

Научная статья

УДК 630*181

doi: 10.34655/bgsha.2025.80.3.009

Оценка реакции популяций *Picea abies* (L.) Н. Karst. Московской области на изменения климата

Александр Вячеславович Лебедев¹, Дарья Юрьевна Гостева¹

¹Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева

Автор, ответственный за переписку: Лебедев Александр Вячеславович,

alebedev@rgau-msha.ru

Аннотация. К настоящему времени нет объективных прогнозов относительно внутри-видовой реакции ели зоны хвойно-широколиственных лесов Восточно-Европейской равнины на изменения климата. Цель исследования – оценить реакцию местных популяций ели (*Picea abies* [L.] Н. Karst.) по показателю средней высоты на изменения климата до конца XXI века в условиях Московской области с использованием универсальной функции реакции. Для оценки реакции популяций на изменения климата использовалась европейская модель, в основу которой заложена универсальная функция реакции. Значения климатических переменных брались из базы данных ClimateEU за периоды с 1981 по 2010 год и с 2071 по 2100 год для трех сценариев: SSP1-RCP2.6 (низкие выбросы углерода, устойчивое развитие), SSP3-RCP7.0 (умеренные выбросы углерода при умеренном росте населения и экономики), SSP5-RCP8.5 (высокие выбросы углерода, быстрый рост населения). В результате исследования показано, что наиболее благоприятные климатические условия для произрастания ели на территории Подмосковья формируются на Смоленско-Московской возвышенности, а наименьшую продуктивность местные популяции ели имеют в Мещерской низменности и юго-восточной части Москворецко-Окской равнины. При реализации к 2071-2100 годам климатического сценария SSP1-RCP2.6 в среднем по региону ожидается изменение продуктивности популяций ели на +11,2%, SSP3-RCP7.0 – на -18,1%, SSP5-RCP8.5 – на -40,2%. При сценариях SSP3-RCP7.0 и SSP5-RCP8.5 в уязвимом положении в Подмосковье окажутся ельники юго-восточной части региона, для которых в первом случае прогнозируется снижение средней высоты (и, как следствие, класса бонитета) более чем на 25%, а во втором – более чем на 50%. На землях лесного фонда юго-восточной части Московской области рекомендуется проведение регулярного мониторинга санитарного состояния еловых насаждений, лесозащитных мероприятий. При искусственном лесовосстановлении может применяться вспомогательная миграция из районов с популяциями, наиболее адаптированными к климатическим условиям Подмосковья будущего.

Ключевые слова: изменение климата, фенотипическая пластичность, ель обыкновенная, адаптационный потенциал, Московская область.

Original article

Evaluation of the populations response of juvenile *Picea abies* (L.) H. Karst. trees of the Moscow Region to climate change

Aleksandr V. Lebedev¹, Daria Yu. Gosteva¹¹Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

Corresponding author: Aleksandr V. Lebedev, alebedev@rgau-msha.ru

Abstract. There are currently no objective forecasts for the intraspecific response of spruce in the coniferous-broadleaved forest zone of the East European Plain to climate change. The purpose of the study was to assess the response of local spruce (*Picea abies* [L.] H. Karst.) populations in terms of average height to climate change in the Moscow Region up to the end of the 21st century using a universal response function. A European model based on the universal response function was used to assess the response of populations to climate change. The values of climatic variables were taken from the ClimateEU database for the periods from 1981 to 2010 and from 2071 to 2100 for three scenarios: SSP1-RCP2.6 (low carbon emissions, sustainable development), SSP3-RCP7.0 (moderate carbon emissions with moderate population and economic growth), and SSP5-RCP8.5 (high carbon emissions, rapid population growth). The study showed that the most favorable climatic conditions for spruce growth in the Moscow Region are formed on the Smolensk-Moscow Upland, while the local spruce populations have the lowest productivity in the Meshchera Lowland and the southeastern part of the Moskvoretsko-Okskaya Plain. If the SSP1-RCP2.6 climate scenario is implemented by 2071–2100, the productivity of spruce populations will be expected to change by +11.2% on average in the region, by -18.1% under SSP3-RCP7.0, and by -40.2% under SSP5-RCP8.5. Under the SSP3-RCP7.0 and SSP5-RCP8.5 scenarios, spruce forests in the southeastern part of the region will be in a vulnerable position in the Moscow Region, with predicted decreases in average height (and, consequently, the stand site index) of more than 25% in the first case and over 50% in the second. On the forest lands of the southeastern part of the Moscow Region, it is recommended to conduct regular monitoring of the sanitary condition of spruce stands and implement forest protection measures. In artificial reforestation, assisted migration from areas with populations most adapted to the future climatic conditions of the Moscow Region can be utilized.

Keywords: climate change, phenotypic flexibility, Norway spruce, adaptive potential, Moscow region.

Введение. Отличительной особенностью Московской области является то, что леса на ее территории относятся к категории защитных, в которых законодательно запрещено проведение рубок спелых и перестойных насаждений. Существующий режим ведения лесного хозяйства приводит к утрате лесными насаждениями природоохранного, санитарно-гигиенического, рекреационного потенциала, а также отрицательно сказывается на санитарном состоянии лесов [1, 2]. Особенно сильно негативные последствия от такой организации лесопользования проявляются в еловых лесах, что подтверждается многочисленными сообщениями о потере ими устойчивости и ги-

бели [3, 4].

