

Недбаев И.С.^{1,2}, Семенова Е.И.¹, Сорока А.О.¹

¹Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства, г. Санкт-Петербург,

²Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Оценка уязвимости лесов к климатическим изменениям

Аннотация. В работе приведена оценка уязвимости лесов к климатическим изменениям в разрезе субъектов Российской Федерации. Разработана методика комплексной оценки уязвимости лесов, состоящая из ретроспективной оценки подверженности лесов рискам, вызванным климатическими изменениями (на основе имеющихся статистических данных), и прогнозной оценки, базирующейся на динамике климатических показателей на середину (2050-е гг.) и конец (2090-е гг.) XXI века. На основании методики для каждого субъекта рассчитан нормированный индекс уязвимости, проведено ранжирование субъектов по степени подверженности климатическим рискам. Произведен анализ уязвимости для каждого из климатических рисков, характерных для лесного хозяйства. Выявлены наиболее подверженные негативному воздействию изменений климата регионы РФ. По результатам ретроспективного анализа, наибольшие суммарные значения нормированного индекса уязвимости характерны для Ивановской, Костромской, Новосибирской областей, Камчатского края. Наибольшая прогнозная уязвимость, связанная с изменением климатических параметров характерна для дальневосточных регионов – Камчатского края, Сахалинской области и Чукотского автономного округа. Данные регионы наиболее сильно подвергаются воздействию негативных климатических изменений, что должно быть отражено в усилении внимания к адаптации лесного хозяйства.

Ключевые слова: климатические риски, адаптация, лесные экосистемы, продуктивность лесов, видовой состав леса, лесные пожары, болезни леса, лесное хозяйство.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания ФБУ «СПбНИИЛХ» по теме «Научно-аналитическое и организационно-методическое обеспечение реализации государственной климатической политики в области лесного хозяйства в 2022 году».

Assessment of the vulnerability of forests to climate change

¹ Federal State-Financed Institution of Higher Education, St. Petersburg

² Forestry Research Institute, St. Petersburg
Saint-Petersburg State University, St. Petersburg

Abstract. This paper presents an assessment of forest vulnerability to climate change in the context of the Russian Federation. The methodology of complex assessment of forest vulnerability, consisting of a retrospective assessment of forest exposure to risks caused by climate change (based on available statistical data) and forecast assessment based on the dynamics of climatic indicators in the mid (2050s) and late (2090s) XXI century, was developed. Based on the methodology, a normalized vulnerability index was calculated for each subject, and subjects were ranked according to their exposure to climatic risks. Vulnerability analysis was carried out for each of the climatic risks characteristic of forestry. The regions of the Russian Federation most exposed to the negative impact of climate change were identified. According to the results of retrospective analysis, the highest total values of the normalized vulnerability index are characteristic of the Ivanovo, Kostroma, Novosibirsk regions and Kamchatka Territory. The greatest predicted vulnerability associated with changes in climatic parameters is characteristic of the Far Eastern regions - Kamchatka Territory, Sakhalin Region and Chukotka Autonomous District. These regions are most severely affected by negative climatic changes, which should be reflected in increased attention to forestry adaptation.

Keywords: climatic risks, adaptation, forest ecosystems, forest productivity, forest species composition, forest fires, forest diseases, forestry.

Acknowledgments

The research was conducted as part of the state assignment of the FBU SPbNIILKh on "Scientific-analytical and organizational-methodological support for the implementation of state climate policy in the field of forestry in 2022".

1. Введение

Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата оказывают существенное влияние на процессы функционирования социально-экономических систем [1]. В частности, наибольшему влиянию подвержены климатозависимые отрасли экономики, такие как сельское, лесное и водное хозяйство [2]. По данным многолетних исследований, в лесах мира уже происходят существенные изменения и, по прогнозным оценкам, воздействие будет усиливаться. По этой причине адаптация лесных экосистем требует особого внимания.

Для разработки эффективных адаптационных решений необходимо понимание, насколько система подвержена рискам, связанным с изменением климата. Понимание уязвимости лесов и связанных с ней факторов имеет

решающее значение для устойчивого управления лесными экосистемами [3]. В методических указаниях ФАО фигурирует определение уязвимости как склонности или предрасположенности к неблагоприятному воздействию [4]. Уязвимость включает в себя множество концепций и элементов, включая чувствительность или восприимчивость к ущербу и отсутствие способности восстанавливать своё состояние и адаптироваться. Устойчивость определяется как способность социальных, экономических и экологических систем справляться с опасным событием, тенденцией или нарушением, реагируя или реорганизуясь таким образом, чтобы сохранить свою основную функцию, идентичность и структуру и при этом способность к адаптации, обучению и трансформации. Устойчивость также учитывается при прогнозировании того, как системы могут реагировать на изменение климата. Таким образом, уязвимость и устойчивость являются взаимосвязанными аспектами воздействия изменения климата на системы: уязвимость отражает ущерб, который может быть нанесен системе изменением климата, а устойчивость отражает способность системы продолжать работу, несмотря на воздействие изменения климата. Хотя это тесно связанные понятия, уязвимость и устойчивость не являются противоположными понятиями, поскольку система может быть как уязвимой к изменению климата, так и устойчивой, если она способна восстанавливаться от ущерба, вызванного изменением климата, и адаптироваться к нему.

