

УДК 630;641

СЦЕНАРНЫЙ ПОДХОД К АДАПТАЦИИ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

© 2023 г. А. В. Константинов*

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: konstantinov_a82@mail.ru

Поступила в редакцию 06.12.2022 г.

После доработки 02.02.2023 г.

Принята к публикации 24.04.2023 г.

Установлены корреляционные зависимости между количественными значениями абиотических факторов, связанных с климатическими изменениями и критериями уязвимости лесных экосистем, для 24 модельных субъектов Российской Федерации. Выявлена высокая степень тесноты связи между климатическими параметрами и лесными пожарами для лесных экосистем центра и юга России, а также Восточной Сибири. С использованием матричной модели позиционирования адаптационного потенциала лесных экосистем модельных субъектов выявлены кластеры с их наиболее уязвимыми к климатическим изменениям группами. Применение разработанной методики для анализа лесных экосистем модельных субъектов позволило установить, что происходит смещение показателей их адаптационного потенциала к нижней границе устойчивости (Архангельская, Ленинградская, Воронежская, Тюменская, Иркутская области, Ханты-Мансийский автономный округ, Хабаровский край). На основании изучения и кластеризации модельных субъектов Российской Федерации по уровню адаптационного потенциала выполнена дифференциация управленческих решений и лесохозяйственных мер по укрупненным территориальным объектам, включающим различные субъекты Российской Федерации, с целью поддержания и усиления адаптационного потенциала лесных экосистем. Меры адаптации лесных экосистем к климатическим изменениям могут быть реализованы в разрезе трех сценариев: ведение лесного хозяйства с элементами реактивной адаптации к климатическим изменениям (для стабильных лесных экосистем); реализация стратегии адаптации лесного хозяйства к изменениям климата (для нестабильных лесных экосистем); восстановление и поддержание экосистемных функций лесов (для деградирующих лесных экосистем).

Ключевые слова: изменения климата, лесные экосистемы, уязвимость, адаптационный потенциал, сценарный подход

DOI: 10.31857/S2587556623040039, **EDN:** VJTUSW

ВВЕДЕНИЕ

Современные климатические модели демонстрируют, что глобальная приземная температура будет продолжать расти, по меньшей мере, до середины столетия. Глобальное потепление на 1.5 и 2°C будет достигнуто в течение XXI в., если в предстоящие десятилетия не произойдет резкого сокращения выбросов CO₂ и других парниковых газов (МГЭИК, 2021). Лесное хозяйство характеризуется крайней степенью уязвимости к прямому воздействию климатических и метеорологических факторов. Изменяющиеся климатические условия являются основой исчезновения видов в лесных экосистемах, изменения ареалов их распространения и смещения границ лесорастительных зон, изменений в продуктивности лесных сообществ (Григорьева и др., 2016; Сергиенко, Константинов, 2016). Ущерб от лесных пожаров,

вредных организмов и других неблагоприятных факторов значительно превышает величину общих расходов на охрану, защиту и воспроизводство лесов. Кроме того, на степень уязвимости лесного сектора к климатическим изменениям оказывает влияние множество экономических, социальных, технологических факторов. Анализ подобного комплекса неклиматических факторов позволяет оценить источники возникновения рисков нестабильности лесного хозяйства, способствовать укреплению потенциала для осуществления мер по смягчению и адаптации, в связи с чем тема исследования является актуальной.

Длительные изменения климатических условий, наиболее ярко проявившиеся в текущем столетии, были и остаются ключевым фактором, оказывающим прямое и косвенное влияние на состояние всех компонентов лесных экосистем,

приводя в ряде случаев к их деградации и гибели древостоев на значительных площадях (Кашкаров, Поморцев, 2007; Коломыц, 2003; Семёнов и др., 2019; Харук и др., 2008; Bonan, 2008; Gamache and Payette, 2005; Soja et al., 2007).

Проблемы динамики состояния лесных экосистем Российской Федерации в условиях климатических изменений текущего столетия в различных аспектах нашли отражение во многих работах (Демаков, 2000; Замолотчиков, Краев, 2016; Истомин, 2009; Константинов, Бурцев, 2013; Матвеев, 2005; Миронов, 2007; Хантемиров и др., 2008; Чебакова и др., 2003; Шиятов, 2009; и др.).

Изменение климата, являясь важнейшим современным глобальным вызовом, определяет необходимость применения комплексного междисциплинарного подхода, охватывающего широкий спектр экологических, экономических и социальных аспектов устойчивого развития. Природные объекты, включая леса, различаются, на фоне региональных природно-экологических особенностей, по характеру и степени их уязвимости к неблагоприятным последствиям изменений климата, что необходимо учитывать при разработке и реализации комплекса мер по предотвращению и нейтрализации неблагоприятных последствий изменения климата или сведению их к минимально возможному уровню. Такие адаптационные меры должны обеспечиваться на долгосрочной основе с учетом региональных особенностей, а также масштабности и глубины их воздействия на различные аспекты функционирования секторов экономики.

