г., 15–16 декабря 2008 г.

На юго-западном побережье Камчатки наводнение не было экстраординарным, что в основном объясняется небольшой величиной анемобарического нагона. Близкие по интенсивности наводнения в данном районе возникают практически ежегодно. Более значительный ущерб причинили явления, например, 11–12 ноября 2013 г.

и 3 декабря 2021 г. (были затоплены поселки Ичинский и Крутогоровский, разрушена дорога в Октябрьском).

Причиной наводнения во всех береговых пунктах было практически синхронное формирование высокой полной воды прилива, максимальных значений анемобарического нагона и наката. При этом высота приливного уровня моря была близка к ее максимальному значению, возможному по астрономическим условиям.

Список литературы

1. Вражкин А.Н. Адаптация моделей WAVEWATCH и SWAN к акваториям дальневосточных морей // Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях / Под ред. Е.С. Нестерова. М., Обнинск: Социальные науки, 2013. С. 129.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том X. Берингово море. вып. 1. Гидрометеорологические условия / Отв. ред. Ф.С. Терзиев. СПб.: Гидрометеоиздат, 1999. 300 с.
3. Дуванин А.И. Волновые движения в море. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 223 с.
4. Зайцев А.И., Пелиновский Е.Н., Доган Д., Ялченир Б., Ялченир А., Куркин А.А., Москвитин А.А. Численное моделирование штормового нагона 15 ноября 2019 года на юге острова Сахалин // Морской гидрофизический журнал. 2020. Том. 36. № 4. С. 396–406.
5. Иванова А.А., Архипкин В.С., Мысленков С.А., Шевченко Г.В. Моделирование штормовых нагонов в прибрежной зоне острова Сахалин // Вестник Московского университета. 2015. Серия 5. География. № 3. С. 41–49.
6. Кораблина А.Д., Кондрин А.Т., Архипкин В.С. Моделирование нагонов в Белом и Баренцевом морях за период 1979–2015 гг. // Тр. Гидрометцентра России. 2017. Вып. 364. С. 144–158.
7. Куликов Е.А., Медведев И.П. Статистика экстремальных сгонно-нагонных явлений в Балтийском море // Океанология. 2017. Т. 57. № 6. С. 858–870.
8. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001. 272 с.
9. Любичский Ю.В., Швецов А.Е. Штормовые нагоны на устьевом взморье Амура // Водные ресурсы. 1994. Т. 21. № 6. С. 609–614.
10. Любичский Ю.В., Шевченко Г.В., Елисов В.В. Штормовые нагоны // Мировой океан. Том I. Геология и тектоника океана. Катастрофические явления в океане / Под ред. Л.И. Лобковского. М.: Научный мир, 2013. С. 559–575.
11. Любичский Ю.В. Метод краткосрочного прогноза уровня моря на побережье и акватории Охотского и Японского морей и на восточном побережье полуострова Камчатка // Тр. ДВНИГМИ. 2017. Вып. 155. С. 32–68.
12. Любичский Ю.В., Романский С.О. Метод и технология краткосрочного прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря // Гидромет. иссл. и прогнозы. 2022. № 1 (383). С. 71–88.
13. Медведев И.П., Куликов Е.А. Экстремальные штормовые нагоны в Финском заливе: частотно-спектральные свойства и влияние низкочастотных колебаний уровня моря // Океанология. 2021. Т. 61. № 4. С. 528–538.
14. Нестеров Е.С., Попов С.К., Лобов А.Л. Статистика и моделирование штормовых нагонов в Северном Каспии // Метеорология и гидрология. 2018. № 10. С. 53–59.
15. Павлова А.В., Архипкин В.С., Мысленков С.А. Внутри- и межгодовая изменчивость сгонно-нагонных колебаний уровня моря в Северном Каспии // Гидромет. иссл. и прогнозы. 2020. № 3 (377). С. 42–57.
16. Померанец К.С. Три века петербургских наводнений. СПб.: Искусство-СПб, 2005. 214 с.

17. Попов С.К., Лобов А.Л. Гидродинамическое моделирование наводнений в Санкт-Петербурге с учетом работающей дамбы // Метеорология и гидрология. 2017. № 4. С. 80–89.
18. Попов С.К., Лобов А.Л. Диагноз и прогноз наводнения в Таганроге по оперативной гидродинамической модели // Тр. Гидрометцентра России. 2016. Вып. 362. С. 92–108.
19. Рабинович А.Б. Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 325 с.
20. Шевченко Г.В. Статистические характеристики штормовых нагонов в южной части о. Сахалин // Изв. РГО. 1997. Т. 129. вып. 3. С. 94–107.
21. Almar R., Ranasinghe R., Bergsma E. W. J., Diaz H., Melet A., Papa F., Vousdoukas M., Athanasiou P., Dada O., Almeida L. P., Kestenare E. A global analysis of extreme coastal water levels with implications for potential coastal overtopping // Nature Communications. 2021. 12, 3775. P. 1–10.
22. Atkinson A., Power H., Moura T., Hammond T., Callaghan D., Baldock T. Assessment of runup predictions by empirical models on non-truncated beaches on the south-east Australian coast // Coastal Engineering. 2017. Vol. 119. P. 15–31.
23. Coastal Engineering Manual. Part II: Coastal Hydrodynamics (EM 1110-2-1100). Washington: Books Express Publishing. 2012. 624 p.
24. Foreman M.G. G. Manual for tidal heights analysis and prediction. Pacific Marine Science Report 77-10. Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Victoria, B.C. 2004. 58 p.
25. Kim C.-K., Lee J. T. Numerical simulations of storm surge disaster due to typhoon Maemi in Korea // Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. 2008. E-10 (406). P. 63–69.
26. Knabb R.D., Rhome J.R., Brown D.P. Hurricane Katrina 23–30 August 2005. Tropical Cyclone Report. National Hurricane Center. Miami: 2005. 43 p.
27. Kowalik Z., Luick J. The oceanography of tides. Fairbanks: 2013. 157 p.
28. Longuet-Higgins M.S. On wave set-up in shoaling water with a rough sea bed // J. Fluid Mech. 2005. Vol. 527. P. 217–234.
29. Mellor G. L. Wave radiation stress // Ocean Dynamics. 2011. Vol. 61. P. 563–568.
30. Newell C., Mullarkey T., Clyne M. Radiation stress due to ocean waves and the resulting currents and set-up/set-down // Ocean Dynamics. 2005. Vol. 55. P. 499–514.
31. Parker B.B. Tidal Analysis and Prediction. NOAA Special Publication NOS CO-OPS 3. Silver Spring, Maryland: 2007. 378 p.
32. Stockdon H.F., Thompson D.M., Plant N.G., Long J.W. Evaluation of wave runup predictions from numerical and parametric models // Coastal Engineering. 2014. 92, P. 1–11.
33. Shand R.D., Shand T.D., McComb P.J., Johnson D.L. Evaluation of empirical predictors of extreme run-up using field data // Proc. 20th Austral. Coast. and Ocean Eng. Conf. 28–30 Sept. 2011. Perth. Australia. 2011. P. 669–675.
34. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 6.07 Technical Note 333 /NOAA/NWS/NCEP/MMAB. 2019. 466 p.
35. Zong Y., Tooley M. J. A historical record of coastal floods in Britain: frequencies and associated storm tracks // Nat. Hazards. 2003. Vol. 29. P. 13–36.