Уязвимость и устойчивость можно проанализировать, рассмотрев воздействие на систему. Воздействия часто характеризуются тремя параметрами: воздействие потенциально разрушительного климата или погоды; чувствительность системы к этому воздействию и способность системы адаптироваться после того, как воздействие произошло. Подходы к оценке уязвимости можно классифицировать в соответствии с направленностью, которую каждый из них обеспечивает. Контекстная уязвимость затрагивает текущие проблемы климата и обычно оценивается с использованием методов участия людей, которые живут в лесах или работают с ними. Итоговая уязвимость рассматривает биофизическую уязвимость лесов; она часто используется для оценки причинно-следственных связей изменения климата с биологической системой. Существует ряд подходов к оценке уязвимости лесов к изменению климата. Они могут быть сгруппированы в следующие категории в зависимости от типа информации, которая используется или генерируется при оценке: экспертное мнение, ретроспективный анализ, состояние леса и жизненные признаки, климатические модели, и физиологические модели.

Оценка уязвимости лесов к изменению климата характеризует биофизическое воздействие климата на структуру леса и/или функцию леса. Биофизический эффект – это биологическая реакция на физическую среду, которая, в первую очередь, касается воздействия на породы деревьев и другие виды растений температуры, воды (в виде осадков или наличия влаги в почве) или концентрации атмосферного CO₂. При выборе подхода к оценке уязвимости лесов на региональном уровне МГЭИК рекомендует использовать информацию об исторической среднегодовой сезонной температуре и осадках, т. е.

вероятность температуры и осадков, выходящих за пределы определенного диапазона, основанного на текущем климате и будущем климате, сценарии, данные об изменениях в видовом составе, а также информацию о гибели насаждений от пожаров и от повреждений насекомыми и болезнями [5]. Для любого оцениваемого аспекта анализ биофизической уязвимости должен предоставлять информацию о прогнозируемых воздействиях изменения климата, чувствительности к климатическим факторам и способности адаптироваться к изменению климата.

Оценкой уязвимости лесов к климатическим изменениям занимались учёные из различных стран, представляя в научных публикациях свой региональный опыт определения уязвимости лесов: Т.Д. Timberlake и С.А. Schultz в США [6], S. Choi¹, W.-K. Lee¹, D.-A. Kwak¹, S. Lee¹, Y. Son¹, J.-H. Lim в Республике Корея, J. Saborowski в Германии, J. Coll, J. Sweeney в Ирландии, G.S. Smith, F. Ascuí, A.P. O'Grady, E. Pinkard в Австралии и др. В Российской Федерации активно тематику адаптации лесов к изменению климата и оценки уязвимости развивают сотрудники ФБУ «СПбНИИЛХ» и ЦЭПЛ РАН.

Цель настоящего исследования заключалась в оценке уязвимости лесов Российской Федерации к климатическим изменениям в разрезе субъектов. Практическая значимость проведённого исследования состоит в формировании ранжированного перечня регионов для определения наиболее уязвимых к рискам, вызванным климатическими изменениями и проявляющимся в негативных последствиях для состояния лесов. Следствием полученных в работе выводов может являться определение вектора будущих управленческих решений в сфере адаптации лесов к климатическим изменениям на региональном уровне.

2. Материалы и методы

Для оценки уязвимости лесов территории субъектов Российской Федерации к рискам, вызванным климатическими изменениями, был разработан авторский методологический подход на основе рекомендаций ФАО, МГЭИК и разработок ФБУ «СПбНИИЛХ» (таблица 1). Подход заключается в комплексной оценке уязвимости, которая состоит из ретроспективной оценки подверженности лесов рискам, вызванным климатическими изменениями (на основе имеющихся статистических данных), и прогнозной оценки динамики климатических показателей на 50-е и 90-е гг. XXI века [7].

Для ретроспективной оценки было изучено проявление всех рисков, вызванных климатическими изменениями, характерных для лесов (таблица 1) и предложены экосистемные показатели, основанные на имеющихся статистических данных лесного сектора, и климатические показатели, характеризующие проявления рисков (таблица 2). За ретроспективную оценку принималось сравнение динамики двух пятилетних периодов (с 2013 по 2018 год и с 2018 по 2022). Данное разделение, помимо изучения десятилетней динамики, также позволит ознакомиться с проявлением климатических изменений в лесах до введения на федеральном уровне в лесное планирование адаптационных мер и мероприятий в лесах и после.

Таблица 1. Риски, вызванные климатическими изменениями, и описание уязвимости для лесов, возникающей в результате проявления рисков