В настоящее время решение данных вопросов в Российской Федерации находится на этапе становления, что требует, как с теоретической, так и с практической точек зрения, уточнения ключевых положений адаптационной стратегии лесного хозяйства с учетом произошедших и прогнозируемых изменений климата, научного обоснования системы устойчивого управления лесными ресурсами в условиях климатической нестабильности, развития практики планирования, реализации и контроля за осуществлением мер по адаптации лесного хозяйства к климатическим изменениям на разных уровнях государственного управления.

Целью настоящего исследования явилось обоснование сценарного подхода к деятельности в отношении адаптации лесных экосистем Российской Федерации в условиях изменений климата, как части адаптационной стратегии лесного хозяйства Российской Федерации к произошедшим и прогнозируемым изменениям климата.

Основные задачи исследования. 1. Установить наличие и направленность связи между количественными показателями динамики климатических факторов и уязвимости лесных экосистем модельных субъектов Российской Федерации. 2. С использованием матричной модели позиционирования

адаптационного потенциала лесных экосистем модельных субъектов Российской Федерации выявить кластеры с их наиболее уязвимыми к климатическим изменениям группами. 3. Разработать сценарии, включающие дифференцированные комплексы управленческих решений и лесохозяйственных мер реагирования в отношении адаптации лесных экосистем, реализуемых на уровне государственного и частного сектора и направленных на сглаживание деструктивных процессов и минимизацию потенциального экономического ущерба в лесном хозяйстве России.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оценка адаптационного потенциала лесных экосистем, характеризующего способность лесных экосистем приспосабливаться к климатическим изменениям и иным неблагоприятным факторам для сохранения экосистемных функций, основывалась на изучении динамики количественных показателей двух групп критериев и расчета индекса адаптационного потенциала в соответствии с авторской методикой (Константинов, 2014; Константинов, Матвеев, 2020). Первая группа критериев характеризует среднегодовую динамику климатических параметров (среднегодовые температуры атмосферного воздуха, сумма выпадающих атмосферных осадков, относительная влажность атмосферного воздуха, частота повторяемости опасных гидрометеорологических явлений, высота снежного покрова, частота повторяемости крупных лесных пожаров). Вторая группа критериев характеризует уязвимость лесных экосистем, т.е. их предрасположенность к неблагоприятному воздействию рассматриваемых факторов с течением времени (лесистость региона, площадь погибших лесных насаждений от вредных организмов, площадь погибших лесных насаждений от лесных пожаров, запас основных лесообразующих пород, площадь спелых и перестойных насаждений, изменение ареалов основных лесообразующих пород). Для согласованной оценки долгосрочной динамики количественных значений двух групп критериев рассчитывались их средние значения за два последовательных тридцатилетия (1961–1991 и 1991–2018 гг.).

Для изучения адаптационного потенциала лесных экосистем 24 модельных субъектов семи федеральных округов Российской Федерации (Северо-Западный федеральный округ: Архангельская область, Ленинградская область, Республика Карелия, Республика Коми, Ненецкий автономный округ, Новгородская область; Центральный федеральный округ: Брянская область, Воронежская область; Южный федеральный округ: Ростовская область; Приволжский федеральный округ: Нижегородская область; Уральский федеральный округ:

Тюменская область, Ханты-Мансийский автономный округ; Сибирский федеральный округ: Забайкальский край, Иркутская область, Омская область, Алтайский край, Красноярский край; Дальневосточный федеральный округ: Республика Саха (Якутия), Камчатский край, Магаданская область, Хабаровский край, Сахалинская область, Приморский край, Амурская область) в условиях изменений климата использованы данные открытого массива данных Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, а также данные, предоставленные Федеральным агентством лесного хозяйства. Подбор модельных субъектов Российской Федерации обусловлен ее лесорастительным районированием. Представленные в исследовании модельные субъекты представлены для каждой из восьми лесорастительных зон Российской Федерации и значительно различаются в экологическом и лесоводственно-типологическом отношении, но их объединяют потенциальная уязвимость к изменению климата и возрастающая антропогенная нагрузка. В каждом субъекте исследованиями охвачены насаждения, выявленные маршрутно-ключевым методом и соответствующие решаемым задачам, что, в свою очередь, благодаря разнообразию лесных экосистем, позволяет сформировать целостное представление об уровне изменчивости и уязвимости модельных объектов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования состояния лесных экосистем модельных субъектов Российской Федерации выявлены нарушения их биологической устойчивости, проявляющиеся в снижении адаптационного потенциала при наступлении критических климатических условий. Восходящие темпы роста деструктивных процессов в лесных экосистемах наблюдаются как в северных зонах страны, так и в зонах переходов от одних лесорастительных условий к другим (табл. 1).

