

ЛАНДШАФТЫ И ЭКОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

УДК 551.583:551.588+504.7.06:502.6

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

© 2024 г. А. А. Медведков^{1, 2, *}

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

²Институт географии РАН, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 23.11.2023 г.

После доработки 25.04.2024 г.

Принята к публикации 16.05.2024 г.

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

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

DOI: 10.31857/S2587556624030011 EDN: SPCWFT

ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

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

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

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

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

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

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

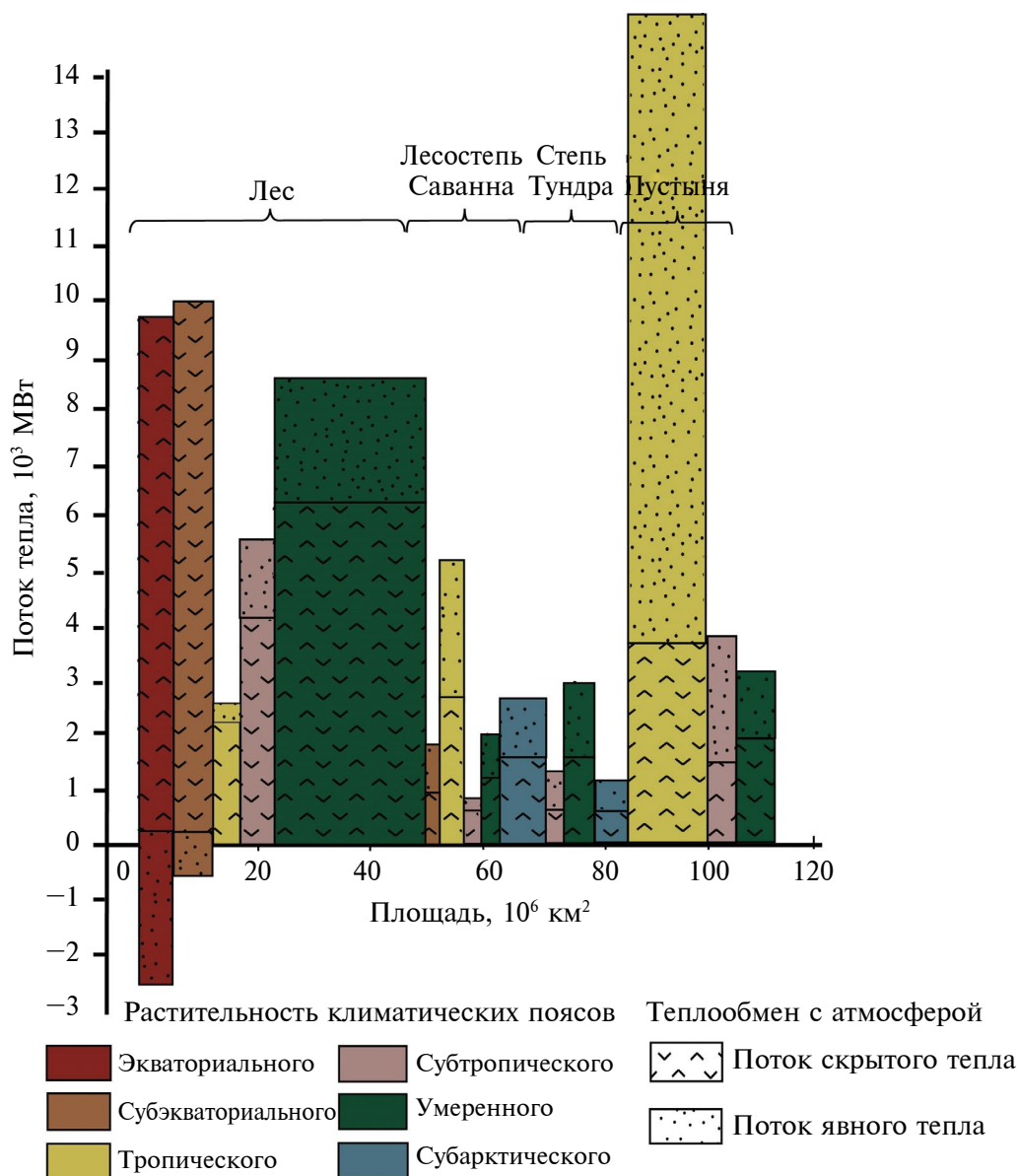


Рис. 1. Потоки скрытого и явного тепла в атмосферу по типам зональной растительности (Котляков, 2001). Климатические пояса (кроме экваториального) представлены на графике разными типами растительности.