Риск, вызванный климатическими изменениями	Описание уязвимости
Изменение продуктивности лесов в связи с изменениями средних значений температуры и количества выпадаемых осадков	<p>Вследствие устойчивого потепления климата и изменения режима увлажнения, продуктивность лесов может, как увеличиваться (за счет изменения продолжительности вегетационного периода, сроков вегетации и усиления фотосинтетической активности), так и уменьшаться (вследствие засухи или заболачивания территории) [8].</p> <p>Рост средних значений температуры приводит к изменению теплообеспеченности территории, что отражают такие показатели как сумма активных температур воздуха (сумма температур выше 10°C) и длительность вегетационного периода (количество дней с температурой выше 10°C).</p> <p>Изменение количества выпадаемых осадков сказывается на влагообеспеченности территории, что отражает значение гидротермического коэффициента Селянинова. (отношение суммы осадков в мм за период со среднесуточными температурами воздуха выше 10°C к сумме температур за это же время).</p> <p>Изменение продуктивности сказывается на запасе лесных насаждений на единицу площади, которое можно определить по динамике общего среднего прироста на гектар.</p>
Изменения в видовом (породном) составе лесов	<p>На видовой состав лесов оказывают влияние различные климатические факторы: изменение средней температуры воздуха (отражает показатель суммы активных температур), гидрологического режима территории (гидротермический коэффициент Селянинова) [9].</p> <p>Смена видового состава лесов отражается в изменении соотношения площади лесных насаждений, занимаемых той или иной группой (например, соотношением хвойных, твердолиственных и мягколиственных древесных пород).</p>
Увеличение частоты возникновения (лесных) пожаров в лесах и площадей, пройденных пожарами Увеличение частоты вспышек массового размножения вредных организмов в лесах	<p>Рост частоты возникновения лесных пожаров обусловлен повышением температуры воздуха и уменьшением количества выпадаемых осадков. Комплексный показатель пожарной опасности в лесах (показатель Нестерова) вычисляется на основе данных о температуре воздуха, температуре точки росы, количестве выпавших осадков.</p> <p>Среди экосистемных показателей, отражающих пожароопасную ситуацию в лесах, стоит выделить площадь, пройденную огнем и число пожаров за период [10].</p> <p>Увеличение вспышек массового размножения насекомых и болезней леса происходит вследствие создания благоприятных условий для размножения насекомых вредителей (оптимальная температура и влажность), а также ослабления древостоя.</p> <p>Наиболее комплексным для оценки уязвимости является значение гидротермического коэффициента Селянинова [11].</p> <p>Последствия вспышек массового размножения вредных насекомых и болезней леса отражает показатель средней площади очагов вредных организмов в исследуемый период, соотношение средней площади очагов вредных организмов к площади неповрежденных лесных насаждений.</p>
Увеличение частоты проявления последствий экстремальных погодных явлений в лесах	<p>Изменение климата ведет к увеличению частоты проявления экстремальных погодных явлений, которое может привести к гибели и повреждениям лесных насаждений. К экстремальным погодным явлениям относится засуха, сильные атмосферные осадки, наводнения, ураганы, смерчи, сильный ветер, которые обусловлены увеличением температуры и количества осадков.</p>

Риск, вызванный климатическими изменениями	Описание уязвимости
	Высокая уязвимость лесов будет характеризовать увеличение площадей гибели лесных насаждений от экстремальных погодных условий и почвенно-климатических факторов.

Таблица 2. Используемые показатели для расчёта нормированного индекса уязвимости

Риск, вызванный климатическими изменениями	Климатические показатели	Экосистемные показатели
Изменение продуктивности лесов в связи с изменениями средних значений температуры и количества выпадаемых осадков	Сумма активных температур воздуха Длительность вегетационного периода Гидротермический коэффициент Селянинова	Динамика среднего прироста на гектар
Изменения в видовом (породном) составе лесов	Сумма активных температур воздуха Гидротермический коэффициент Селянинова	Динамика соотношения площади лесов по группам пород (хвойные, твердолиственные, мягколиственные)
Увеличение частоты возникновения (лесных) пожаров в лесах и площадей, пройденных пожарами	Число суток комплексного показателя Нестерова более 2	Динамика средней ежегодной площади, пройденной огнём, за период Динамика среднего ежегодного числа пожаров за период
Увеличение частоты вспышек массового размножения вредных организмов в лесах	Гидротермический коэффициент Селянинова	Динамика среднего процента площади очагов вредных организмов к площади лесных земель за период; Динамика средней площади очагов вредных организмов за период.
Увеличение частоты проявления последствий экстремальных погодных явлений в лесах	Среднегодовая температура Среднегодовая сумма осадков	Динамика общей площади лесов, погибших от экстремальных погодных условий и почвенно-климатических факторов

Каждый показатель нормировался по методу MIN-MAX, чтобы представить выборку в численных значениях от 0 до 1. Таким образом, субъект Российской Федерации, в котором наиболее значительно был проявлен риск (например, была площадь пожаров наибольшей), получал значение показателя 1, а где негативные последствия были минимальными – значение показателя 0. При наличии нескольких показателей, характеризующих проявление одного риска (например, сумма активных температур воздуха и длительность вегетационного периода совместно сказываются на продуктивности лесов), нормированные значения нескольких показателей усреднялись. Полученный показатель получил название нормированный индекс уязвимости (к конкретному риску, вызванному климатическими изменениями).

Таким образом, при сопоставлении ретроспективной оценки (подверженность лесов риску) и прогнозной оценке (интенсивность климатических изменений в регионе) можно сделать вывод о масштабах

ожидаемых климатических изменений и негативных последствий для лесов. Было принято решение классифицировать субъекты Российской Федерации по трём уровням уязвимости: высокий, средний и низкий. Разделение по уровням происходило следующим образом: к высокому уровню уязвимости причислялись субъекты, имеющие значение нормированного индекса уязвимости выше 75-го квартиля; к среднему уровню уязвимости – от 25-го до 75 квартиля; к низкому – ниже 25-го квартиля.

Определение общей уязвимости субъектов Российской Федерации к рискам, вызванным климатическими изменениями, необходимо для решения стратегических вопросов адаптации лесов России к климатическим изменениям, поскольку позволяет взглянуть комплексно на устойчивость и уязвимость лесных насаждений к пяти изученным рискам. Методологической основой общей уязвимости является балльная система на основе ранжирования субъектов к отдельным рискам, описанного выше. Математически схема определения общей уязвимости выглядит следующим образом:

$$U = \text{Пр} + \text{Пор} + \text{Пож} + \text{Нас} + \text{ЭПЯ}, \text{ где}$$

U – балльный индекс уязвимости лесов к рискам, вызванным климатическими изменениями, баллы;

Пр – ранг уязвимости лесов к риску изменения продуктивности лесов в связи с изменениями средних значений температуры и количества выпадаемых осадков, баллы;

Пор – ранг уязвимости лесов к риску изменения в видовом (породном) составе лесов;

Пож – ранг уязвимости лесов к риску увеличения частоты возникновения (лесных) пожаров в лесах и площадях, пройденных пожарами, баллы;

Нас – ранг уязвимости лесов к риску увеличения частоты вспышек массового размножения вредных организмов в лесах, баллы;

ЭПЯ – ранг уязвимости лесов к риску увеличения частоты проявления последствий экстремальных погодных явлений в лесах, баллы.