Flood on the Coast of the Kamchatka Peninsula on December 14–15, 2023

Yu.V. Lyubitskiy*, A.N. Vrazhkin

Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok, Russia

**E-mail: yuvadlub@gmail.com*

Received 30.09.2024

Revised 16.06.2025

Accepted 28.07.2025

The causes, conditions and features of the formation of marine flood on the coast of Kamchatka in December 2023, which arose as a result of a deep cyclone entering the waters of the southwestern part of the Bering Sea, are analyzed. Information on the flooding of coastal settlements is provided. To study the dynamics of the process, numerical hydrodynamic modeling of spatio-temporal changes in the characteristics of wind waves (WAVEWATCH III model), anemobaric surge (two-dimensional models of the combined dynamics of water and ice), methods for calculating the tide and run-up (Mase method) were used. It was found that the flooding of settlements occurred as a result of the proximity of the formation in time of higher high water, maximum values of the anemobaric surge and run-up. At the same time, tidal height was close to highest astronomical tide. It is shown that all the factors under consideration make a significant contribution to the total rise in sea level at coastal points, which leads to the need to take them into account in the methods for forecasting marine floods on the coast of Kamchatka. In the coming years, the number and intensity of floods in the study area may increase due to ongoing climate change and coastal subsidence as a result of modern vertical movements of the earth's crust.

Keywords: flood, Kamchatka coast, anemobaric surge, tide, run-up, water level rise, numerical modeling

References

1. Vrazhkin A.N. Rezhim, diaznoz i prognoz vetrovogo volnenija v okeanah i morjah Adaptacija modelej WAVEWATCH i SWAN k akvatorijam dal'nevostochnyh morej. Rezhim, diaznoz i prognoz vetrovogo volnenija v okeanah i morjah / Pod red. E.S. Nesterova. Moskva, Obninsk: Social'nye nauki, 2013. S. 129.
2. Gidrometeorologija i gidrohimija morej. Tom X. Beringovo more. Vyp. 1. Gidrometeorologicheskie uslovija / Otv. red. F.S. Terzieva. Sunkt-Peterburg: Gidrometeoizdat, 1999. 300 s.
3. Duvanin A.I. Volnovye dvizhenija v more. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968. 223 s.
4. Zajcev A.I., Pelinovskij E.N., Dogan D., Jalchenir B., Jalchenir A., Kurkin A.A., Moskvitin A.A. Chislennoe modelirovanie shtormovogo nagona 15 nojabrja 2019 goda na juge ostrova Sahalin // Morskoj gidrofizicheskij zhurnal. 2020. T. 36. № 4. S. 396–406.
5. Ivanova A.A., Arhipkin V.S., Myslenkov S.A., Shevchenko G.V. Modelirovanie shtormovyh nagonov v pribrezhnoj zone ostrova Sahalin // Vest. Mosk. Univ. Ser. 5 Geogr. 2015. № 3. S. 41–49.
6. Korablina A.D., Kondrin A.T., Arhipkin V.S. Modelirovanie nagonov v Belom i Barencevom morjah za period 1979–2015 gg. // Trudy Gidrometcentra Rossii. 2017. № 364. S. 144–158.
7. Kulikov E.A., Medvedev I.P. Statistika jekstremal'nyh sgonno-nagonnyh javlenij v Baltijskom more // Okeanologija. 2017. T. 57. № 6. S. 858–870.
8. Leont'ev I.O. Pribrezhnaya dinamika: volny, techeniya, potoki nanosov. Moskva: GEOS, 2001. 272 s.
9. Lyubitskiy Yu.V., Shvetsov A.E. Shtormovye nagony na ust'evom vzmor'e Amura // Vodnye resursy. 1994. T. 21, № 6. S. 609–614.

10. Lyubitskiy Yu.V., Shevchenko G.V., Elisov V.V. Shtormovye nagony // Mirovoj okean. Tom I. Geologija i tektonika okeana. Katastroficheskie javlenija v okeane / Pod red L.I. Lobkovskogo. Moskva: Nauchnyj mir, 2013. S. 559–575.
11. Lyubitskiy Yu.V. Metod kratkosrochnogo prognoza urovnja morja na poberezh'e i akvatorii Ohotskogo i Japonskogo morej i na vostochnom poberezh'e poluostrova Kamchatka // Trudy DVNIGMI. 2017. № 155. S. 32–68.
12. Lyubitskiy Yu.V., Romanskiy S.O. Metod i tehnologija kratkosrochnogo prognoza izmenenij urovnja morja v jugo-zapadnoj chasti Beringova morja // Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy. 2022. № 1 (383). S. 71–88.
13. Medvedev I.P., Kulikov E.A. Jekstremal'nye shtormovye nagony v Finskom zalive: chastotno-spektral'nye svojstva i vlijanie nizkochastotnyh kolebanij urovnja morja // Okeanologija. 2021. T. 61, № 4. S. 528–538.
14. Nesterov E.S., Popov S.K., Lobov A.L. Statistika i modelirovanie shtormovyh nagonov v Severnom Kaspii // Meteorologija i gidrologija. 2018. № 10. S. 53–59.
15. Pavlova A.V., Arhipkin V.S., Myslenkov S.A. Vnutri- i mezhgodovaja izmenchivost' sgonno-nagonnyh kolebanij urovnja morja v Severnom Kaspii // Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy. 2020. № 3 (377). S. 42–57.
16. Pomeranec K.S. Tri veka peterburgskih navodnenij. Sankt-Peterburg: Iskustvo-Sankt-Peterburg, 2005. 214 s.
17. Popov S.K., Lobov A.L. Gidrodinamicheskoe modelirovanie navodnenij v Sankt-Peterburge s uchetom rabotajushhej damby // Meteorologija i gidrologija. 2017. № 4. S. 80–89.
18. Popov S.K., Lobov A.L. Diagnostika i prognoz navodneniya v Taganroge po operativnoj gidrodinamicheskoj modeli // Trudy Gidrometcentra Rossii. 2016. № 362. S. 92–108.
19. Rabinovich A.B. Dlinnye gravitacionnye volny v okeane: zahvat, rezonans, izluchenie. Sankt-Peterburg: Gidrometeoizdat, 1968. 325 s.
20. Shevchenko G.V. Statisticheskie harakteristiki shtormovyh nagonov v juzhnoj chasti o. Sahalin // Izv. RGO. 1997. T. 129, № 3. S. 94–107.
21. Almar R., Ranasinghe R., Bergsma E. W. J., Diaz H., Melet A., Papa F., Vousedoukas M., Athanasiou P., Dada O., Almeida L. P., Kestenare E. A global analysis of extreme coastal water levels with implications for potential coastal overtopping // Nature Communications. 2021. 12, 3775. P. 1–10.
22. Atkinson A., Power H., Moura T., Hammond T., Callaghan D., Baldock T. Assessment of runup predictions by empirical models on non-truncated beaches on the south-east Australian coast // Coastal Engineering. 2017. V. 119. P. 15–31.
23. Coastal Engineering Manual. Part II: Coastal Hydrodynamics (EM 1110-2-1100). Washington: Books Express Publishing. 2012. 624 p.
24. Foreman M.G.G. Manual for tidal heights analysis and prediction. Pacific Marine Science Report 77-10. Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Victoria, B.C. 2004. 58 p.
25. Kim C.-K., Lee J.T. Numerical simulations of storm surge disaster due to typhoon Maemi in Korea // Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. 2008. E-10 (406). P. 63–69.
26. Knabb R.D., Rhome J.R., Brown D.P. Hurricane Katrina 23–30 August 2005. Tropical Cyclone Report. National Hurricane Center. Miami: 2005. 43 p.
27. Kowalik Z., Luick J. The oceanography of tides. Fairbanks: 2013. 157 p.
28. Longuet-Higgins M.S. On wave set-up in shoaling water with a rough sea bed // J. Fluid Mech. 2005. V. 527. P. 217–234.
29. Mellor G.L. Wave radiation stress // Ocean Dynamics. 2011. V. 61. P. 563–568.
30. Newell C., Mullarkey T., Clyne M. Radiation stress due to ocean waves and the resulting currents and set-up/set-down // Ocean Dynamics. 2005. V. 55. P. 499–514.