Высокая степень тесноты прямой связи (значение коэффициента корреляции 0.71–0.9) по одной паре сравниваемых значений обнаружена для трех модельных субъектов (Магаданская, Архангельская области и Забайкальский край). В Архангельской области — это количество опасных метеорологических явлений и площадь лесных насаждений, погибших под воздействием вредных организмов ($r = 0.8$), когда вследствие воздействия совокупности неблагоприятных факторов наступает снижение биологической устойчивости древостоев и поражение их вредными организмами. В Забайкальском крае и Магаданской области — это количество пожаров и площадь погибших от них насаждений ($r = 0.74$ и 0.73 соответственно). Значительная (значение коэффициента корреляции 0.51–0.7) и умеренная (значение коэффициента

корреляции 0.31–0.5) степень тесноты связи обнаружена повсеместно, за исключением субъектов, где она вообще отсутствует. Сюда относятся Ненецкий автономный округ, Тюменская область и Приморский край. Значимую связь по одной-двум парам сравниваемых показателей имеют такие субъекты, как Ханты-Мансийский автономный округ, Омская и Магаданская области, Хабаровский край, по трем — Красноярский край и Амурская область. В иных субъектах, из числа исследуемых, значимая корреляция представлена по более широкому набору сравниваемых критериев. В целом, в ходе аналитического исследования установлен высокий уровень корреляции между климатическими параметрами и лесными пожарами для лесных экосистем центра и юга России, а также Восточной Сибири.

Значительная и умеренная корреляция повсеместно обнаружена для лесных пожаров и средней температуры воздуха. Наименьшее количество значимых корреляционных связей с климатическими факторами характерно для показателей площади насаждений, погибших под воздействием вредных организмов во всех региональных системах из числа изученных.

Выявленная сходная динамика между двумя группами факторов, определяющих адаптационный потенциал лесных экосистем модельных субъектов Российской Федерации позволила на последующих этапах исследования решить задачу прогнозирования их способности адаптироваться к климатическим изменениям и сформировать на этой основе соответствующие адаптационные мероприятия. Выделение комплексов лесных экосистем со схожими траекториями развития и состояния позволяет снизить многовариантность управленческих решений и набор мер, обеспечивающих их адаптацию.

В рамках исследования, используя количественные значения индекса адаптационного потенциала лесных экосистем, проведена их кластеризация в отношении модельных субъектов Российской Федерации для трех временных периодов (1991–2000, 2001–2010, 2011–2019 гг.) методом k -средних, целью которого является разделение числа наблюдений на кластеры, при этом каждое наблюдение относится к тому кластеру, к центру которого оно ближе всего. Использование этого метода позволило установить их общность по ключевым признакам. Для малого количества точек используемый метод кластеризации обеспечивает быструю сходимость на этапе элементарной кластеризации.

В каждом анализируемом периоде по результатам кластеризации выделено три группы кластеров, объединяющих лесные экосистемы модельных субъектов, различающиеся уровнем адаптационного потенциала, и, как следствие, требующих дифференцированных управленческих решений и лесохозяйственных мероприятий.

Таблица 1. Распределение лесных экосистем модельных субъектов Российской Федерации по степени тесноты связи (коэффициенту корреляции) абиотических факторов и критериев уязвимости

Степень тесноты связи $r = 0.71-0.9$		Степень тесноты связи $r = 0.51-0.7$		Степень тесноты связи $r = 0.31-0.5$	
факторы, диапазон уровня корреляции	комплексы лесных экосистем субъектов Российской Федерации	факторы, диапазон уровня корреляции	комплексы лесных экосистем субъектов Российской Федерации	факторы, диапазон уровня корреляции	комплексы лесных экосистем субъектов Российской Федерации
Опасные метеорологические явления/Площадь насаждений, поврежденных вредными организмами (0.69–0.8)	АО, РКо, СО	Температура воздуха/Запас лесообразующих пород (0.68–0.7)	АО, ЛО, РО, РКо, БО, ВО, НО	Температура воздуха/Лесистость (0.39–0.51)	АО, ЛО, РКа, РКо, БО, РС, КК, СО
		Количество природных пожаров в лесах/Площадь лесных насаждений, погибших от пожаров (0.54–0.74)	ЛО, РКо, НО, ЗК, ИО, КК, МО	Количество природных пожаров в лесах/Средняя площадь пожаров в лесах (0.3–0.49)	АО, БО, ВО, ХМАО, ОО, СО
				Атмосферные осадки/Площадь лесных насаждений, погибших от пожаров (–0.36... –0.51))	ЛО, РКо, НО, АК, СО
				Высота снежного покрова/лесистость (0.31–0.42)	АО, ЛО, БО, РС, СО