Ранг уязвимости лесов определяется по следующей схеме: высокая уязвимость – 2 балла, средняя уязвимость – 1 балл, низкая уязвимость – 0 баллов.

Таким образом, балльный индекс уязвимости лесов к рискам, вызванным климатическими изменениями, может варьироваться в пределах от 0 (низкая уязвимость ко всем рискам) до 10 (высокая уязвимость ко всем рискам). Данная система ранжирования позволит разделить все субъекты на 11 классов (хотя при практической реализации субъекты оказались разделены на 9 классов при ретроспективной оценке и 7 классов для прогнозных значений), что будет целесообразно использовать при планировании адаптационных мер и финансировании адаптационных мероприятий на федеральном уровне.

3. Результаты

В табл. 3 представлены результаты ранжирования субъектов Российской Федерации по балльному индексу уязвимости лесов к рискам, вызванным климатическими изменениями.

Таблица 3. Ранжирование субъектов Российской Федерации по балльному индексу уязвимости лесов к рискам, вызванным климатическими изменениями

Значение балльного индекса уязвимости, баллы	Субъекты Российской Федерации		
	ретроспективная оценка	прогноз на 50-е гг. XXI века	прогноз на 90-е гг. XXI века
9	Ивановская область		
	Камчатский край		
	Костромская область	-	-
	Новосибирская область		
8	Республика Адыгея		
	Амурская область		
	Московская область	Камчатский край	Камчатский край
	Республика Калмыкия	Сахалинская область	Чукотский автономный округ
	Республика Саха Якутия	Чукотский автономный округ	
7	Свердловская область		
	Томская область		
	Калужская область		Донецкая народная Республика
	Краснодарский край		Запорожская область
	Красноярский край		Краснодарский край
	Магаданская область		Луганская народная Республика
	Ненецкий автономный округ		Ненецкий автономный округ
	Пензенская область	Еврейская автономная область	Пермский край
	Республика Башкортостан	Кировская область	Республика Адыгея
	Республика Дагестан	Республика Крым	Республика Ингушетия
	Республика Ингушетия	Свердловская область	Республика Коми
	Республика Карелия	Чеченская Республика	Республика Северная Осетия — Алания
	Республика Тыва		Ростовская область
	Тюменская область		Сахалинская область
	Ульяновская область		Ставропольский край
Челябинская область		Удмуртская Республика	
6	Ямало-Ненецкий автономный округ		Херсонская область
	Алтайский край	Донецкая народная Республика	
	Владимирская область	Запорожская область	
	Волгоградская область	Кабардино-Балкарская Республика	Астраханская область
	г. Севастополь	Калининградская область	Кабардино-Балкарская Республика
	Донецкая народная Республика	Карачаево-Черкесская Республика	Карачаево-Черкесская Республика
	Запорожская область	Краснодарский край	Кировская область
	Иркутская область	Луганская народная Республика	Мурманская область
	Кабардино-Балкарская Республика	Магаданская область	Республика Калмыкия
	Республика	Мурманская область	Республика Крым
	Карачаево-Черкесская Республика	Нижегородская область	Республика Марий Эл
	Луганская народная Республика	Омская область	Томская область
	Приморский край	Приморский край	Чеченская Республика
	Республика Алтай	Республика Адыгея	
Республика Крым	Республика Алтай		
Республика Хакасия			

Значение балльного индекса уязвимост и, баллы	Субъекты Российской Федерации		
	ретроспективная оценка	прогноз на 50-е гг. XXI века	прогноз на 90-е гг. XXI века
	Ростовская область Саратовская область Сахалинская область Удмуртская Республика Хабаровский край Ханты Мансийский автономный округ Херсонская область Чукотский автономный округ	Республика Калмыкия Республика Карелия Республика Коми Республика Северная Осетия — Алания Республика Хакасия Ростовская область Ставропольский край Ханты-Мансийский автономный округ Херсонская область Чувашская Республика	
5	Архангельская область Брянская область Воронежская область Еврейская автономная область Ленинградская область Мурманская область Омская область Псковская область Республика Коми Республика Марий Эл Республика Северная Осетия — Алания Республика Татарстан Рязанская область Тульская область Чеченская Республика	Алтайский край Астраханская область Кемеровская область Красноярский край Ненецкий автономный округ Новосибирская область Пермский край Псковская область Республика Дагестан Республика Ингушетия Республика Марий Эл Республика Саха (Якутия) Республика Тыва Тюменская область Удмуртская Республика Ульяновская область Ярославская область	Алтайский край Белгородская область Волгоградская область Вологодская область Воронежская область Еврейская автономная область Ивановская область Калининградская область Кемеровская область Костромская область Курганская область Липецкая область Нижегородская область Новосибирская область Омская область Приморский край Республика Алтай Республика Дагестан Республика Татарстан Республика Тыва Республика Хакасия Самарская область Свердловская область Ханты-Мансийский автономный округ Чувашская Республика
4	Белгородская область Вологодская область Калининградская область Кемеровская область Кировская область Курская область Липецкая область Нижегородская область Новгородская область Оренбургская область Тамбовская область Чувашская Республика Смоленская область	Амурская область Архангельская область Белгородская область Брянская область Вологодская область Воронежская область Ивановская область Костромская область Курганская область Ленинградская область Новгородская область Оренбургская область	Архангельская область Брянская область Забайкальский край Красноярский край Курская область Ленинградская область Орловская область Псковская область Республика Башкортостан Республика Карелия Саратовская область Тамбовская область Тюменская область