-
31. Parker B.B. Tidal Analysis and Prediction. NOAA Special Publication NOS CO-OPS 3. Silver Spring, Maryland: 2007. 378 p.
 32. Stockdon H.F., Thompson D.M., Plant N.G., Long J.W. Evaluation of wave runup predictions from numerical and parametric models // Coastal Engineering. 2014. 92, P. 1–11.
 33. Shand R.D., Shand T.D., McComb P.J., Johnson D.L. Evaluation of empirical predictors of extreme run-up using field data // Proc. 20th Austral. Coast. and Ocean Eng. Conf. 28-30 Sept. 2011. Perth. Australia. 2011. P. 669–675.
 34. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 6.07 Technical Note 333 /NOAA/NWS/NCEP/MMAB. 2019. 466 p.
 35. Zong Y., Tooley M.J. A historical record of coastal floods in Britain: frequencies and associated storm tracks // Nat. Hazards. 2003. V. 29. P. 13–36.

УДК 911.3+338.4

РЕГИОНАЛЬНЫЕ РАЗЛИЧИЯ В НАКОПЛЕНИИ ЗАПАСОВ ПРОИЗВЕДЕННЫХ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОЛОМА В ЭКОНОМИКЕ РОССИИ

© 2025 г. Л.Р. Имангулов

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия**E-mail: linar.imangulov.1999@mail.ru*

Поступила в редакцию 27.02.2025 г.

После доработки 31.07.2025 г.

Принята к публикации 01.08.2025 г.

В статье анализируются региональные различия в накоплении запасов произведенных черных металлов и металлолома в экономике России. Для оценки металлофонда черных металлов российских регионов применен авторский метод, основанный на статистическом изучении региональных особенностей распределения черных металлов в разных отраслях экономической деятельности. Результаты оценки обнаружили региональную вариацию запасов произведенных черных металлов. Значительные запасы черных металлов сконцентрированы в регионах Урала, Поволжья и Центра с развитой промышленностью и высокой численностью населения. Выявлено, что распределение регионов по накоплению лома черных металлов не идентично их распределению в соответствии с запасами произведенных черных металлов. Отклонения обусловлены разными факторами. Например, в металлургических регионах более интенсивное накопление металлолома связано с спецификой производственных процессов в черной металлургии. Результаты проведенного в работе корреляционного анализа подтвердили наличие сильной зависимости между металлофондом черных металлов в 2016 г. и накоплением отходов и лома черных металлов в 2016–2023 гг. Обнаружены группы регионов, для которых корреляционная зависимость между анализируемыми показателями отсутствует по причине особенностей экономического развития территорий и методики расчета показателей. Сопоставление ресурсной базы и масштабов развития ломозаготовительной деятельности в российских регионах позволило выявить несоответствие количества ломозаготовительных организаций ресурсным возможностям территорий, что подчеркивает необходимость дальнейшего анализа развития сферы рециклинга во взаимосвязи с другими факторами.

Ключевые слова: черная металлургия, металлофонд, металлолом, промышленность, дисбаланс в накоплении

DOI: 10.31857/S0869607125030124, EDN: LUBZBB

Введение

Лом и отходы черных металлов являются ценным ресурсом для металлургического комплекса. Использование металлолома в производстве стали позволяет сократить расходы топлива и материалов, а также отходы, что положительно сказывается на многокомпонентной стоимости производства металлов для общества [2]. На этапе низкоуглеродного развития экономики преимущества от его использования в производстве значительно возрастают.

Проблема накопления, сбора и переработки отходов производства и непроизводственной сферы являются актуальной для всех стран мира. Накопление лома и отходов черных металлов зависит от совокупности факторов, в том числе пространственного. Географическая специфика России, выраженная в значительной площади и высокой неоднородности пространств, дополнительно актуализирует важность поиска знаний о пространственной составляющей накопления запасов вторичных ресурсов. Подтверждением этого является конкуренция между металлургическими компаниями за территории с значительным накоплением металлолома [3, 10]. Однако различается ли накопление и сбор металлолома между территориями с разными факторами развития?

Целью данной работы является количественный анализ особенностей накопления лома и отходов черных металлов в регионах России.

Гипотеза исследования заключается в следующем: существует прямая положительная зависимость между металлофондом и накоплением лома и отходов черных металлов в последующие годы в регионе, так как от масштабов эксплуатируемых человеком запасов произведенных металлов зависят объемы металлических отходов. Однако вследствие разнообразия факторов регионального развития в России сила связи между показателями на межрегиональном уровне может различаться.

Теория

В СССР в рамках плановой экономики преобладали исследования технологических аспектов использования металлических вторичных ресурсов в системе производственных процессов металлургии. За рубежом, в США и странах Западной Европы, фокус исследований в условиях капитализма постепенно смещался в экономическую сферу. Исследователей во второй половине XX в. все больше интересовали экономические механизмы функционирования ломозаготовительной деятельности. Среди наиболее распространенных тем исследований — анализ региональных рынков металлолома [14], моделирование и прогнозирование цен на металлолом через равенство спроса и предложения.

В зарубежных исследованиях синтез подходов и идей экономики и экономической географии проявился ранее, что выразилось в учете пространства, как одного из ключевых факторов ценообразования металлолома. Например, все чаще в исследованиях при анализе сферы рециклинга особое внимание уделялось географическому масштабу — [16]. Другим примером является региональная модель рынка металлолома, разработанная в Питтсбурге [13]. Модель способна имитировать ценовые взаимодействия с высокой степенью географической детализации за счет соотношения цен на металлолом между территориями разного масштаба.

За рубежом в рамках капиталистического типа хозяйствования в фокусе исследователей были вопросы потребления вторичных ресурсов. Спрос являлся ведущим фактором при построении различных ценовых моделей [13]. Предложение, то есть металлолом, собираемый и заготавливаемый ломозаготовительными организациями, и тем более ресурсная база часто исследователями игнорировались или же рассматривались как одно из условий [15].

В СССР накопление отходов и лома черных металлов и его детерминанты были, наоборот, в центре многочисленных исследований. Периодические обследования металлофонда черных металлов происходили в стране на государственном уровне наравне с переписями населения. Наиболее полное описание результатов обследования металлофонда СССР представлено в книге Л.Л. Зусмана [5].