Примечание. r – линейный коэффициент корреляции; АО – Архангельская область; РКо – Республика Коми; СО – Сахалинская область; ЛО – Ленинградская область; РО – Ростовская область; БО – Брянская область; ВО – Воронежская область; НО – Нижегородская область; ЗК – Забайкальский край; ИО – Иркутская область; КК – Камчатский край; МО – Магаданская область; РКа – Республика Карелия; РС – Республика Саха (Якутия); ХМАО – Ханты-Мансийский автономный округ; ОО – Омская область; АК – Алтайский край.

зяйственных мер. В соответствии с упомянутой выше авторской методикой выделены группы (кластеры) лесных экосистем модельных субъектов, имеющих стабильный, не стабильный и деградирующий адаптационный потенциал.

Стабильный адаптационный потенциал в 60-летней динамике имеют лесные экосистемы Республики Карелия, Приморского края, Нижегородской, Новгородской, Мурманской, Амурской

областей, что составляет 29% модельных субъектов. Нестабильный адаптационный потенциал имеют 38% комплексов лесных экосистем модельных субъектов (Республика Коми, Брянская, Ростовская, Омская области, Забайкальский и Алтайский края), который проявляется в высоком динамизме и изменчивости под внешним воздействием параметров своего функционирования, в том числе уровня продуктивности.

Для комплексов лесных экосистем Архангельской, Ленинградской, Воронежской, Тюменской, Иркутской областей, Ханты-Мансийского автономного округа, Хабаровского края (33% модельных субъектов) характерен деградирующий характер развития, отличительной характеристикой которого является утраченный адаптационный потенциал. Применение разработанной методики для анализа лесных экосистем модельных субъектов позволило установить, что происходит смещение показателей их адаптационного потенциала к нижней границе устойчивости.

Выделенные кластеры лесных экосистем необходимы для целей лесопользования и проектирования мер адаптационного характера.

Сценарный подход является способом прогнозирования последовательно сменяющихся друг друга ситуаций в процессе развития какого-либо явления от современного состояния к качественно новому.

Основной задачей сценарного прогнозирования является выявление связей между процессом управленческой деятельности и возможностью выбора решений из нескольких альтернативных вариантов с учетом прогнозируемых рисков.

Теоретически использование метода разработки сценариев связано с анализом уникальных явлений, не имеющих репрезентативной статистики, для прогнозирования их возможных последствий. Однако на практике этот метод часто используют для поиска компромиссных решений внешне обусловленных проблем. Следовательно, при рассмотрении задачи адаптации национального лесного хозяйства к условиям меняющегося климата вполне логичным представляется использование этой научной парадигмы.

Адаптационные меры — это определенные действия, направленные на уменьшение уязвимости лесной экосистемы и повышение ее способности к адаптации. Меры адаптации лесных экосистем к климатическим изменениям могут быть реализованы в разрезе трех сценариев: во-первых, это ведение лесного хозяйства с элементами реактивной адаптации к климатическим изменениям (для стабильных лесных экосистем), во-вторых, реализация стратегии адаптации лесного хозяйства к изменениям климата (для нестабильных лесных экосистем), в-третьих, восстановление и поддержание экосистемных функций лесов (для деградирующих лесных экосистем) (рис. 1).

Сценарий № 1. Ведение лесного хозяйства с элементами реактивной адаптации к климатическим изменениям (для стабильных лесных экосистем)

Комплекс практических мер в рамках сценария № 1 может быть реализован в условиях, когда эволюционно-сложившийся уровень стабильности лесных экосистем существенно превосходит дестабилизирующее воздействие климатических изменений, даже при условии дополнительной антропогенной нагрузки. Это состояние может быть описано с помощью следующих положений:

- лесные экосистемы обладают большой степенью стабильности благодаря своей полнотелности и наличию ключевых малонарушенных участков, связанных общим экологическим каркасом;

- изменения климата, угнетая либо благоприятствуя отдельным компонентам фитоценоза, в целом не меняют его макроструктуру и закономерности функционирования;

- все виды использования лесов носят щадящий характер либо не превышают пределов естественной ресурсной емкости.

Сценарий № 1 предполагает ведение лесного хозяйства в регионах с преобладанием стабильных экосистем на основе существующих представлений о лесорастительном районировании с использованием современных лесоводственных систем, регламентированных действующим лесным законодательством и системой управления лесным хозяйством, с существующим на сегодняшний день распределением полномочий между федеральными и региональными органами власти, органами местного самоуправления.