Значение балльного индекса уязвимост и, баллы	Субъекты Российской Федерации		
	ретроспективная оценка	прогноз на 50-е гг. XXI века	прогноз на 90-е гг. XXI века
		Республика Башкортостан Республика Татарстан Самарская область Саратовская область Тверская область Хабаровский край Ямало-Ненецкий автономный округ	Ульяновская область Челябинская область Ямало-Ненецкий автономный округ Ярославская область
3	Забайкальский край Курганская область Орловская область Пермский край Республика Бурятия Республика Мордовия Тверская область	Владимирская область Волгоградская область Иркутская область Курская область Липецкая область Московская область Орловская область Пензенская область Республика Бурятия Смоленская область Тамбовская область Томская область Тульская область Челябинская область	Амурская область Владимирская область Калужская область Московская область Новгородская область Оренбургская область Пензенская область Республика Мордовия Республика Саха (Якутия) Рязанская область Тверская область Тульская область Хабаровский край
2	Самарская область	Забайкальский край Калужская область Республика Мордовия Рязанская область	Иркутская область Магаданская область Республика Бурятия Смоленская область
1	Ярославская область	-	-

На рисунке 1 представлены схемы пространственной дифференциации субъектов Российской Федерации по нормированному индексу уязвимости лесов к рискам, вызванным климатическими изменениями.