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

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

эффекта в теплое время года поток явного тепла увеличивается на 35 Вт/м² (Мягков, 2005). Этот фактор заметно усиливает эффект городского острова тепла. Для смягчения этих вызовов необходимо не только реализовывать природно-климатические решения, но и с целью повышения их эффективности оценивать результативность. В этой связи особую актуальность приобретает разработка технологий по оценке экологической роли разных ландшафтов. Ниже представлены данные, на примере которых апробирована одна из технологий, ориентированная на сравнительную оценку средообразующего потенциала лесных ландшафтов. Она может применяться не только в районах “густой” биосферы, но и имеет также потенциал использования на территориях “разреженной” биосферы, например, для оцен-

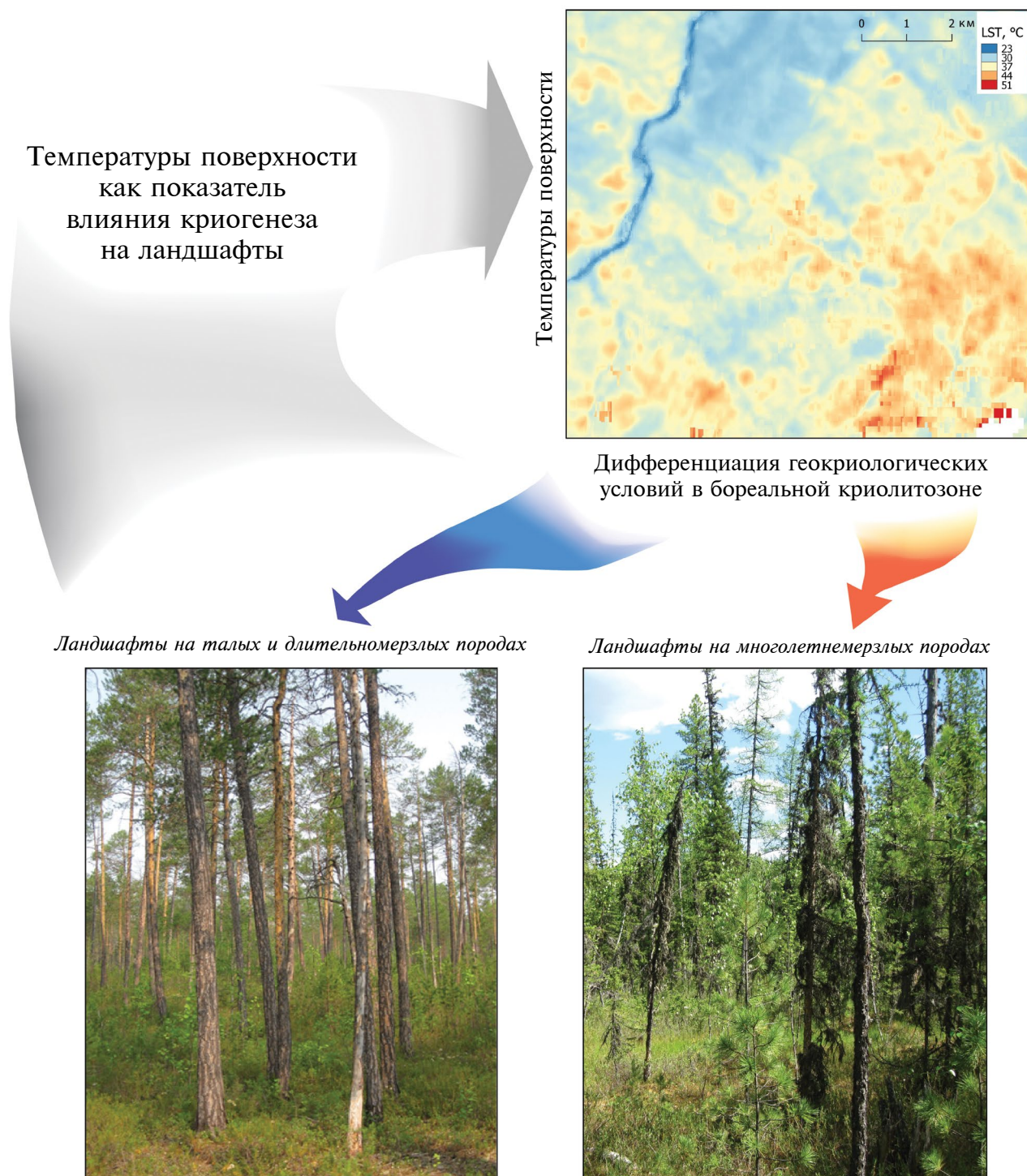


Рис. 2. Особенности тепло- и влагообмена лесных ландшафтов, характеризующихся разной степенью влияния процессов криогенеза на их структуру и функционирование (Medvedkov et al., 2023). Термические характеристики, представленные на тематической карте, индицируют лесные ландшафты с разным потенциалом тепло-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

ки эффективности фитомелиоративных работ в аридных и семиаридных районах.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