Сценарий № 2. Разработка и реализация стратегии адаптации лесного хозяйства к изменениям климата (для нестабильных лесных экосистем)

Группа мероприятий, предусмотренных сценарием № 2, может быть реализована в условиях, когда неустойчивость климатических факторов может привести к частичной дестабилизации лесных экосистем в пределах того или иного региона. Это состояние может быть описано с помощью следующих положений:

- природно-климатические и лесорастительные пояса начнут интенсивно сдвигаться в направлении с юга на север;

- породный состав и структура древостоев начнет достаточно интенсивно меняться. Хвойные породы будут постепенно сменяться лиственными;

- смягчение климата с одной стороны увеличит период вегетации и повысит продуктивность древостоев, с другой — создаст более благоприятные



Рис. 1. Сценарии и управленческие меры реагирования в отношении адаптации лесных экосистем.

условия для развития вредных организмов (в том числе для проникновения инвазивных форм);

– изменения в структуре лесного фонда могут приобретать разную интенсивность в различные периоды времени и на разных территориях;

– вероятность возникновения неблагоприятных метеорологических явлений в целом вырастет, ситуация локально может обостриться;

– изменения климата будут оказывать интенсивное влияние на насаждения, но в целом не приведут к деградации лесных экосистем.

С целью ответа на обозначенные вызовы сценарий № 2 предусматривает разработку на основе прогнозирования, моделирования и анализа уязвимости лесного хозяйства к изменениям клима-

та, соответствующей стратегии адаптации на краткосрочную и долгосрочную перспективу. Основной целью разрабатываемой стратегии должно стать сохранение устойчивости управления и пользования лесными ресурсами в условиях дестабилизации климатических параметров.

Сценарий № 3. Восстановление и поддержание экосистемных функций лесов (для деградирующих лесных экосистем)

Реализация практических действий в рамках сценария № 3 может быть реализована в условиях, когда влияние климатических изменений на лесные экосистемы приведет к их выходу из

ВЫВОДЫ

устойчивого состояния и развитию деградационных процессов. Указанная неустойчивость может быть описана с помощью следующих положений:

- уменьшается биологическое разнообразие лесных экосистем, они становятся все более неполноценными;

- изменения породного состава идут быстрыми темпами, хвойные и/или твердолиственные породы (в зависимости от лесорастительного пояса региона) стремительно замещаются мягколиственными, сопутствующими породами;

- территория покрытых лесом земель лесного фонда деградирует, увеличивается площадь лесных и не покрытых лесом земель;

- испытывают подтопление либо, наоборот, подвергаются процессу аридизации большие территории, активизируются процессы ветровой и водной эрозии почв;

- увеличивается площадь потерявших устойчивость и погибших насаждений, идет накопление отмершей древесины;

- резко увеличивается вероятность возникновения вспышек массового размножения вредителей и болезней леса (в первую очередь стволовых насекомых, дереворазрушающих грибов, корневых гнилей). Ряд вредителей и болезней из сапрофитной стадии переходят в паразитную;

- возрастает общий класс пожарной опасности территории, пожары часто переходят в верховой тип, охватывают большие площади и наносят существенный ущерб;

- естественное лесовосстановление существенно затруднено.

Сущность противодействия негативным процессам, предусмотренным сценарием № 3, состоит в выдвигании на первый план защитной, средообразующей роли лесов как основы экологического каркаса в условиях жесткого негативного воздействия изменений климата на лесные экосистемы. Использование лесов для заготовки древесины в этой связи станет играть, по существу, роль побочного пользования. В условиях крайней степени воздействия климатических факторов серьезной проблемой становится поддержание оптимальной лесистости региона, с учетом необходимости сохранения оптимального водного баланса, купирования процессов водной и ветровой эрозии почв. Основным инструментом этих процессов должно стать искусственное лесовосстановление и лесоразведение с использованием последних достижений лесной селекции и биотехнологии.

На основании изучения и кластеризации модельных субъектов Российской Федерации по уровню адаптационного потенциала их лесных экосистем представляется возможным осуществление дифференциации управленческих решений и лесохозяйственных мер по укрупненным территориальным объектам, включающим различные субъекты России, с целью поддержания и усиления адаптационного потенциала лесных экосистем.

Установлено, что содержание и природа устойчивости лесных сообществ, обусловленная климатическими изменениями, возрастом антропогенной нагрузки, а также реакция комплексов лесных экосистем модельных субъектов на изменение абиотических факторов, значительно различаются в региональном аспекте. В некоторых субъектах происходят разнонаправленные изменения, что вызывает необходимость дифференцированного подхода к комплексу управленческих решений и лесохозяйственных мер при выборе стратегии лесоправления.