Косвенные оценки современного металлофонда России с применением методики досчетов проводились в крупных металлургических научно-исследовательских центрах страны (например, в ЦНИИчермет имени И.П. Бардина). Однако в открытом доступе результаты оценок металлофонда представлены ограничено. Современные отечественные исследования в основном дополняют существующие наработки в части оборота металла в новых экономических условиях [2], либо пытаются адаптировать методику оценки металлофонда для открытых статистических данных [5]. Одним из немногочисленных современных исследований металлофонда черных и цветных металлов России является исследование, проведенное в 2016 г. — [8].

В современных отечественных экономико-географических работах публикации на тему рециклинга черных металлов практически отсутствуют. Даже в советский период индустриализации экономики рециклинг материалов в географических исследованиях рассматривался ограничено, что связано с поздним транзитом идей рециклинга в экономическую географию. Увеличение интереса экономико-географов к этой теме наблюдается в работах классика отечественной географии промышленности А.Т. Хрущева [12].

Если в отношении объема металлофонда черных металлов в мире имеются представления [18, 20], то на региональном уровне такие оценки единичны и часто опираются на результаты инвентаризации металлосодержащих изделий [4, 13]. Вместе с этим пространственная дифференциация металлофонда страны определяет территориальные различия в процессах накопления отходов и лома черных металлов [10]. Это актуализирует важность исследования металлофонда территорий более крупного масштаба в контексте изучения региональных особенностей развития сферы рециклинга.

Материалы и методы

Основными источниками данных стали:

- Результаты оценки объема и отраслевой структуры металлофонда России. Источник — оценки ЦНИИ Черной металлургии им. Бардина, экспертные оценки, результаты анализа маркетингового агентства MegaResearch [8].

- База данных социально-экономических показателей регионов России (наличие основных фондов по производственным и непроизводственным видам экономической деятельности, среднегодовая численность населения, объем отгруженных товаров собственного производства металлоемких отраслей).

- Данные об образовании лома и отходов черных металлов по регионам России (Источник — [11]).

- База данных системы профессионального анализа рынков и компаний “СПАРК-Интерфакс”, в которой в том числе содержится информация о количестве ломозаготовительных организаций по регионам.

- Результаты дешифрирования спутниковых изображений, размещенных на платформе “Google Планета Земля”, на предмет наличия площадок (металлобаз), на которых происходит аккумуляция и переработка вторичных металлических ресурсов.

В связи с невозможностью оценки объема металлофонда территорий более крупного масштаба существующими методами (табл. 1) в исследовании для оценки металлофонда черных металлов регионов используется авторский метод оценки.

Таблица 1. Методы оценки металлофонда; составлено автором**Table 1.** Methods of metal stock assessment; compiled by the author

Подходы к оценке металлофонда		Описание	Преимущества	Недостатки
отечественные	Инвентаризационный	Инвентаризация фондов и средств производства хозяйства на наличие и содержание металла	Высокая точность и достоверность оценки, полимасштабность	Сложности проведения, дороговизна
	Ценностной	Оценка с использованием статистики отраслевой структуры основных и оборотных фондов хозяйства и их металлоемкости	Низкие трудозатраты, полимасштабность	Недоучет ценового фактора (инфляции)
	Металлоинвестиционный	Суммирование данных производства металлов и торговли в течение 50–100 лет	Оперирование натуральными величинами, доступность данных, наличие динамических рядов данных	Страновой уровень оценки
зарубежные	“Нисходящий”	Вычисление совокупной разницы между притоком и оттоком металлов в течение 50–100 лет	Наличие динамических рядов данных	Дефицит данных, страновой уровень оценки
	“Восходящий”	Оценка с использованием данных о структуре металлоемкой продукции и ее металлоемкости	Высокая точность оценки, полимасштабность	Дефицит данных о структуре продукции и ее металлоемкости

Авторский метод предполагает оценку металлофонда региона на основе распределения объема национального металлофонда черных металлов между регионами на основе системы показателей, характеризующих региональные диспропорции в накоплении черных металлов в разных сферах экономической деятельности:

$$M_r = X_1 \times A + X_2 \times M + X_3 \times I + X_4 \times E + X_5 \times T + X_6 \times C + X_7 \times Tr + X_8 \times Ed + X_9 \times H + X_{10} \times G + X_{11} \times Ho + X_{12} \times K + X_{13} \times MP + X_{14} \times P,$$

где: M_r – металлофонд черных металлов региона, млн т; X_n – накопленные запасы черных металлов, сконцентрированные в разных сферах национальной экономики, млн т [8]; A, M, I, E, T, C, Tr – доля региона в основных фондах производственной сферы страны: в сельском хозяйстве, добыче, обрабатывающей промышленности, электроэнергетике, транспорте и связи, строительстве и торговли соответственно, %; Ed, H, G, Ho, K – доля региона в основных фондах непроизводственной сферы страны: в образовании, здравоохранении, государственном управлении и обеспечении безопасности, жилищном комплексе и коммунальном хозяйстве, %; MP – доля региона в объеме произведенной металлоемкой продукции в стране, %; P – доля региона в общем населении страны, %.

Оценка металлофонда черных металлов регионов проводилась на 2016 г. в целях минимизации искажений показателя в связи с трансформацией отраслевой структуры национального металлофонда в последующие годы.

Оценка запасов произведенных черных металлов регионов проводилась для 85 субъектов РФ. Из анализа исключены новые регионы, вошедшие в состав страны по итогам референдумов в 2022 г., в связи с отсутствием по ним данных за анализируемый период.

Для определения наличия зависимости между величиной металлофонда черных металлов в 2016 г. и накоплением металлолома в 2016–2023 гг.¹ был проведен корреляционный анализ Спирмена (причина — ненормальное распределение значений анализируемых показателей). Для изучения зависимости между двумя переменными был проведен парный регрессионный анализ. Для проведения перечисленных выше видов анализа данных была использована программа общего назначения Microsoft Excel.

Представленный в работе картографический материал был выполнен в картографической и аналитической системе «ArcGIS».

Результаты исследования

Запасы произведенных черных металлов в экономике России увеличились значительно вопреки изменению границ и площади государства в XX–XXI вв. (рост в 45 раз с 35 млн т в 1911 г. до 1576 млн т в 2016 г.). Существенным образом также трансформировалось отраслевое распределение запасов (табл. 2). Причины фиксируемых изменений — рост населения и производства, изменение преобладающих хозяйственных укладов.

Объем металлофонда черных металлов Российской империи составлял примерно 35 млн т. Металл в основном концентрировался в транспортной сфере (железных дорогах и соответствующей инфраструктуре). Порядка 20% всех металлов было сконцентрировано в промышленности и около 10% в сельском хозяйстве. При этом на сельское хозяйство в структуре народного богатства приходилось 14.4%, на производственные фонды — 18.8%, а на промышленность и транспорт — всего 5.7% и 9.3% соответственно [4]. Это свидетельствует о крайне низкой металлоемкости большинства отраслей хозяйства за исключением транспорта.

В советский период в связи с активной индустриализацией экономики запасы произведенных черных металлов увеличились во всех отраслях хозяйства. Наибольший рост в отраслевой структуре металлофонда черных металлов в 1913–1992 гг. имела промышленность (на 18.7 п.п.) и оборотные фонды (на 8.1 п.п.). Существенно сократилась доля запасов произведенных металлов в транспортной сфере, меньше в сельском хозяйстве.