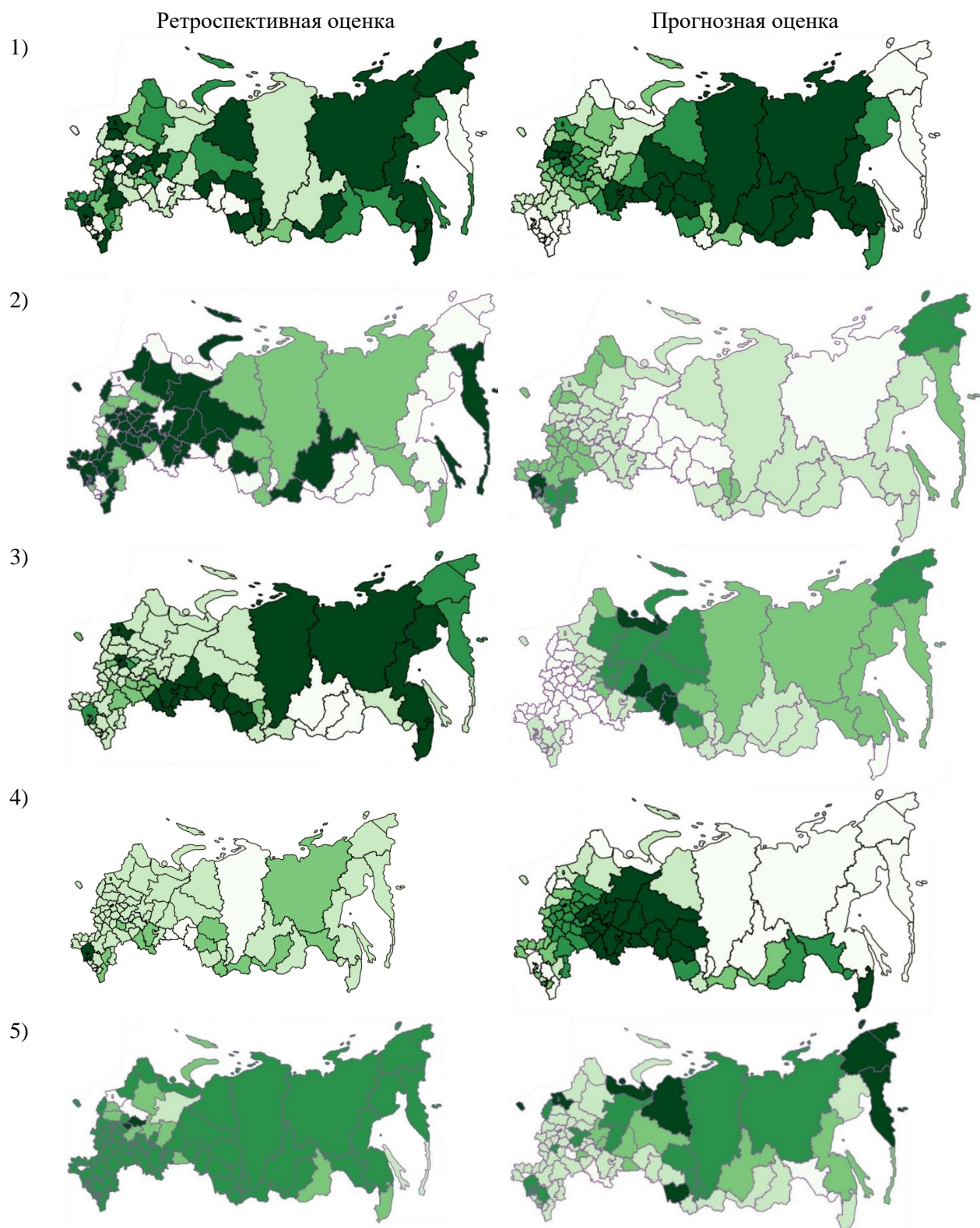


Рисунок 1. Схемы пространственной дифференциации субъектов Российской Федерации по нормированному индексу уязвимости лесов к рискам вызванным климатическими изменениями: 1 – изменение продуктивности лесов в связи с изменениями средних значений температуры и количества выпадаемых осадков, 2 – изменения в видовом (породном) составе лесов, 3 – увеличение частоты возникновения (лесных) пожаров в лесах и площадей, пройденных пожарами, 4 – увеличение частоты вспышек массового размножения вредных организмов в лесах, 5 – увеличение частоты проявления последствий экстремальных погодных явлений в лесах. Интенсивность цвета обозначает более высокие значения нормированного индекса уязвимости

4. Дискуссия

Уязвимость к риску изменения продуктивности лесов в связи с изменениями средних значений температуры и количества выпадаемых осадков

Как можно видеть из прогнозируемых значений, наибольшее изменение нормированного индекса продуктивности характерно, в первую очередь, для прибрежных регионов и северо-востока, юго-запада и северо-запада России. Высокие значения отмечаются в целом по всей территории Европейской части России (за исключением Московской, Рязанской, Тульской и Владимирской областей), и на юге Сибири. Рост данного показателя обусловлен прогнозируемым увеличением температуры и осадков для данных регионов.

Учет влагообеспеченности включает в себя гидротермический коэффициент (ГТК) Селянинова. Наиболее выражено уменьшение влажности прогнозируется для континентальных регионов Урала, центра Западной Сибири и Поволжья. Сильнее всего данный показатель будет расти в ЮФО (максимально в Краснодарском крае и Адыгее), в СЗФО, в некоторых субъектах СКФО (максимум в Ставропольском крае и р. Дагестан), в некоторых регионах СФО (р. Хакассия, Алтайский край, Красноярский край, Иркутская и Кемеровская области).

Наиболее подверженными негативным тенденциям климатических изменений, согласно прогнозам, окажутся регионы Сибири и Дальнего Востока, Урала и континентальной части ЕЧР. Низкие значения нормированного индекса уязвимости для регионов Сибири и Дальнего Востока связаны с невысоким относительно других субъектов ростом суммы активных температур (в среднем на 377 к 2050 г. и 821 к 2090 г., в среднем по России – 508 и 1038 соответственно). Минимальные значения суммы активных температур в Красноярском крае (201,4 на 2050 г. и 501,7 на 2090 г.) и Якутии (242,4 на 2050 г. 539,7 на 2090). Соответственно, длительность вегетационного периода также увеличивается менее интенсивно, чем на остальной территории РФ.

Потепление на территориях Урала будет выражено несколько сильнее (в среднем, 439.8 на 2050 г. и 992.3 на 2090 г.), но, при этом, прогнозируется уменьшение влажности. Значения ГТК Селянинова уменьшатся и составит в среднем -0.13 и – 0.32 на середину и конец века, при среднероссийских – 0.01 и -0.02 соответственно. Похожая картина наблюдается в регионах Поволжья, изменения суммы активных температур (в среднем 554.4 и 1127), ГТК Селянинова – -0.08 и -0.15. Данные тенденции свидетельствуют о возможных засухах, что негативно отразится на приросте древостоя.

Регионы в ЦФО, подверженные негативным тенденциям климатических изменений – Московская, Владимирская, Калужская, Рязанская, Смоленская, Тульская, и Тверская области характеризуются низкими значениями роста температуры и длительности вегетационного периода, с небольшим изменением (-0.04 – 0.01) ГТК Селянинова.

Уязвимость к риску изменения в видовом (породном) составе лесов

Согласно ретроспективному анализу (на основе данных 2013–2022 гг.), Европейская часть России наиболее подвержена риску изменения породного состава. В 46 субъектах Российской Федерации уже наблюдается замещение

хвойных и твёрдолиственных пород на мягколиственные. Наиболее устойчивыми регионами, где наблюдается рост площадей покрытых хвойными и твёрдолиственными породами, являются Брянская, Липецкая, Орловская, Ярославская, Ленинградская, Мурманская, Новгородская, Кировская, Оренбургская, Курганская, Омская и Магаданская области, Республики Кабардино-Балкария, Северная Осетия, Хакасия, Бурятия, Ставропольский, Алтайский, Забайкальский и Хабаровский края и Ненецкий и Чукотский автономные округа. Из полученных схем (рисунки) следует, что наиболее уязвимыми регионами для риска изменения породного состава лесов в 50-х и 90-х гг. XXI будут являться Чукотский и Ненецкий автономные округа и Краснодарский край. Ожидается, что Южный федеральный округ окажется наиболее уязвимым к риску смены пород, в особенности Краснодарский край, Республика Адыгея и Республика Дагестан.

В Краснодарском крае за последние 10 лет площадь хвойных лесов снизилась на 200 га, а твёрдолиственных – на 500 га; площадь мелколиственных увеличилась на 300 га. Данные значения не очень велики по сравнению с общероссийскими изменениями, однако в этом регионе ожидается увеличение к концу XXI века суммы активных температур на 1500, что является самым значительным изменением по России и что будет, несомненно, сказываться на породном составе, а гидротермический коэффициент Селянинова увеличится на 0,4. В Республике Адыгея гидротермический коэффициент тоже увеличится на 0,4 к концу века, а сумма активных температур увеличится на 1200. В Республике Дагестан сумма активных температур увеличится на 1400, а ГТК Селянинова увеличится на 0,1. Рекомендуется обратить внимание на меры адаптации лесов к риску смены породного состава в Южном федеральном округе.