Ель обыкновенная (*Picea abies* [L.] H. Karst.) относится к одной из главных лесобразующих пород на территории Московской области и занимает до 25% лесопокрываемых площадей региона [5, 6]. В литературе [7, 8, 9] в качестве основных прямых и косвенных факторов, влияющих на снижение устойчивости еловых лесов Подмосковья, отмечают: 1) формирование одновозрастных, однородных насаждений с упрощенной структурой, 2) создание лесных культур в несвойственных для вида условиях, 3) периодические вспышки очагов короеда-типографа, 4) накопление площадей спелых и перестойных насаждений, 5) неблагоприят-

ные погодные явления и изменение климата, б) почвенно-гидрологические условия.

Наблюдающиеся на протяжении последних десятилетий изменения климата Москвы и Подмосковья [10, 11] сопровождаются учащением засух и ураганов, что негативно сказывается на состоянии еловых лесов (происходит их усыхание или возникают ветровалы и буреломы). К настоящему времени нет объективных прогнозов относительно внутривидовой реакции ели зоны хвойно-широколиственных лесов Восточно-Европейской равнины на изменения климата. Единственным инструментом, позволяющим количественно оценивать реакцию деревьев на изменение климатических условий, являются опыты с географическими культурами [12, 13]. Данные таких испытаний – это основа для наиболее эффективной и широко признанной модели изучения фенотипической пластичности и реакции видов древесных растений на изменения климата, называемой универсальной функцией реакции [14, 15], которая позволяет одновременно учитывать в изменчивости фенотипических признаков популяций как особенности генетической структуры, так и условия окружающей среды.

Цель исследования – оценить реакцию местных популяций ели (*Picea abies* [L.] H. Karst.) по показателю средней высоты на изменения климата до конца XXI века в условиях Московской области с использованием универсальной функции реакции.

Объекты и методы исследования. Объектом исследования являются популяции ели обыкновенной (*Picea abies* [L.] H. Karst.) на территории Московской области, которая по лесорастительному районированию относится к хвойно-широ-

колиственным лесам (смешанным) европейской части России. Облик лесного покрова Подмосковья формируют такие растительные формации, как хвойные бореальные, хвойные субнеморальные, широколиственно-хвойные, широколиственные и мелколиственные пойменные леса [16]. К основным преобладающим древесным породам относятся сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), ель обыкновенная (*Picea abies* [L.] H. Karst.), береза повислая (*Betula pendula* Roth) и пушистая (*B. pubescens* Ehrh.), осина (*Populus tremula* L.), ольха серая (*Alnus incana* [L.] Moench) и черная (*A. glutinosa* [L.] Gaertn.). Также значительную долю в составе древостоя могут иметь липа сердцевидная (*Tilia cordata* Mill.), дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), клен остролистный (*Acer platanoides* L.) и др.

Для оценки реакции популяций ели на изменения климата использовалась модель, разработанная K.J. Liepe et al. [17], в основу которой была заложена универсальная функция реакции [18]. Для оценки ее параметров исходными данными были результаты общеевропейского эксперимента (IUFRO 1964/68) по тестированию 1100 происхождений ели обыкновенной, отобранных в границах природного ареала, в том числе с территории европейской части СССР, на 20 экспериментальных участках в 13 странах. Так как в каждой стране исследования могли проводиться по собственным методикам, то для приведения данных к единому формату средняя высота популяций авторами модели предварительно была пересчитана на возраст 11 лет. Универсальная функция реакции популяций ели и формулы для расчета климатических переменных записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \log H_{11} = & -12,3 + 0,0475 \times FFP_s - 0,000101 \times FFP_s^2 + 0,116 \times SHM_s - \\ & -0,0013 \times SHM_s^2 + 0,323 \times LAT_p - 0,00311 \times LAT_p^2 + 0,171 \times TD_p - \\ & -0,00261 \times TD_p^2 - 0,000274 \times FFP_s \times TD_p, \end{aligned} \quad (1)$$

$$SHM = \frac{MWMT}{\frac{MSP}{1000}}, \quad (2)$$

$$TD = MWMT - MCMT, \quad (3)$$

где H_{11} – средняя высота в возрасте 11 лет, см; FFP – продолжительность безморозного периода, дней; SHM – индекс влажности и тепла летнего периода; $MWMT$ – средняя температура самого теплого месяца, °C; MSP – среднее количество осадков летом (с мая по сентябрь), мм; LAT – географическая широта; TD – континентальность климата, °C; $MCMT$ – средняя температура самого холодного месяца, °C; s – условия тестового участка; p – условия географического происхождения популяций.

Значения климатических переменных брались из базы данных ClimateEU [19] за периоды с 1981 по 2010 год и с 2071 по 2100 год для трех сценариев: SSP1-RCP2.6 (низкие выбросы углерода, устойчивое развитие), SSP3-RCP7.0 (умеренные выбросы углерода при умеренном росте населения и экономики), SSP5-RCP8.5 (высокие выбросы углерода, быстрый рост населения). Подробный анализ рассматриваемых сценариев и их

характеристика приводятся в литературе, например, в работах W. Dong et al. [20], B.C. O'Neill et al. [21] и др. По уравнению (1) рассчитывалась средняя высота 11-летних популяций ели для климатических условий 1981-2010 годов и для прогнозных условий на 2071-2100 годы по обозначенным выше сценариям. Процент изменения средней высоты к 2071-2100 годам определялся по формуле:

$$P = \frac{H_{11}^{2071...2100} - H_{11}^{1981...2010}}{H_{11}^{1981...2010}} \times 100, \quad (4)$$

где P – процент изменения средней высоты 11-летних популяций, %; $H_{11}^{1981...2010}$ – средняя высота 11-летних популяций в 1981-2010 годы, см; $H_{11}^{2071...2100}$ – средняя высота 11-летних популяций в 2071-2100 годы, см.