Объем металлофонда черных металлов России согласно оценке маркетингового агентства MegaResearch в 2016 г. составил 1.57 млрд т. В 1992–2016 гг. фиксировался прирост металлофонда черных металлов примерно на 20.7%. Прирост металлофонда страны обеспечивался главным образом за счет восстановления докризисных объемов выплавки стали до 70 млн т в год. Ограничением роста металлофонда стал значительный экспорт продукции черных металлов на уровне 25–29 млн т в зависимости от года.

¹ Выбор максимально возможного по продолжительности периода для усреднения значений накопления лома и отходов черных металлов связан с лаговым эффектом перехода эксплуатируемых изделий в отходы. Предполагается, что за восемь лет значимая часть изделий пополнит категорию лома и металлических отходов.

Таблица 2. Трансформация отраслевой структуры металлофонда черных металлов России в 1913–2016 гг., %; составлено автором по данным [2, 4, 8]

Table 2. Transformation of the structure of the Russian ferrous metals fund in 1913–2016, %; compiled by the author according to [2, 4, 8]

Отрасль экономики	РИ	СССР	СССР	РФ	РФ
	1913 г.	1939 г.	1972 г.	1992 г.	2016 г.
Производственная сфера, включая:	80.00	72.50	65.00	72.23	60.35
Сельское хозяйство	10	7.1	6.4	7.73	3.24
Промышленность	20	31.4	35.8	38.72	35.15
Транспорт и связь	50	32	16.9	17.72	15.84
Строительство	...*	1	3.6	4.33	3.74
Торговля и прочее	...*	1	2.3	3.73	2.39
Непроизводственная сфера (жилищный сектор и коммунальное хозяйство, сфера услуг)	13	19	20.6	12.1	14.55
Бытовой металлофонд	2	2.9	2	2.5	5.94
Оборотные фонды	5	5.6	11.4	13.1	19.15
Всего	100	100	100	100	100

Вследствие кризисных явлений в экономике и обществе в переходный период произошло сокращение доли производственных отраслей в структуре металлофонда по сравнению с 1992 г. совокупно на 12 п.п. Доля сельского хозяйства с высокой дотационностью в советский период сократилась максимально (на более чем 3 п.п.). Прочие производственные отрасли показывают сокращение в пределах нескольких п.п. Примечательно увеличение доли бытового металлофонда в общей структуре, что вероятно также связано с ростом благосостояния населения и металлопотребления в стране.

Металлофонд черных металлов России характеризуются **неоднородностью регионального распределения**. В 2016 г. отмечалась значительная вариация запасов произведенных черных металлов в экономике между регионами: от 0.7 млн т в Чукотском автономном округе до 126.4 млн т в Москве (рис. 1). Основными факторами региональной дифференциации металлофонда является уровень развития промышленности и транспорта. В совокупности на эти отрасли хозяйства пришлось 70.1% металлофонда черных металлов страны.

Наибольшие запасы произведенных черных металлов имеет Москва (126.4 млн т, или 8% от металлофонда России в 2016 г.). Вместе с Московской областью на столичный регион приходится более 10% металлофонда черных металлов страны (200 млн т). Для сравнения, суммарно на Санкт-Петербург и Ленинградскую область в 2016 г. приходилось 97.2 млн т или 6.1% металлофонда страны. Значительные запасы произведенных черных металлов в Москве и Санкт-Петербурге концентрируются в городском хозяйстве и строительной сфере.

Высокие значения металлофонда черных металлов имеют регионы Урала и Поволжья. На Урале и в Поволжье регионы с выраженной индустриальной



Рис. 1. Металлофонд черных металлов регионов России (результаты авторской оценки), 2016 г.; составлено автором.

Fig. 1. The ferrous metals fund of the regions (the results of the author's assessment), 2016. Compiled by the author.

специализацией и значительной концентрацией населения образуют зону с высокой концентрацией запасов произведенных черных металлов. Она включает Свердловскую (80.2 млн т), Челябинскую (56.1 млн т), Самарскую (43.5 млн т) области, Республики Башкортостан (34.7 млн т) и Татарстан (53.8 млн т), Пермский край (33.6 млн т). В этих регионах крайне значительны запасы произведенных черных металлов в производственной сфере и оборотных фондах.

Значителен металлофонд черных металлов в Краснодарском крае и Ростовской области (43.8 и 32.5 млн т соответственно). В Краснодарском крае высока доля транспорта в отраслевом распределении запасов произведенных черных металлов, в Ростовской области — промышленности.

В Сибири значимые запасы произведенных черных металлов сконцентрированы в нефтегазовых округах Тюменской области (в ХМАО — 68.4 млн т, в ЯНАО — 38.1 млн т), в Красноярском крае (45.7 млн т), Иркутской (26.8 млн т) и Кемеровской (23.8 млн т) областях. В округах Тюменской области металл сконцентрирован в добывающих фондах и транспортной сфере (трубопроводном транспорте), а также в промышленности в случае с ХМАО. Отраслевая структура металлофонда черных металлов прочих регионов идентична регионам Урала и Поволжья в связи с развитой индустриальной базой.

В Хабаровском и Приморском крае, металлофонд которых в 2016 г. составил 15.6 и 21.9 млн т соответственно, формирование запасов произведенных черных металлов в том числе определяется приморским положением регионов и соответственно

развитием в них крупных транспортно-логистических терминалов по обслуживанию экспорта России в страны Азиатско-Тихоокеанического региона.

Прочие регионы, имеющие более скромные запасы произведенных черных металлов, имеют совершенно разные соотношения факторов формирования металлофонда. Например, в депрессивных и старопромышленных регионах запасы произведенных черных металлов концентрируются преимущественно в промышленности и транспортной сфере, в слаборазвитых регионах — в строительстве, непродуцированной и бытовой сферах.

Ежегодно в России **накапливается** порядка 90–100 млн т лома и отходов черных металлов. Менее половины накопленного металлолома заготавливается ломозаготовительными организациями (20–30 млн т), остальная часть составляет оборотный металлолом, образующийся в результате производства (от 30 млн т), невостребованный металлолом и безвозвратные потери металла в хозяйстве в результате его эксплуатации. Большая часть заготовленного металлолома используется металлургическими предприятиями России при производстве стали, порядка 2–4 млн т до 2022 г. отправлялась на экспорт.

Вариация регионов по объемам накопления лома и отходов черных металлов значительнее чем по показателю металлофонда: от нескольких тысяч т в Республиках Северного Кавказа до 19.3 млн т в Свердловской области в 2016 г. (рис. 2).

Накопление металлолома в основном ограничивается территориями в границах главной полосы расселения населения России. Причина — повышенная концентрация в этой зоне конечных потребителей металлосодержащей продукции.

Лидировали по накоплению лома и отходов черных металлов в 2016–2023 гг. преимущественно металлургические регионы: Свердловская (20.9 млн т), Челябинская (8.3 млн т), Кемеровская (6.7 млн т), Вологодская (5.1 млн т) и Липецкая (3.9 млн т) области. На них суммарно приходится примерно половина накопленного металлолома в стране. Основным источником накопления отходов и лома в них являются металлургические, в меньшей степени машиностроительные предприятия.

Значительные различия в накоплении металлолома между металлургическими и неметаллургическими регионами обусловлены в том числе технологическими особенностями функционирования металлургических и металлообрабатывающих предприятий. В результате производства стальной продукции (особенно проката) формируются оборотные отходы и лом, которые далее направляются в производство стали.