Уязвимость к риску увеличения частоты возникновения (лесных) пожаров в лесах и площадей, пройденных пожарами

Ретроспективная оценка уязвимости лесов к риску увеличения частоты возникновения (лесных) пожаров в лесах и площадей, пройденных пожарами показал, что наиболее чувствительными регионами является Республика Саха (Якутия), Красноярский край, Хабаровский край, Курганская область, Челябинская область, Свердловская область, Омская область, Республика Башкортостан, Тюменская область, Магаданская область, Новосибирская область, Алтайский край, Приморский край, Оренбургская область, Московская область, Ленинградская область, Владимирская область, Чукотский автономный округ, Камчатский край, Краснодарский край, Саратовская область, Ульяновская область, Воронежская область и Кемеровская область, а наиболее устойчивыми регионами являются Забайкальский край, Иркутская область и Республика Бурятия.

По прогнозным показателям сохраняется высокая уязвимость в Уральском федеральном округе, а также высокая уязвимость отмечается в регионах: Ханты-Мансийский автономный округ, Республика Коми, Архангельская область, Чукотский автономный округ и Камчатский край, Пермский край, Кировская область и Омская область.

Наиболее уязвимыми регионами для риска увеличения частоты возникновения (лесных) пожаров в лесах и площадей, пройденных пожарами, в 50-х и 90-х гг. XXI будут Свердловская область и Тюменская область. Рекомендуются обратить внимание на адаптационные мероприятия к риску увеличения частоты возникновения лесных пожаров. Наименее подверженным риску является Центральный и Приволжский федеральный округ.

Уязвимость к риску увеличения частоты вспышек массового размножения вредных организмов в лесах

Максимальные значения нормированного индекса уязвимости отмечены в Краснодарском крае и связаны с существенным увеличением площади очагов вредных организмов (549 тыс. га). Существенный рост площади очагов вредных организмов отмечен и в р. Башкортостан (321 тыс. га), и Якутии (150 тыс. га), Новосибирской обл. (59 тыс. га). Минимальные значения – в Омской области, что связано со значительным уменьшением площади очагов вредных организмов (508 тыс. га).

На фоне остальных субъектов выделяется Красноярский край – низкие значения нормированного индекса уязвимости за период 2013 – 2022 гг. обусловлен значительным уменьшением негативных тенденций (уменьшение площади очагов вредных организмов на 238 тыс. га).

Засушливая погода способствует развитию вредителей леса. Засуха с мая по июль создает благоприятные условия для весенне-летней группы листо- и хвоегрызущих вредителей. Засушливая погода июля — сентября создает благоприятные условия для развития вредителей, питающихся в эти месяцы. Вспышкам массового размножения после засухи может наиболее быстро реализоваться у вредителей с двойной генерацией, которые могут нанести первые сильные повреждения через 1,5 года, несколько медленнее у вредителей с однолетней генерацией и растянутым периодом личиночной стадии (до 3— 4 лет). Таким образом, уменьшение значения ГТК Селянинова служит основой для выявления уязвимости субъекта к данному риску.

Наибольшие значения нормированного индекса уязвимости отмечены для регионов Поволжья, Урала и юга Западной Сибири. Также негативные тенденции прогнозируются для Приморского края.

Уязвимость к риску увеличения частоты проявления последствий экстремальных погодных явлений в лесах

Значительная территория Российской Федерации находится под серьёзным влиянием риска увеличения частоты проявления последствий экстремальных погодных явлений в лесах. Причём, проявления данного риска увеличиваются в динамике за последние 10 лет. Исключение составляют лишь регионы, где с 2013 по 2015 гг. были значительные площади погибших лесных насаждений, но в последние годы они в разы сократились (Ленинградская область, Санкт-Петербург, Вологодская область). Возможно, в этом сыграли свою роль адаптационные мероприятия к риску увеличения частоты проявления экстремальных погодных явлений. Наиболее стремительные климатические изменения (по значениям температуры и осадков) ожидаются на Урале и на Дальнем Востоке (потепление на 2–3 °С к середине XXI века), что

контрастирует с ретроспективной оценкой, которая демонстрирует, что именно в Центральной части России была наиболее интенсивной динамика увеличения площадей погибших лесов от погодных условий (Костромская область – увеличение площади погибших лесов за 10 лет на 2000 га, Ивановская область – на 1000 га).

К 90-м гг. XXI увеличится уязвимость отдельных регионов Российской Федерации в сравнении с прогнозом на 50-е гг. Данная ситуация типична для Ленинградской области и Санкт-Петербурга, Ненецкого автономного округа, Алтайского края и Камчатского края. Особенно уязвимыми уже к 50-м гг. XXI века будут Калининградская область, Ямало-Ненецкий и Чукотский автономные округа. Наименьшие изменения, по прогнозам, будут в Амурской, Оренбургской и Пензенской области. Южный и Северо-Кавказский федеральные округа имеют незначительную динамику температуры и осадков на середину XXI века, но к 90-ым гг. тенденция изменения температуры и осадков достигнет общероссийских значений (повышение температуры на 3 °С и увеличение количества осадков на 0,1 мм/сут). При этом можно заметить, что на конец XXI века увеличивается нормированный индекс уязвимости для северных регионов в сравнении с прогнозом на 50-е гг. (Мурманская и Архангельская области, Республики Коми, Карелия, Якутия, Красноярский край). Рекомендуется обратить внимание на реализацию мер адаптации в северных регионах нашей страны (в особенности, Чукотский и Ямало-Ненецкий автономные округа).