Обработка пространственных данных выполнялась в QGIS 3.16.0-Hannover с применением инструмента «Калькулятор растров», вычисление описательных статистик (средняя арифметическая, среднеквадратическое отклонение, минимум и максимум) с использованием модуля «Raster Stats Plus». Дополнительные расчеты проводились с применением электронных таблиц Microsoft Office Excel 2016. Нулевая гипотеза о равенстве средних проверялась при помощи двухвыборочного t -теста с разными дисперсиями при $p = 0,05$.

Результаты исследований и их обсуждения. Результаты расчетов средней высоты 11-летних местных популяций ели для различных временных промежут-

ков (1981-2010 и 2071-2100 годы) и трех сценариев изменения климата в будущем показаны на рисунке 1. Наиболее благоприятные климатические условия для произрастания ели формируются на Смоленско-Московской возвышенности, где популяции достигают наибольшей средней высоты. Наименьшую продуктивность местные популяции ели имеют в условиях Мещерской низменности и юго-восточной части Москворецко-Окской равнины. Оптимистичный сценарий климатических изменений (SSP1-RCP2.6) к 2071-2100 годам обеспечивает повышение продуктивности ели на территории всего Подмосковья. Снижение продуктивности в юго-восточной части Московской области прогнозируется при сценарии SSP3-

RCP7.0, а для всего региона – при реализации сценария SSP5-RCP8.5.

Описательные статистики спрогнозированных средних высот деревьев 11-летних популяций ели Московской области для климата 1981-2010 годов и трех климатических сценариев на 2071-2100 годы показаны в таблице 1. В среднем по Подмосковию в климате 1981-2010 годов высота деревьев в популяциях составила 155,6 см, а в климате 2071-2100 годов для SSP1-RCP2.6 – 171,1 см, для SSP3-RCP7.0 – 127,5 см, для SSP5-RCP8.5 –

93,0 см. Увеличение коэффициента вариации от оптимистичного к пессимистичному сценарию может свидетельствовать о повышении пространственной неоднородности в продуктивности еловых популяций Подмосковья. Различия в средних значениях выборок по Московской области между 1981-2010 и 2071-2100 годами являются статистически значимыми при $p < 0,05$ (число степеней свободы 182622): для SSP1-RCP2.6 $t = 199,3$, для SSP3-RCP7.0 $t = 219,7$, для SSP5-RCP8.5 $t = 507,2$.