Меньшие, но вместе с этим значительные объемы металлолома продуцируют неметаллургические регионы Урала, Поволжья и Юга: например, Республики Башкортостан (0.67 млн т) и Татарстан (1.46 млн т), Самарская (1.74 млн т), Саратовская (1.93 млн т), Волгоградская (2.13 млн т) и Ростовская (2.53 млн т) области, Пермский (1.11 млн т) и Краснодарский (4.18 млн т) край. В этих регионах накопление лома и отходов черных металлов определяется значительной концентрацией населения и мощностей машиностроения.

Значительные объемы накопления металлолома также характерны для регионов в зоне влияния крупнейших агломераций страны и некоторых приморских регионов. На накопление металлолома в Москве (4.19 млн т), Санкт-Петербурге (2.06 млн т), Московской (2.61 млн т) и Ленинградской (0.99 млн т) областях влияет высокая численность населения регионов, в Хабаровском (1.84 млн т) и Приморском (0.6 млн т) крае — размещение портовой инфраструктуры и базирование водного транспорта. Интенсивное накопление металлолома в приморских регионах в том числе связано с более быстрым износом металлоемких морских транспортных средств.



Рис. 2. Накопление металлолома в регионах России в 2016–2023 гг. Составлено автором.

Fig. 2. Accumulation of scrap metal in the Russian regions in 2016–2023. Compiled by the author.

Меньшие объемы накопления металлолома имеют прочие староосвоенные регионы России, а также крупногородские промышленно-развитые регионы Западной и Восточной Сибири, где основными источниками образования отходов и лома черных металлов являются металлоемкие производства и население. Остальные регионы имеют незначительные объемы накопления металлолома, что во многом сопряжено с их низким уровнем развития экономики.

Обсуждение результатов

Результаты корреляционного анализа подтвердили **наличие сильной положительной связи** между объемом металлофонда в 2016 г. и накоплением лома и отходов черных металлов в 2016–2023 гг. в регионе. Коэффициент корреляции составил 0.81.

Значительные **отклонения** от зависимости показали две группы регионов (рис. 3):

1. Регионы с наличием металлургических производств (Свердловская, Челябинская, Кемеровская, Вологодская, Оренбургская, Липецкая, Нижегородская, Волгоградская, Саратовская, Ростовская области, Хабаровский край);

2. Индустриально развитые регионы и регионы в зоне влияния крупнейших агломераций страны (ХМАО, Красноярский и Краснодарский края, Республики Башкортостан, Татарстан и Коми, Московская область, Москва, Санкт-Петербург и др.).

Нелинейность распределения регионов из первой группы обусловлена методикой расчета показателя образования отходов и лома черных металлов. При его расчете учитываются отходы и лом черных металлов, образованные в результате металлоемкого производства (иначе оборотный металлолом). Это ограничивает доступ

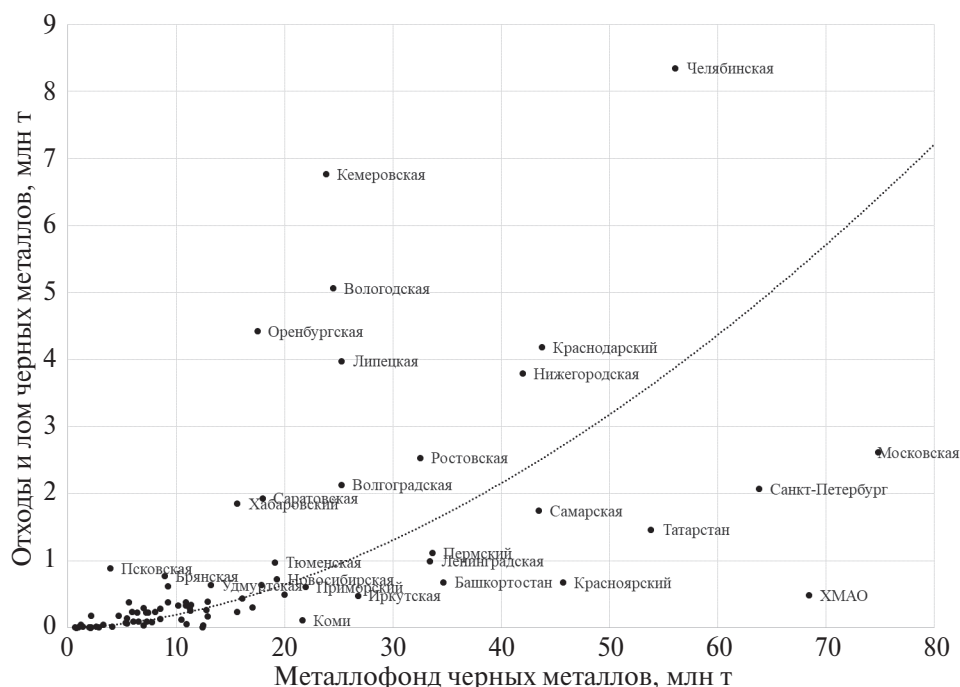


Рис. 3.Metallofond и накопление отходов и лома черных металлов в регионах России; составлено автором.

Fig. 3. Metallofund and accumulation of ferrous metal waste and scrap in the regions of Russia; compiled by the author.

к данным о необоротном металлоломе, накапливаемом в регионе за пределами предприятий металлургического комплекса.

Причины нелинейности распределения регионов из второй группы различаются. Некоторые из них — возрастная структура основных фондов, которая зависит от инвестиционной динамики развития региона и определяет масштабы накопления необоротного лома, завышение или занижение авторской оценкой объема металлофонда в виду специфики статистических данных, статистический недоучет части накопления отходов и лома черных металлов и др.

Отклонение металлоемких Москвы и Санкт-Петербурга обусловлено завышением объема металлофонда из-за высокого удельного веса городов в фондах непродуцированной сферы страны, отклонение Московской и Ленинградской областей — более молодой возрастной структурой основных фондов (средневзвешанное значение доли неизношенных фондов в них составляет свыше 65—70%).

В Республике Коми и ХМАО с значительными запасами произведенных черных металлов сравнительно небольшое накопление металлолома обусловлено спецификой отраслевой структуры металлофонда: значимой концентрацией произведенных металлов в трубопроводной инфраструктуре с сравнительно долгим сроком эксплуатации (в Коми — 44%, в ХМАО — 28.2%).

Отклоняются от линии тренда также металлоемкие индустриально развитые регионы: например, Самарская и Иркутская области, Пермский и Красноярский край, Республика Башкортостан. Данные регионы имеют примерно схожее отрас-

левое распределение запасов произведенных черных металлов, а также средневзвешенное значение доли неизношенных фондов (50–60%).

При исключении из анализа регионов из первой группы, отклонения обозначенных выше регионов от линейного распределения на графике минимальны.

Коэффициент детерминации (R^2) построенной в работе регрессионной модели составил 0.66, что соответствует умеренной способности модели объяснить вариацию данных: $y = 3492.5x^{1.7419}$. Занижение объяснительной силы регрессионной модели во многом обусловлено упомянутыми выше факторами. Однако даже с их учетом результаты регрессионного анализа подтвердили наличие тесной связи между анализируемыми показателями.