Многофакторность воздействия климатических изменений и многообразие их последствий для лесных экосистем Российской Федерации предопределяют необходимость разработки и осуществления соответствующих отраслевых адаптационных программ.

Уменьшение уязвимости и подверженности является основной целью программ адаптивного управления. Однако, эффективной разработке и применению адаптивных стратегий в лесном секторе препятствует рассогласованность экономических интересов субъектов лесных отношений. Для построения адекватного адаптационного потенциала, который бы обеспечивал превентивное управление процессами антропогенного изменения климата, необходимы значительные финансовые, технологические, организационные ресурсы. Комплексный подход к разработке адаптационных мер, объединяющий последние научные достижения, технологии и оптимальные управленческие решения, будет способствовать снижению уязвимости общества и экономики к изменениям климата.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках государственного задания Федерального агентства лесного хозяйства от 29.12.2022 г. № 053-00011-23-00 по теме № 2 “Научно-аналитическое и организационно-методическое обеспечение реализации государственной климатической политики в области лесного хозяйства”.

FUNDING

The study was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Forestry Agency dated December 29, 2022 no. 053-00011-23-00 on topic no. 2 “Scientific-analytical, organizational and methodological support for the implementation of the state climate policy in the field of forestry.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Григорьева С.О., Константинов А.В., Школьник И.М. Влияние изменений климата на состав древостоев, их устойчивость и ареалы основных лесообразующих пород // Тр. Санкт-Петербург. науч.-исслед. ин-та лесного хозяйства. 2016. № 3. С. 4–21. <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2016.3.4>
- Демаков Ю.П. Диагностика устойчивости лесных экосистем: методологические и методические аспекты. Йошкар-Ола, 2000. 416 с.
- Замолодчиков Д., Краев Г. Влияние изменений климата на леса России: зафиксированные воздействия и прогнозные оценки // Устойчивое лесопользование. 2016. № 4 (48). С. 23–31.
- Истомин А.В. Некоторые реакции биоты на изменение климата в лесных ландшафтах Каспийско-Балтийского водораздела // Вестн. Рос. гос. ун-та им. И. Канта. 2009. № 7. С. 15–22. <https://doi.org/10.5922/2223-2095-2009-7-2>
- Кашкаров Е.П., Поморцев О.А. Глобальное потепление климата: ритмическая основа прогноза и ее практическое значение в охране лесов Северного полушария // Хвойные бореальной зоны. 2007. Т. 24. № 2–3. С. 207–216.
- Коломыц Э.Г. Региональная модель глобальных изменений природной среды. М.: Наука, 2003. 371 с.
- Константинов А.В. Методология оценки уязвимого лесного сектора экономики в условиях изменения климата // Тр. Санкт-Петербург. науч.-исслед. ин-та лесного хозяйства. 2014. № 3. С. 73–77.
- Константинов А.В., Бурцев Д.С. Изучение и оценка динамики продуктивности лесов Российской Федерации в период с 1961 по 2011 год // Тр. Санкт-Петербург. науч.-исслед. ин-та лесного хозяйства. 2013. № 4. С. 5–24.
- Константинов А.В., Матвеев С.М. Методический подход к оценке адаптационного потенциала лесных экосистем Российской Федерации // Тр. Санкт-Петербург. науч.-исслед. ин-та лесного хозяйства. 2020. № 2. С. 14–33. <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2020.2.14>
- Матвеев С.М. Цикличность прироста сосновых древостоев Центральной лесостепи в 11-летнем цикле солнечной активности // Лесной журн. 2005. № 1–2. С. 15–22.
- МГЭИК, 2021: Резюме для политиков. В: Изменение климата, 2021 год: Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Шестой оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата / ред. В. Массон-Дельмотт, М.П. Чжай, А. Пирани, С.Л. Коннорс, К. Пеан, С. Бергер, Н. Кауд, Ю. Чэнь, Л. Гольдфарб, М.И. Гомис, М. Хуан, К. Лейтцелл, Э. Лонной, Дж.Б. Мэтьюз, Т.К. Мэйкок, Т. Уотерфилд, О. Йелекчи, Р. Ю, Б. Чжоу. Cambridge: Cambridge Univ. Press; New York, 2021. 48 с. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Миронов А.Г. Динамика лесных экосистем юга Средней Сибири в условиях изменяющегося климата и активации биотического воздействия: Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. Красноярск: СибГТУ, 2007. 23 с.
- Семёнов М.А., Высоцкий А.А., Пашенко В.И. Прогноз адаптивных приспособлений в лесном хозяйстве в связи с возможными климатическими изменениями // Изв. ВУЗов. Лесной журн. 2019. № 5 (371). С. 57–69. <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.57>
- Сергиенко В.Г., Константинов А.В. Прогноз влияния изменения климата на разнообразие природных экосистем и видов флористических и фаунистических комплексов биоты России // Тр. Санкт-Петербург. науч.-исслед. ин-та лесного хозяйства. 2016. № 2. С. 29–44. <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2016.2.27>
- Хантемиров Р.М., Сурков А.Ю., Горланова Л.А. Изменение климата и формирование возрастных поколений лиственницы на полярной границе леса на Ямале // Экология. 2008. № 5. С. 323–328.
- Харук В.И., Двинская М.Л., Им С.Т., Рэнсон К.Дж. Древесная растительность экотона лесотундры Западного Саяна и климатические тренды // Экология. 2008. № 1. С. 10–15.
- Чебакова Н.М., Рейфельдт Дж., Парфенова Е.И. Перераспределение растительных зон и популяций лиственницы сибирской и сосны обыкновенной в Средней Сибири при потеплении климата // Сибирский экол. журн. 2003. № 6. С. 677–686.
- Шиятов С.Г. Динамика древесной и кустарниковой растительности в горах Приполярного Урала под влиянием современных изменений климата. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 215 с.
- Bonan G.B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks and climate benefits of forests // Science. 2008. Vol. 320: 5882. P. 1444–1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- Gamache I., Payette S. Latitudinal response of subarctic tree lines to recent climate change in eastern Canada // J. Biogeography. 2005. Vol. 32. P. 849–862. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2004.01182.x>
- Soja A.J., Tchebakova N.M., French N.H.F., Flannigan M.D., Shugart H.H., Stocks B.J., Sukhinin A.I., Parfenova E.I., Chapin III F.S., Stackhouse Jr. P.W. Climate induced boreal forest change: Predictions versus current observations // Glob. and Planetary Change. 2007. Vol. 56. № 3–4. P. 274–296. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.028>