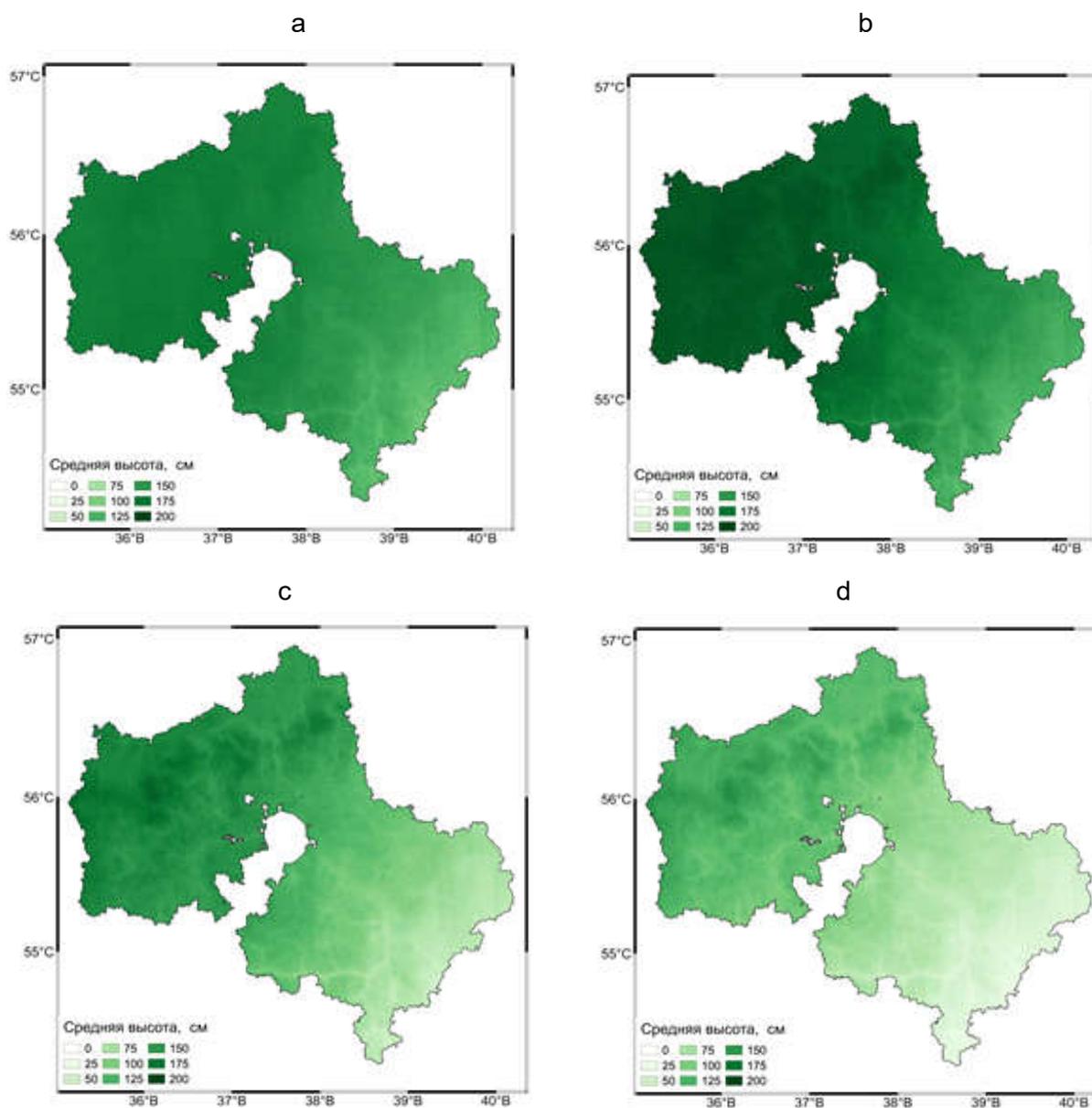


Рисунок 1. Средняя высота 11-летних местных популяций ели в климатических условиях: а) 1981-2010 годов, б) сценарий SSP1-RCP2.6 на 2071-2100 годы, с) сценарий SSP3-RCP7.0 на 2071-2100 годы, д) сценарий SSP5-RCP8.5 на 2071-2100 годы

Процентное изменение средней высоты в 11-летних популяциях ели в 2071-2100 годы относительно 1981-2010 годов для трех климатических сценариев показано на рисунке 2. При реализации сценария SSP1-RCP2.6, в среднем, по Московской области наблюдается изменение продуктивности на +11,2%, SSP3-RCP7.0 – на -18,1%, SSP5-RCP8.5 – на -40,2%.

При сценариях SSP3-RCP7.0 и SSP5-RCP8.5 в уязвимом положении в регионе будут ельники юго-восточной части Подмосковья, для которых в первом случае прогнозируется снижение средней высоты (и, как следствие, класса бонитета) более чем на 25%, а во втором – более чем на 50%.

Таблица 1 – Описательные статистики средней высоты 11-летних популяций ели Московской области для климата 1981-2010 годов и трех климатических сценариев на 2071-2100 годы

Показатель	1981-2010 годы	2071-2100 годы		
		SSP1-RCP2.6	SSP3-RCP7.0	SSP5-RCP8.5
<i>mean</i>	155,6	173,1	127,5	93,0
<i>std</i>	16,6	20,7	34,9	33,4
<i>min</i>	103,7	112,4	46,6	22,5
<i>max</i>	175,2	197,5	189,7	160,5
<i>CV</i>	10,7	12,0	27,4	35,9

Примечание: *mean* – среднее арифметическое, см; *std* – среднеквадратическое отклонение, см; *min* – минимальное значение, см; *max* – максимальное значение, см; *CV* – коэффициент вариации, %.

Оценка устойчивости ели Московской области к климатическим изменениям на период 2071-2100 годы показана на рисунке 3. Потенциально устойчивые популяции, демонстрирующие высокую фенотипическую пластичность, расположены на севере и западе региона. К лесничествам с уязвимыми популяциями ели относятся Луховицкое, Шутурское, Егорьевское, Ступинское, Орехово-Зуевское, «Русский лес», Виноградовское, а также территория Приокско-Террасного государственного природного биосферного заповедника. На землях лесного фонда юго-восточной части Московской области на фоне снижения прогнозируемой устойчивости ели рекомендуется проведение регулярного мониторинга санитарного состояния еловых насаждений, лесозащитных мероприятий. При искусственном лесовосстановлении может применяться вспомогательная миграция из районов с популяциями, наиболее адаптированными к климатическим условиям Подмосковья будущего.

Ранее в литературе были приведены

результаты исследований по оценке изменения потенциальной древесной продуктивности лесов Московской области с использованием индекса Патерсона [11]. Прогнозы показывают, что к 2071-2100 годам ожидается рост потенциальной продуктивности для сценария SSP1-RCP2.6 на 10%, для сценария SSP3-RCP7.0 – на 26% и для сценария SSP5-RCP8.5 – на 32% относительно периода 1981-2010 годов. К основным факторам, которые приведут к таким изменениям, относятся изменение структуры и породного состава лесов. В последние годы для лесов Московской области отмечается увеличение доли широколиственных древесных пород (главным образом, липы и клена) в составе древостоев [22]. В качестве одной из главных причин трансформации хвойных лесов в зонах хвойно-широколиственных лесов и южной тайги европейской части России считается распад спелых и перестойных ельников, на месте которых возобновляются широколиственные породы [6, 23].