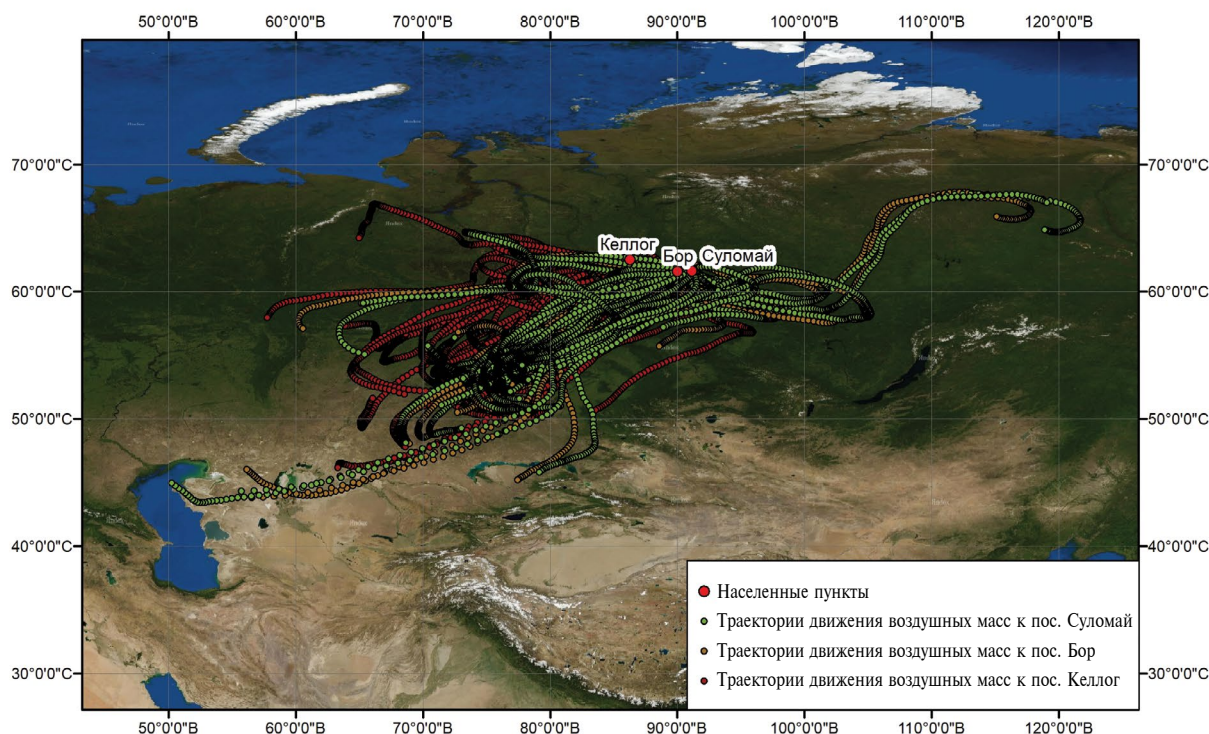


Рис. 3. Обратные траектории движения воздушных масс, рассчитанные для одного из зимних месяцев 2017 г. (на 50-метровой высоте относительно земной поверхности) по дисперсионной модели HYSPLIT — эффективному инструменту для определения источников дальнего переноса загрязняющих веществ в приземной атмосфере.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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

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

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

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

FUNDING

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

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

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

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

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

^a Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

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

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

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

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

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

REFERENCES

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

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

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