Объемы накопления необоротного металлолома, которые зависят от объема металлофонда черных металлов, в том числе **влияют на уровень развития ломозаготовительной деятельности** в российских регионах. Это иллюстрируют количество ломозаготовительных баз и организаций, расположенных в регионах с разными характеристиками ресурсной базы (табл. 3).

Количество ломозаготовительных баз в регионе **зависит** от объемов накопления необоротного металлолома (табл. 3). Однако ресурсные паттерны в меньшей степени способны объяснить количество ломозаготовительных организаций в регионе. Например, наиболее высокая концентрация ломозаготовительных организаций в расчете на ресурсную базу наблюдается в группе регионов с приморской инфраструктурой и группе прочих староосвоенных регионов России. Это обусловлено экспортной ориентацией ломозаготовительных организаций в случае приморских регионов и активной заготовкой металлолома из-за высокого спроса на него со стороны металлургических комбинатов в случае прочих староосвоенных регионов. Вместе с этим, все же прослеживается определенная зависимость и в отношении данного показателя: например, наименьшее количество организаций приходится на слаборазвитые регионы с небольшим ломонакоплением.

Заключение

Различия в объеме металлофонда между российскими регионами свидетельствуют о разном характере накопления произведенных черных металлов между региональными социально-экономическими системами в процессе их производства и потребления. Распределение регионов по накоплению лома черных металлов не идентично их распределению по запасам произведенных черных металлов в экономике. Накопление металлолома в стране ограничивается главной полосой расселения населения и хозяйственного освоения России. Существенно выше его накопление в металлургических регионах, тогда как в добывающих регионах, наоборот, ниже.

Корреляционный анализ подтвердил наличие зависимости между объемом металлофонда и образованием отходов и лома черных металлов. Отклонения некоторых регионов обусловлены совокупностью факторов, среди которых специфика расчета показателя “образовалось лома и отходов черных металлов”, возрастная и отраслевая структура основных фондов.

Результаты количественного анализа показали, что использование данных Росстата имеет свои нюансы. В металлургических регионах в общем объеме накопления лома и отходов черных металлов учитывается оборотный металлолом, образующийся при производстве металлоемкой продукции. Это занижает реальную степень

Таблица 3. Некоторые показатели развития сферы рециклинга в регионах с разной ресурсной базой; составлено автором

Table 3. Some indicators of recycling development in regions with different resource base; compiled by the author

Группа	Примеры регионов	Показатели*			
		Запасы металлов, млн т	Накопление лома, млн т/г.	Количество металлобаз	Количество организаций по заготовке лома
Металлургические регионы	Свердловская, Челябинская, Кемеровская, Вологодская, Липецкая, Оренбургская, Тульская области и другие	25–80	1.0–20.0	до 30	50–500
Индустриально развитые регионы Урала, Поволжья, Юга и Сибири	Башкортостан, Татарстан, Удмуртия, Краснодарский, Пермский и Красноярский край, Самарская, Саратовская, Волгоградская, Ростовская, Иркутская области и другие	10–50	до 4.5	5–30	50–200
Крупнейшие городские агломерации	Москва, Санкт-Петербург, Московская область	60–120	1.0–5.0	15–30	100–600
Регионы с приморской инфраструктурой	Ленинградская, Калининградская, Архангельская, Мурманская области, Хабаровский и Приморский край	10–35	до 2.0	до 20	50–400
Нефтегазодобывающие регионы	Коми, НАО, ЯНАО, ХМАО, Саха (Якутия), Сахалинская область	10–70	до 0.5	до 10	10–70
Прочие староосвоенные регионы	Брянская, Смоленская, Калужская, Рязанская, Владимирская, Костромская, Ярославская, Тверская области и другие	5–20	до 0.6	до 15	30–200
Слаборазвитые регионы	Республики Северного Кавказа и юга Сибири: Дагестан, КБР, КЧР, Чеченская, Тыва, Алтай и другие	до 10	до 0.1	до 10	до 50

*Примечание: в столбцах указаны диапазоны значений для регионов внутри групп.

зависимости между показателями на региональном уровне и требует новых подходов к решению данной проблемы. Один из вариантов ее решения — использование коэффициентов накопления металлолома с учетом жизненных циклов изделий в разных отраслях экономики.

Объемы накопления металлолома в том числе влияют на уровень развития ломозаготовительной деятельности в российских регионах. Ресурсные паттерны способны объяснить межрегиональные различия в количестве ломозаготовительных баз, в меньшей степени — ломозаготовительных организаций. Это подчеркивает важность дальнейшего комплексного исследования факторов развития сферы рециклинга в российских регионах во взаимосвязи с другими факторами.

Список литературы

1. Амоша А.И., Марченко В.М., Ляшенко В.И. Особенности потенциала рынка лома черных металлов для развития металлургии России и Украины // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2009. № 18. С. 55–71.
2. Буданов И.А. Роль рынка металлолома в решении ресурсных проблем металлургии // Проблемы прогнозирования. 2002. № 2. С. 43–57.
3. Горячко М.Д., Имангулов Л.Р. Оценка оптимальности сырьевых зон предприятий черной металлургии России в области закупок металлолома // Региональные исследования. 2022. № 2. С. 40–52. <https://doi.org/10.5922/1994-5280-2022-2-4>
4. Зусман Л.Л. Металлический фонд народного хозяйства СССР. М.: Металлургия, 1975. 407 с.
5. Козлов Г.И., Райков Ю.Н. Металлический фонд черных металлов России (методика и результаты расчетов) // Экономика в промышленности. 2013. № 2. С. 13–17.
6. Мазеин Н.В. Крупнейшие ареалы черной металлургии мира: иерархия и факторы размещения // Региональные исследования. 2009. № 2. С. 59–73.
7. Родионова И.А. Географические особенности проявления процессов миграции производства в металлургии мира // Вестн. РУДН. Экономика. 1999. № 1. С. 71–82.
8. Структура металлофонда РФ с разделением на черный и цветной лом : интернет-портал маркетингового агентства «MegaResearch». [2008]. URL: https://www.megaresearch.ru/knowledge_library (дата обращения: 20.01.2025)
9. Ткачев С.А., Гольм Д.А. Трансформация факторов территориальной организации черной металлургии в России и за рубежом // Вестник КРАГСиУ. 2014. № 13. С. 99–104.
10. Угренинов С.В. Функционирование и взаимодействие региональных рынков лома и отходов черных металлов. Таганрог : Изд-во ЧОУ ВО ТИУиЭ, 2020. 96 с.
11. Федеральная служба государственной статистики : федер. интернет-портал. [1999]. URL: <https://rosstat.gov.ru> (дата обращения: 20.01.2025)
12. Хрущев А.Т. География промышленности СССР. М. : Мысль, 1986. 415 с.
13. Drakonakis K., Rostkowski K., Rauch J., Graedel T.E., Gordon R.B. Metal capital sustaining a North American city: Iron and copper in New Haven, CT // Resources, Conservation and Recycling. 2007. Vol. 49. № 4. P. 406–420. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.005>
14. Giarratani F., Gruver G., Richmond C. The US Regional Ferrous Scrap Model. In book: Trade, Networks and Hierarchies. 2002. P. 159–175.
15. Graedel T.E., Reck B., Ciacci L., Passarini F. On the Spatial Dimension of the Circular Economy. Resources. 2019. № 8. P. 10. <https://doi.org/10.3390/resources8010032>
16. Gruver G., Giarratani F. Modeling Geographic Ferrous Scrap Markets: Regional Prices and Interregional Transactions in the United States. Journal of Regional Science. 2005. № 2. P. 313–341. <https://doi.org/10.1111/j.0022-4146.2005.00373.x>