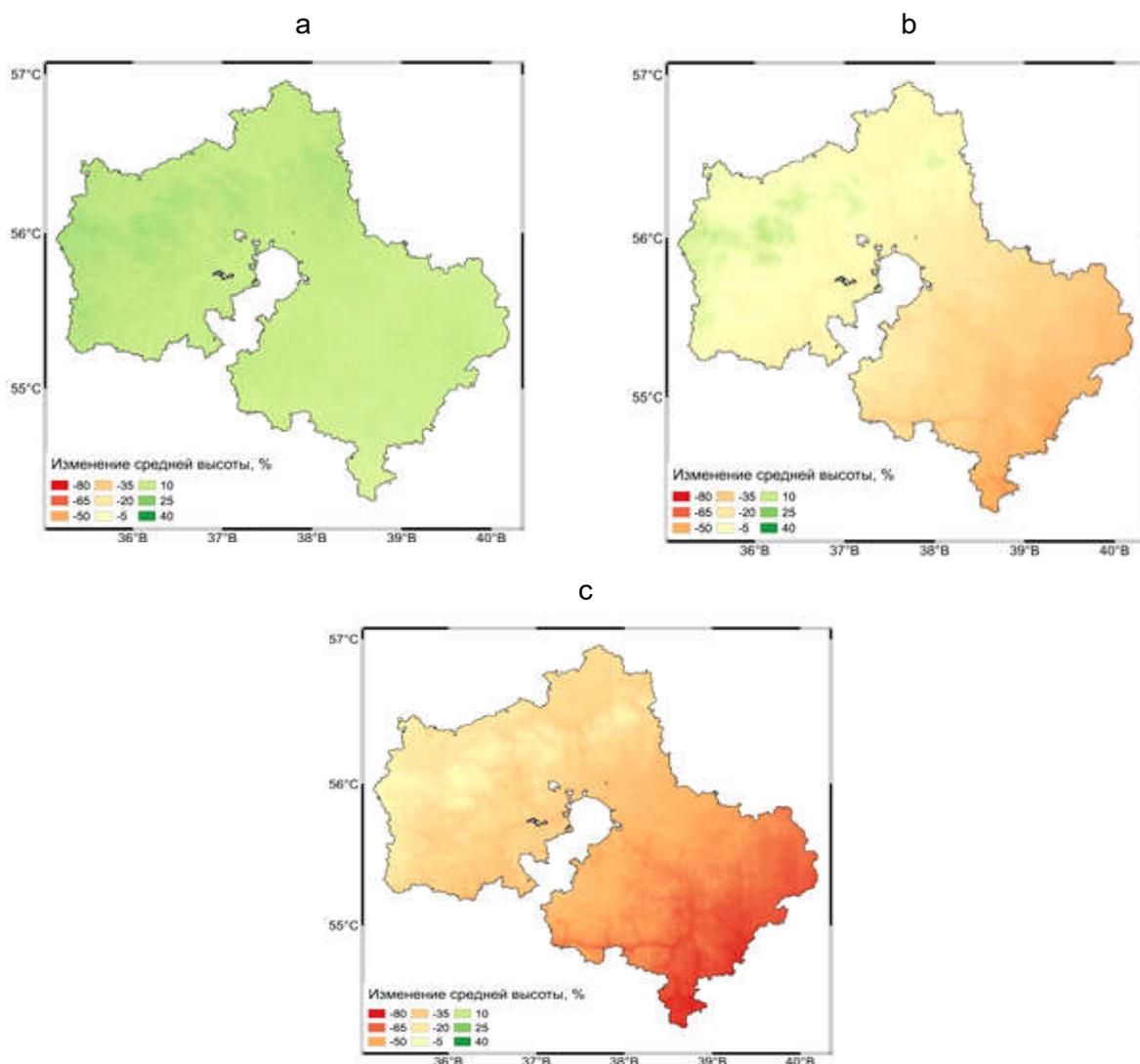


Рисунок 2. Изменение (в %) высоты 11-летних местных популяций ели в 2071-2100 годы относительно 1981-2010 годов для климатических сценариев: а) сценарий SSP1-RCP2.6, б) сценарий SSP3-RCP7.0, в) сценарий SSP5-RCP8.5



Рисунок 3. Состояние популяций ели Московской области к 2071-2100 годам: белая заливка – потенциально устойчивые при всех климатических сценариях, серая заливка – уязвимые при реализации сценариев SSP3-RCP7.0 (снижение продуктивности более чем на 25%) и SSP5-RCP8.5 (снижение продуктивности более чем на 50%)

Вопросы, связанные с изучением реакции популяций деревьев на изменения климата на территории лесной зоны России, требуют дальнейшего изучения. Наиболее объективные прогнозы на будущее могут быть даны с использованием моделей, полученных по объединенным данным испытаний климатипов ели в разных условиях европейской части России. Географические культуры ели обыкновенной (*Picea abies* (L.) H.Karst.), сибирской (*P. obovata* Ledeb.) и их гибридных форм заложены во многих регионах – Архангельской [24], Ленинградской [25], Костромской [26], Нижегородской [27], Липецкой [28] и ряде других областей. Большой пространственный охват многообразия климатических условий экспериментальных участков и мест происхождения климатипов служит надежной основой для выявления фенотипической пластичности и адаптационного потенциала ели.