Scenario Approach to Adaptation of Forest Ecosystems in the Russian Federation under Climate Change

A. V. Konstantinov*

St. Petersburg Forestry Research Institute, St. Petersburg, Russia

*e-mail: konstantinov_a82@mail.ru

Correlations between the quantitative values of abiotic factors associated with climate change and the criteria for the vulnerability of forest ecosystems for 24 model subjects of the Russian Federation have been established. A high degree of closeness of the relationship between climatic parameters and forest fires was revealed for forest ecosystems in the Center and the South of Russia, as well as Eastern Siberia. Using a matrix model for positioning the adaptive potential of a single regional forest ecosystem, clusters with the most vulnerable to climate change groups of regional forest ecosystems were identified. The application of the developed methodology for the analysis of regional complexes of forest ecosystems made it possible to establish that there is a shift in the indicators of their adaptive potential to the lower limit of their sustainability (Arkhangelsk, Leningrad, Voronezh, Tyumen, Irkutsk oblasts, Khanty-Mansi Autonomous Okrug, Khabarovsk krai). Based on the study and clustering of model federal subjects according to the level of adaptive potential, differentiation of management decisions and forestry measures for enlarged territorial objects, including various federal subjects, was carried out in order to maintain and strengthen the adaptive potential of forest ecosystems. Measures for adapting forest ecosystems to climate change can be implemented in the context of three scenarios: forest management with elements of reactive adaptation to climate change for stable forest ecosystems, implementation of the forestry adaptation strategy to climate change for unstable forest ecosystems and restoration and maintenance of ecosystem functions of forests for degrading forest ecosystems.

Keywords: climate change, forest ecosystems, vulnerability, adaptive potential, scenario approach