5. Заключение

В проведённой оценке уязвимости были обобщены имеющиеся научные данные в рамках предложенного методологического подхода, рассчитан нормированный и балльный индексы уязвимости лесов для всех субъектов Российской Федерации. На основе полученных значений были определены наиболее чувствительные субъекты РФ к рискам, вызванным климатическими изменениями, и, соответственно, нуждающиеся в планировании подходящих адаптационных мероприятий.

По результатам анализа, максимальное значение балльного индекса уязвимости (9 баллов) в ретроспективной оценке по всем 5 рискам определено в Новосибирской, Ивановской, Костромской областях, Республике Адыгея, Камчатском крае. По прогнозным показателям наиболее уязвимыми регионами к середине XXI века окажутся Камчатский край, Сахалинская область, Чукотский автономный округ, к концу века – Камчатский край и Чукотский автономный округ. Наименее значительными для лесов изменения климата к середине века будут в Забайкальском крае, Калужская области, Республике Мордовия, Рязанской области, и к концу века – в Иркутской, Магаданской, Смоленской областях и Республике Бурятия.

Своевременное проведение адаптационных мероприятий в лесном хозяйстве с учетом прогнозных значений при планировании позволит снизить ущерб от негативных проявлений изменения климата.

Список литературы

1. Росгидромет 2022 Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. Санкт-Петербург: Научно-исследовательский институт лесного хозяйства. 124 с.
2. Константинов А В 2014 Методология оценки уязвимости лесного сектора экономики в условиях изменения климата. Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства 3 С.73–77.
3. Липка О Н, Корзухин М Д и Замолодчиков М Г 2021 Роль лесов в адаптации природных систем к изменениям климата. *Лесоведение*. 5 С. 531–546.
4. FAO 2018 A review of existing approaches and methods to assess climate change vulnerability of forests and forest-dependent people. Forestry Working Paper No. 5. Rome, FAO. 80 pp.
5. IPCC WGII Sixth Assessment Report 2022 Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. 3676 с.
6. Timberlake T J and Schultz C A Climate Change Vulnerability Assessment for Forest Management: The Case of the U.S. Forest Service. *Forests*. 10(11):1030 DOI: 10.3390/f10111030
7. Климатический центр Росгидромета. Сценарные прогнозы на основе региональной модели. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/ru/klimat/lf-hr>
8. Kai X, Wang X, Jiang C and Sun O J 2020 Assessing the vulnerability of ecosystems to climate change based on climate exposure, vegetation stability and productivity. *Forest Ecosystems*. 7:23.
9. [9]Прожерина Н А, Наквасина Е Н 2022 Изменение климата и его влияние на адаптацию и внутривидовую изменчивость хвойных пород Европейского севера России. *Известия вузов. Лесной журнал* 2 С. 9–25.
10. Byun J, Lee W-K, Choi S, Oh S, Yoo S, Kwon T, Sung J and Woo J 2012 Vulnerability Assessment for Forest Ecosystem to Climate Change Based on Spatio-temporal Information. *Korean Journal of Remote Sensing* 1(28) pp.159–169.
11. Исаев А С, Пальникова Е Н, Суховольский В Г и Тарасова О В 2015 Динамика численности лесных насекомых-филлофагов: модели и прогнозы. Москва: Товарищество научных изданий КМК. 262 с.

References

1. Roshydromet 2022 Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General summary. St. Petersburg: Science-Intensive Technologies. 124 с.
2. Konstantinov A.V. 2014 Methodology of forest sector vulnerability assessment in the context of climate change. Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry 3 P.73-77.
3. Lipka O N, Korzukhin M D and Zamolodchikov M G 2021 The role of forests in the adaptation of natural systems to climate change. *Forest Science*. 5 С. 531-546.

4. FAO 2018 A review of existing approaches and methods to assess climate change vulnerability of forests and forest-dependent people. Forestry Working Paper No. 5. Rome, FAO. 80 pp.
5. IPCC WGII Sixth Assessment Report 2022 Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. 3676 c.
6. Timberlake T J and Schultz C A Climate Change Vulnerability Assessment for Forest Management: The Case of the U.S. Forest Service. *Forests*. 10(11):1030 DOI: 10.3390/f10111030
7. Roshydromet Climate Center. Scenario forecasts based on the regional model. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/ru/klimat/lf-hr>
8. Kai X, Wang X, Jiang C and Sun O J 2020 Assessing the vulnerability of ecosystems to climate change based on climate exposure, vegetation stability and productivity. *Forest Ecosystems*. 7:23.
9. Prozherina N A, Nakvasina E N 2022 Climate change and its impact on adaptation and intraspecific variability of conifers of the European North of Russia. *Izvestiya vuzov. Forest Journal* 2 P. 9-25.
10. Byun J, Lee W-K, Choi S, Oh S, Yoo S, Kwon T, Sung J and Woo J 2012 Vulnerability Assessment for Forest Ecosystem to Climate Change Based on Spatio-temporal Information. *Korean Journal of Remote Sensing* 1(28) pp.159–169.
11. Isaev A.S., Palnikova E.N., Sukhovolsky V.G. and Tarasova O.V. 2015 Population dynamics of forest phytophagous insects: models and forecasts. Moscow: KMC Scientific Publishers Association. 262 c.