Заключение. В результате исследования показано, что наиболее благоприятные климатические условия для произрастания ели на территории Подмосковья формируются на Смоленско-Московской

возвышенности, а наименьшую продуктивность местные популяции ели имеют в Мещерской низменности и юго-восточной части Москворецко-Окской равнины. При реализации к 2071-2100 годам климатического сценария SSP1-RCP2.6 в среднем по региону ожидается изменение продуктивности популяций ели на +11,2%, SSP3-RCP7.0 – на -18,1%, SSP5-RCP8.5 – на -40,2%. При сценариях SSP3-RCP7.0 и SSP5-RCP8.5 в уязвимом положении в Подмосковье окажутся ельники юго-восточной части региона, для которых в первом случае прогнозируется снижение средней высоты (и, как следствие, класса бонитета) более чем на 25%, а во втором – более чем на 50%. На землях лесного фонда юго-восточной части Московской области рекомендуется проведение регулярного мониторинга санитарного состояния еловых насаждений, лесозащитных мероприятий. При искусственном лесовосстановлении может применяться вспомогательная миграция из районов с популяциями, наиболее адаптированными к климатическим условиям Подмосковья будущего.

Список источников

1. Влияние экологических и социально-экономических факторов на формирование лесов Подмосковья / С.А. Коротков, Л.В. Стоноженко, В.В. Киселева, Ю.Б. Глазунов // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2020. Т. 31, № 1-2. С. 90-115. doi: 10.21513/0207-2564-2020-1-90-115. EDN: LJAИИМ
2. Гиряев М.Д., Аксенова К.С. Лесоводственные и законодательные аспекты проектирования выборочных рубок в защитных лесах // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2016. Т. 20. № 5. С. 26-32. EDN: WLSXSH
3. Моисеев Н.А., Сурканов О.И. Проблемы лесов Подмосковья и альтернативы их решения // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2014. Т. 18. № 3. С. 141-145. EDN: SFNIPP
4. Лебедев А.В., Гостева Д.Ю. Современная динамика и причины гибели лесов Подмосковья // Фитосанитария. Карантин растений. 2024. № S1(18). С. 46-47. EDN: ZGEYYU
5. Кузнецова Н.Ф., Сауткина М.Ю. Состояние лесов и динамика их породного состава в Центральном федеральном округе // Лесохозяйственная информация. 2019. № 2. С. 25-45. doi: 10.24419/LHI.2304-3083.2019.2.03. EDN: WXYIFM
6. Коротков С.А. Смена состава древостоев и устойчивость защитных лесов центральной части Русской равнины. Москва: АНО "ДОБЛЕСТЬ ЭПОХ", 2023. 168 с. EDN: ТТНРРА
7. Алябьев А.Ф. Усыхание ельников Подмосковья // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2013. № 6. С. 159-165. EDN: RLUUYR
8. Крылов А.М. Пространственно-временные закономерности массового усыхания еловых насаждений Московской области. Ставрополь: Центр научного знания "Логос", 2018. 170 с. EDN: YNFVEZ
9. Гниненко Ю.И., Хегай И.В. Динамика усыхания еловых лесов в Московском регионе // Лесохозяйственная информация. 2018. № 2. С. 65-74. doi: 10.24419/LHI.2304-3083.2018.2.07. EDN: GDVHHV
10. Дубенок Н.Н., Лебедев А.В., Гостева Д.Ю. Потенциальная древесная продуктивность лесов Московской обл. в условиях изменения климата // Лесохозяйственная информация. 2025. № 1. С. 36-48. doi: 10.24419/LHI.2304-3083.2025.1.04. EDN: PBHDNH