17. Hattori R., Horie S., Hsu F., Elvidge C., Matsuno Y. Estimation of in-use steel stock for civil engineering and building using nighttime light images // *Resources, Conservation and Recycling*. 2013. № 83. P. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.11.007>
18. Lyons D., Rice M., Wachal R. Circuits of scrap: Closed loop industrial ecosystems and the geography of US international recyclable material flows 1995–2005. *The Geographical Journal*. 2009. № 4. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4959.2009.00341.x>
19. Metal stocks in society: a scientific synthesis (2010). Report of the UN program UNEP. [Electronic resource]. Access mode: <https://www.resourcepanel.org> (access date: 06/11/2024)
20. Pauliuk S., Wang T., Müller D.B. Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries // *Resources, Conservation and Recycling*. 2013. Vol. 71. P. 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.11.008>

Regional Differences in The Accumulation of Produced Ferrous Metals Stocks and Scrap Metal in the Russian Economy

L. R. Imangulov

Lomonosov Moscow State University (MSU), Moscow, Russia.

E-mail: linar.imangulov.1999@mail.ru

Received 27.02.2025

Revised 31.07.2025

Accepted 01.08.2025

The article analyzes regional differences in the accumulation of ferrous metals and scrap metal stock in the Russian economy. The author's method of assessing the metal stock of Russian regions is based on the statistical study of the regional distribution of ferrous metals in different types sectors of economic activity. The data sources are basic socio-economic indicators of the regions, the size and sectoral structure of the national ferrous metal stock. The results of the assessment revealed a significant regional variation of ferrous metal reserves. The regions of the Urals, Volga and Centre with developed industry and high population have significant reserves of ferrous metals. It was revealed that the distribution of regions by accumulation of ferrous scrap metal is not identical to their distribution in accordance with the stocks of produced ferrous metals. The distribution of regions by accumulation of ferrous scrap metal is not identical to their distribution according to stocks of produced ferrous metals. The deviations are caused by different factors. For example, in metallurgical regions, a more intensive accumulation of scrap metal is associated with the specifics of production processes in the ferrous metallurgy. The results of the correlation analysis confirmed the relationship between the metal stock value in 2016 and the volumes of ferrous metal waste and scrap accumulation in 2016–2023. Regions where there is no direct correlation between the analysed indicators were found. The reasons are the peculiarities of economic development of the territories and the methodology of calculating the indicator. In conclusion, the author compared the resource base and the scale of development of scrap collection activities in Russian regions. The author identified cases of inconsistency between the number of scrap collection organisations the resource capabilities of the territories. This highlights the need for further analysis of the development of the recycling industry in conjunction with other factors.

Keywords: ferrous metallurgy, metal stock, scrap metal, industry, imbalance in accumulation

References

1. Amosha A.I., Marchenko V.M., Ljashenko V.I. Osobennosti potentsiala rynka loma chernyh metallov dlja razvitiya metallurgii Rossii i Ukrainy // Nacional'nye interesy: priority i bezopasnost'. 2009. № 18. S. 55–71.
2. Budanov I.A. Rol' rynka metalloloma v reshenii resursnyh problem metallurgii // Problemy prognozirovaniya. 2002. № 2. S. 43–57.
3. Gorjachko M.D., Imangulov L.R. Ocenka optimal'nosti syr'evyh zon predpriyatij chernoj metallurgii Rossii v oblasti zakupok metalloloma // Regional'nye issledovaniya. 2022. № 2. S. 40–52. <https://doi.org/10.5922/1994-5280-2022-2-4>
4. Zusman L.L. Metallicheskiy fond narodnogo hozjajstva SSSR. M.: Metallurgiya, 1975. 407 s.
5. Kozlov G.I., Rajkov Ju.N. Metallicheskiy fond chernyh metallov Rossii (metodika i rezul'taty raschetov) // Jekonomika v promyshlennosti. 2013. № 2. S. 13–17.
6. Mazein N.V. Krupnejshie arealy chernoj metallurgii mira: ierarhiya i faktory razmeshheniya // Regional'nye issledovaniya. 2009. № 2. S. 59–73.
7. Rodionova I.A. Geograficheskie osobennosti proyavleniya processov migratsii proizvodstva v metallurgii mira // Vestn. RUDN. Jekonomika. 1999. № 1. S. 71–82.
8. Struktura metallofonda RF s razdeleniem na chernyj i cvetnoj lom : internet-portal marketingovogo agentstva "MegaResearch". [2008]. URL: https://www.megaresearch.ru/knowledge_library (data obrashheniya: 20.01.2025)
9. Tkachev S.A., Gol'm D.A. Transformatsiya faktorov territorial'noj organizatsii chernoj metallurgii v Rossii i za rubezhom // Vestnik KRAGSiU. 2014. № 13. S. 99–104.
10. Ugreninov S.V. Funkcionirovanie i vzaimodejstvie regional'nyh rynkov loma i othodov chernyh metallov. Taganrog: Izd-vo ChOU VO TIUiJe, 2020. 96 s.
11. Federal'naja sluzhba gosudarstvennoj statistiki: feder. internet-portal. [1999]. URL: <https://rosstat.gov.ru> (data obrashheniya: 20.01.2025)
12. Hrushhev A.T. Geografija promyshlennosti SSSR. M.: Mysl', 1986. 415 s.
13. Drakonakis K., Rostkowski K., Rauch J., Graedel T.E., Gordon R.B. Metal capital sustaining a North American city: Iron and copper in New Haven, CT // Resources, Conservation and Recycling. 2007. Vol. 49. № 4. P. 406–420. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.005>
14. Giarratani F., Gruver G., Richmond C. The US Regional Ferrous Scrap Model. In book: Trade, Networks and Hierarchies. 2002. P. 159–175.
15. Graedel T.E., Reck B., Ciacci L., Passarini F. On the Spatial Dimension of the Circular Economy. Resources. 2019. № 8. P. 10. <https://doi.org/10.3390/resources8010032>
16. Gruver G., Giarratani F. Modeling Geographic Ferrous Scrap Markets: Regional Prices and Interregional Transactions in the United States. Journal of Regional Science. 2005. № 2. P. 313–341. <https://doi.org/10.1111/j.0022-4146.2005.00373.x>
17. Hattori R., Horie S., Hsu F., Elvidge C., Matsuno Y. Estimation of in-use steel stock for civil engineering and building using nighttime light images // Resources, Conservation and Recycling. 2013. № 83. P. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.11.007>
18. Lyons D., Rice M., Wachal R. Circuits of scrap: Closed loop industrial ecosystems and the geography of US international recyclable material flows 1995–2005. The Geographical Journal. 2009. № 4. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4959.2009.00341.x>
19. Metal stocks in society: a scientific synthesis (2010). Report of the UN program UNEP. [Electronic resource]. Access mode: <https://www.resourcepanel.org> (access date: 06/11/2024)
20. Pauliuk S., Wang T., Müller D.B. Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries // Resources, Conservation and Recycling. 2013. Vol. 71. P. 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.11.008>