REFERENCES

- Bonan G.B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks and climate benefits of forests. *Science*, 2008, vol. 320, no. 5882, pp. 1444–1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- Chebakova N.M., Reifel'dt Dzh., Parfenova E.I. Redistribution of vegetation zones and populations of Siberian Larch and Scots Pine in Central Siberia under climate warming. *Sib. Ekol. Zh.*, 2003, no. 6, pp. 677–686. (In Russ.).
- Demakov Yu.P. *Diagnostika ustoichivosti lesnykh ekosistem: metodologicheskie i metodicheskie aspekty* [Diagnosis of the Sustainability of Forest Ecosystems: Methodological and Methodical Aspects]. Ioshkar-Ola, 2000. 416 p.
- Gamache I., Payette S. Latitudinal response of subarctic tree lines to recent climate change in eastern Canada. *J. Biogeogr.*, 2005, vol. 32, pp. 849–862. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2004.01182.x>
- Grigor'eva S.O., Konstantinov A.V., Shkol'nik I.M. The impact of climate change on the composition of forest stands, their stability and areas of the main forest-forming species. *Tr. S.-Peterb. Nauch.-Issled. Inst. Lesn. Khoz.*, 2016, no. 3, pp. 4–21. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2016.3.4>
- IPCC 2021. *Summary for Policymakers. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B., Eds. Cambridge: CUP; New York, 2021, pp. 3–32. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Istomin A.V. Some responses of biota to climate change in forest landscapes of the Caspian-Baltic watershed. *Vestn. Balt. Feder. Univ. im. I. Kanta. Ser.: Estestv. i Med. Nauki*, 2009, no. 7, pp. 15–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.5922/2223-2095-2009-7-2>
- Kashkarov E.P., Pomortsev O.A. Global climate warming: the rhythmic basis of the forecast and its practical significance in the protection of forests in the Northern Hemisphere. *Khvoynye Boreal'noi Zony*, 2007, vol. 24, no. 2–3, pp. 207–216. (In Russ.).
- Khantemirov R.M., Surkov A.Yu., Gorlanova L.A. Climate change and the formation of larch age generations at the polar forest boundary in Yamal. *Ekol.*, 2008, no. 5, pp. 323–328. (In Russ.).
- Kharuk V.I., Dvinskaya M.L., Im S.T., Ranson K.J. Woody vegetation of the Western Sayan forest-tundra ecotone and climate trends. *Ekol.*, 2008, no. 1, pp. 10–15. (In Russ.).
- Kolomyts E.G. *Regional'naya model' global'nykh izmenenii prirodnoi sredy* [Regional Model of Global Environmental Changes]. Moscow: Nauka Publ., 2003. 371 p.
- Konstantinov A.V., Burtsev D.S. Study and assessment of the dynamics of forest productivity in the Russian Federation in the period from 1961 to 2011. *Tr. S.-Peterb. Nauch.-Issled. Inst. Lesn. Khoz.*, 2013, no. 4, pp. 5–24. (In Russ.).
- Konstantinov A.V. Methodology for assessing the vulnerable forest sector of the economy in the context of climate change. *Tr. S.-Peterb. Nauch.-Issled. Inst. Lesn. Khoz.*, 2014, no. 3, pp. 73–77. (In Russ.).
- Konstantinov A.V., Matveev S.M. Methodological approach to assessing the adaptive potential of forest ecosystems in the Russian Federation. *Tr. S.-Peterb. Nauch.-Issled. Inst. Lesn. Khoz.*, 2020, no. 2, pp. 14–

33. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21178/2079-6080.2020.2.14>
- Matveev S.M. Cyclic growth of pine stands in the Central forest-steppe in the 11-year cycle of solar activity. *Iz. Vyssh. Ucheb. Zaved. Lesnoi Zh.*, 2005, no. 1–2, pp. 15–22. (In Russ.).
- Mironov A.G. *Dinamika lesnykh ekosistem yuga Srednei Sibiri v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata i aktivatsii bioticheskogo vozdeistviya* [Dynamics of Forest Ecosystems in the South of Central Siberia under Changing Climate and Activation of Biotic Impact]. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Agric.) Dissertation*. Krasnoyarsk: Sib. St. Tech. Univ., 2007. 23 p.
- Semenov M.A., Vysotskii A.A., Pashchenko V.I. Forecast of adaptive adaptations in forestry due to possible climate change. *Iz. Vyssh. Ucheb. Zaved. Lesnoi Zh.*, 2019, no. 5 (371), pp. 57–69. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.57>
- Sergienko V.G., Konstantinov A.V. Forecast of the impact of climate change on the diversity of natural ecosystems and species of floristic and faunistic complexes of the biota of Russia. *Tr. S.-Peterb. Nauch.-Issled. Inst. Lesn. Khoz.*, 2016, no. 2, pp. 29–44. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21178/2079-6080.2016.2.27>
- Shiyatov S.G. *Dinamika drevesnoi i kustarnikovoï rastitel'nosti v gorakh Pripolyarnogo Urala pod vliyaniem sovremennykh izmenenii klimata* [Dynamics of Tree and Shrub Vegetation in the Mountains of the Subpolar Urals under the Influence of Modern Climate Change]. Ekaterinburg: UrO RAN Publ., 2009. 215 p.
- Soja A.J., Tchebakova N.M., French N.H.F., Flannigan M.D., Shugart H.H., Stocks B.J., Sukhinin A.I., Parfenova E.I., Chapin III F.S., Stackhouse Jr. P.W. Climate induced boreal forest change: Predictions versus current observations. *Glob. Planet. Change*, 2007, vol. 56, no. 3–4, pp. 274–296.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.028>
- Zamolodchikov D., Kraev G. Impact of climate change on Russian forests: recorded impacts and forecasts. *Ustoichivoe Lesopol'zovanie*, 2016, no. 4 (48), pp. 23–31. (In Russ.).