11. Дубенок Н.Н., Лебедев А.В., Градусов В.М. Потенциальная продуктивность лесов Московского региона в связи с климатическими изменениями // Природообустройство. 2023. № 5. С. 118-124. doi: 10.26897/1997601120235-118-124. EDN: CHYVAU
12. Наквасина Е.Н., Прожерина Н.А. Оценка отклика на изменение климата в опытах с происхождением *Picea abies* (L.) Karst. x *P. obovata* (Ledeb.) на севере Русской равнины // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023. № 1(391). С. 22-37. doi: 10.37482/0536-1036-2023-1-22-37. EDN: OTBFEN
13. Лебедев А.В. Методы моделирования реакции деревьев на климатические изменения по данным испытаний географических культур // Сибирский лесной журнал. 2025. № 2. С. 3-19. doi: 10.15372/SJFS20250201. EDN: RNFGKF.
14. Yang J., Weersink A., Pedlar J.H., Mckenney D.W. The development of universal response functions to facilitate climate-smart regeneration of black spruce and white pine in Ontario, Canada // Forest Ecology and Management. 2015. Vol. 339. Pp. 34-43. doi: 10.1016/j.foreco.2014.12.001. EDN: YBFWTY.
15. Zhao Yu., Wang T. Predicting the global fundamental climate niche of lodgepole pine for climate change adaptation // Frontiers in Forests and Global Change. 2023. Vol. 6. doi: 10.3389/ffgc.2023.1084797. EDN: QPOTAL.
16. Сулова Е.Г. Леса Московской области // Экосистемы: экология и динамика. 2019. Т. 3. № 1. С. 119-190. EDN: MHXHMF
17. Liepe K. J., van der Maaten E., van der Maaten-Theunissen M., Liesebach M. High Phenotypic Plasticity, but Low Signals of Local Adaptation to Climate in a Large-Scale Transplant Experiment of *Picea abies* (L.) Karst. in Europe // Forests and Global Change. 2022. Vol. 5. Article number 804857. doi: 10.3389/ffgc.2022.804857
18. Wang H., Ning Y., Liu C., Xu P., Zhang W. Different radial growth responses to climate change of three dominant conifer species in temperate forest, northeastern China // Front. For. Glob. Change. 2022. V. 4. Article number 820800. doi: 10.3389/ffgc.2021.820800. EDN: JZJBFE
19. Marchi M., Castellanos-Acuna D., Hamann A., Wang T., Ray D., Menzel A. Climate EU, scale-free climate normals, historical time series, and future projections for Europe // Scientific Data. 2020. Vol. 7. Article number 428. doi: 10.1038/s41597-020-00763-0. EDN: BOVQDV
20. Dong W., Liu Z., Liao H., Tang Q., Li X. New climate and socio-economic scenarios for assessing global human health challenges due to heat risk // Climatic Change. 2015. Vol. 130. Pp. 505–518. doi: 10.1007/s10584-015-1372-8. EDN: AFYLNM
21. O'Neill B.C., Krieglner E., Ebi K.L. et al. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century // Global Environmental Change. 2017. Vol.42. Pp. 169–180. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004
22. Коротков С.А., Захаров В.П. Особенности естественного возобновления дуба на территории Орехово-Зуевского лесничества Московской области // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2019. Т. 23. № 5. С. 22-29. doi: 10.18698/2542-1468-2019-5-22-29. EDN: DOBVXX
23. Дубенок Н.Н., Лебедев А.В., Чистяков С.А. Динамика лесоводственно-таксационных показателей древостоев на постоянных пробных площадях в коренных ельниках заповедника “Кологривский лес” // Лесохозяйственная информация. 2024. № 2. С. 37-46. doi: 10.24419/LHI.2304-3083.2024.2.03. EDN: JUWWSL
24. Наквасина Е.Н., Прожерина Н.А., Юдина О.А. Морфологическая изменчивость ели в географических культурах Архангельской области // Лесоведение. 2009. № 2. С. 28-34. EDN: KZYKGT
25. Николаева М.А., Варенцова Е.Ю. Фитопатологическое состояние и сохранность ели в географических культурах Любанского лесничества Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. № 228. С. 216-233. doi: 10.21266/2079-4304.2019.228.216-233. EDN: WUKKGN
26. Иванов А.В. Температурная обусловленность ростовых процессов у ели в географических культурах южной подзоны тайги // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2010. № 5. С. 60-61. EDN: NCRGBZ
27. Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н., Щербаков А.Ю. Популяционная структура географических культур ели европейской в оценках пигментного состава хвои // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. № 237. С. 109-130. doi: 10.21266/2079-4304.2021.237.109-130. EDN: LKMWOV.
28. Шутяев А.М. Изменчивость шишек и семенных чешуй ели в географических культурах // Лесоведение. 2007. № 5. С. 60-68. EDN: IAQQMH.

References

1. Korotkov S.A., Stonozhenko L.V., Kiseleva V.V., Glazunov Yu.B. Environmental and socio-economic factors effect on the formation of forests in the Moscow region. *Problems of ecological monitoring and modeling of ecosystems*. 2020; Vol.31, No1-2:90-115 (In Russ.). doi: 10.21513/0207-2564-2020-1-90-115.

2. Giryayev M.D., Aksenova K.S. Silvicultural and legislative aspects of the design of selective logging in protected forests. *Moscow State Forest University bulletin – Lesnoy Vestnik*. 2016; Vol. 20, No 5: 26-32 (In Russ.).
3. Moiseev N.A., Surkanov O.I. Problems of forests near Moscow And ways to its solutions. *Moscow State Forest University bulletin – Lesnoy Vestnik*. 2014; Vol. 18, No. 3: 141-145 (In Russ.).
4. Lebedev A.V., Gosteva D.Yu. Current dynamics and causes of forest death in the Moscow region. *Plant Health and Quarantine*. 2024; S1(18): 46-47 (In Russ.).
5. Kuznetsova N., Sautkina M. Forest State and Dynamics of their Species Composition in the Central Federal District. *Forestry Information*. 2019; 2: 25-45 (In Russ.). doi: 10.24419/LHI.2304-3083.2019.2.03
6. Korotkov S.A. Change in the composition of tree stands and the stability of protective forests in the central part of the Russian Plain. Moscow: ANO «DOBLEST' EPOH», 2023; 168 p. (In Russ.).
7. Alyabiev A. Dieback of Spruce Forests in the Moscow Region. *Moscow State Forest University bulletin – Lesnoy Vestnik*. 2013; 6: 159-165 (In Russ.).
8. Krylov A. Spatiotemporal patterns of spruce stands dieback in the Moscow Region. Stavropol: Center for Scientific Knowledge “Logos”, 2018. 170 p. (In Russ.)
9. Gninenko Yu., Khagai I. Dynamics of shrinking spruce forests in the Moscow region. *Forestry Information*. 2018; 2: 65-74 (In Russ.). doi: 10.24419/LHI.2304-3083.2018.2.07
10. Dubenok N., Lebedev A., Gosteva D. Potential wood productivity of forests of Moscow region in conditions of changing climate. *Forestry Information*. 2025; 1: 36-48 (In Russ.). doi: 10.24419/LHI.2304-3083.2025.1.04
11. Dubenok N.N., Lebedev A.V., Gradusov V.M. Potential productivity of forests in the Moscow region in connection with climate change. *Prirodobustrojstvo*. 2023; 5: 118-124 (In Russ.). doi: 10.26897/1997601120235-118-124
12. Nakvasina E.N., Prozherina N.A. Assessment of response to climate change in experiments with the origins of *Picea abies* (L.) Karst. x *P. obovata* (Ledeb.) In the north Russian Plain. *Russian Forestry Journal*. 2023; №1(391): 22-37 (In Russ.). doi: 10.37482/0536-1036-2023-1-22-37
13. Lebedev A.V. A review of methods for modeling tree response to climate change using provenances trials data. *Siberian Journal of Forest Science*. 2025; 2: 3-19 (In Russ.). doi: 10.15372/SJFS20250201
14. Yang J., Weersink A., Pedlar J.H., Mckenney D.W. The development of universal response functions to facilitate climate-smart regeneration of black spruce and white pine in Ontario, Canada. *Forest Ecology and Management*. 2015; Vol. 339: 34-43. doi: 10.1016/j.foreco.2014.12.001
15. Zhao Yu., Wang T. Predicting the global fundamental climate niche of lodgepole pine for climate change adaptation. *Frontiers in Forests and Global Change*. 2023; Vol. 6. doi: 10.3389/ffgc.2023.1084797
16. Suslova E. G. Forests of the Moscow Region. Ecosystems: Ecology and Dynamics. 2019; Vol. 3, No 1: 119-190 (In Russ.)
17. Liepe K. J., van der Maaten E., van der Maaten-Theunissen M., Liesebach M. High Phenotypic Plasticity, but Low Signals of Local Adaptation to Climate in a Large-Scale Transplant Experiment of *Picea abies* (L.) Karst. in Europe. *Forests and Global Change*. 2022; Vol. 5. Article number 804857. doi: 10.3389/ffgc.2022.804857
18. Wang H., Ning Y., Liu C., Xu P., Zhang W. Different radial growth responses to climate change of three dominant conifer species in temperate forest, northeastern China. *Front. For. Glob. Change*. 2022; Vol. 4. Article number 820800. doi: 10.3389/ffgc.2021.820800
19. Marchi M., Castellanos-Acuna D., Hamann A., Wang T., Ray D., Menzel A. Climate EU, scale-free climate normals, historical time series, and future projections for Europe. *Scientific Data*. 2020; Vol. 7. Article number 428. doi: 10.1038/s41597-020-00763-0
20. Dong W., Liu Z., Liao H., Tang Q., Li X. New climate and socio-economic scenarios for assessing global human health challenges due to heat risk. *Climatic Change*. 2015; Vol. 130: 505–518. doi: 10.1007/s10584-015-1372-8
21. O'Neill B.C., Kriegler E., Ebi K.L. et al. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*. 2017; Vol. 42: 169–180. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004
22. Korotkov S.A., Zakharov V.P. Natural regeneration peculiarities of oak in Orekhovo-Zuevo forestry, Moscow region. *Forestry Bulletin*. 2019; Vol. 23, No. 5: 22-29 (In Russ.). doi: 10.18698/2542-1468-2019-5-22-29
23. Dubenok N., Lebedev A., Chistyakov S. Dynamics of silvicultural and taxation indicators of forest stands on permanent sample plots in native spruce forests of the Kologrivsky Les Nature Reserve. *Forestry Information*. 2024; 2: 37-46 (In Russ.). doi: 10.24419/LHI.2304-3083.2024.2.03
24. Nakvasina E.N., Prozherina N.A., Yudina O.A. Morphological variability of spruce in geographical cultures of the Arkhangelsk region. *Lesovedenie*. 2009; 2: 28-34 (In Russ.)
25. Nikolaeva M.A., Varentsova E.Yu. Phytopathological status and preservation of spruce in provenance trials of the Lyubansky forest district of Leningrad region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*. 2019; 228: 216-233 (In Russ.). doi: 10.21266/2079-4304.2019.228.216-233
26. Ivanov A.V. Temperature dependence of growth processes in spruce in geographical cultures of the southern taiga subzone. *Moscow State Forest University bulletin – Lesnoy Vestnik*. 2010; 5: 60-61 (In Russ.)

27. Besschetnov V.P., Besschetnova N.N., Shcherbakov A.Yu. Population structure of geographical cultures of european spruce in the estimates of the pigment composition of needles. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*. 2021;237:109-130 (In Russ.). doi: 10.21266/2079-4304.2021.237.109-130

28. Shutyaev A.M. Variability of spruce cones and seed scales in geographical cultures. *Lesovedenie*. 2007;5:60-68 (In Russ.)

Информация об авторах

Александр Вячеславович Лебедев – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры землеустройства и лесоводства, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, alebedev@rgau-msha.ru;

Дарья Юрьевна Гостева – аспирант, ассистент кафедры землеустройства и лесоводства, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, d.gosteva@rgau-msha.ru.

Information about the authors

Aleksandr V. Lebedev – Doctor of Sci. (Agriculture), Associate Professor, Chair of Land Management and Forestry, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, alebedev@rgau-msha.ru;

Daria Yu. Gosteva – Postgraduate student, Assistant Professor, Chair of Land Management and Forestry, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, d.gosteva@rgau-msha.ru.

Статья поступила в редакцию 02.07.2025; одобрена после рецензирования 18.07.2025; принята к публикации 22.07.2025.

The article was submitted 07.07.2025; approved after reviewing 18.07.2025; accepted for publication 22.07.2025.