

Научная статья

УДК 630*181.1(234.853.071)

DOI: 10.18384/2712-7621-2025-3-32-51

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ЛЕСА НА ХРЕБТЕ ЗИГАЛЬГА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© СС ВУ Григорьев А. А.¹, Ложкин Г. И.², Вьюхин С. О.³,
Чижикова Н. А.⁴, Кудрявцев П. П.⁵

¹ *Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук
г. Екатеринбург, Российская Федерация*

e-mail: grigoriev.a.a@ipae.uran.ru; ORCID: 0000-0002-7446-0654

² *Казанский (Приволжский) федеральный университет*

г. Казань, Российская Федерация

Институт географии РАН

г. Москва Российская Федерация,

e-mail: lozhkin.grig@gmail.com; ORCID: 0009-0004-0962-3658

³ *Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук
г. Екатеринбург, Российская Федерация*

e-mail: sergey.vyuhin@mail.ru; ORCID: 0000-0001-7173-4878

⁴ *Казанский (Приволжский) федеральный университет*

г. Казань, Российская Федерация

e-mail: nelly.chizhikova@stud.kpfu.ru; ORCID: 0000-0002-9969-9207

⁵ *ФГБУ «Национальный парк «Таганай»*

г. Златоуст, Российская Федерация

e-mail: kudryavcev@taganay.org; ORCID: 0009-0008-0666-156X

Поступила в редакцию 17.05.2025

После доработки 10.08.2025

Принята к публикации 25.08.2025

Аннотация

Цель. Оценка изменения лесопокрываемых площадей на верхнем пределе произрастания древесной растительности на хребте Зигальга (Южный Урал). Создание научно-обоснованного прогноза расширения лесопокрываемых площадей в ближайшем столетии на основе полученных данных о пространственном положении, возрасте, морфометрических параметрах древесных растений.

Процедура и методы. На склонах разной экспозиции и на разной высоте над уровнем моря заложены пробные площади в экотоне верхней границы леса. На пробных площадях с использованием дендрохронологических методов определён возраст 411 деревьев на общей площади 1,1 гектар. На основе отобранных полевых материалов произведена оценка надземной древесной фитомассы, с использованием древесных кернов получены её оценки в прошлом. Созданы модели оценки надземной фитомассы популяции ели сибирской для 2 склонов, где фитомасса в некоторой точке зависит от расстояния до линии раздела склонов и от времени.

Результаты. На Южном Урале, на хребте Зигальга на склонах разных экспозиций в последнем столетии произошел сдвиг верхней границы распространения ели сибирской в сообществе горных тундр и данный процесс происходит в настоящее время. В работе предложена модель, описывающая накопление надземной фитомассы еловых древостоев и продвижение, верхней границы леса вверх в будущем. По полученным прогнозам, горная тундра на перевале между г. Поперечная и г. Лысая зарастёт к 2065–2070 гг.

Теоретическая и/или практическая значимость. Результаты исследования представляют первый опыт моделирования продвижения верхней границы леса в горах Южного Урала и могут быть использованы при решении подобных задач в других горных районах. Полученные данные о пространственном положении деревьев их морфометрических параметрах могут быть использованы для мониторинга их состояния при различных сценариях изменения климата в будущем.

Ключевые слова: надземная фитомасса, моделирование, прогноз динамики верхней границы леса, изменение климата, Южный Урал

Благодарности. Работа выполнена за счёт средств гранта РФФ 24-27-00338 в рамках научного сотрудничества ФГБУН ИЭРиЖ УрО РАН и ФГБУ «Национальный парк «Таганай». Авторы статьи выражают искреннюю благодарность профессору, доктору биологических наук С. Г. Шиятову за мотивацию исследовать хребет Зигальга.

Для цитирования:

Григорьев А. А., Ложкин Г. И., Вьюхин С. О., Чижикова Н. А., Кудрявцев П. П. Моделирование и прогнозирование динамики верхней границы леса на хребте Зигальга (Южный Урал) // Географическая среда и живые системы. 2025. № 3. С. 32–51. DOI: 10.18384/2712-7621-2025-3-32-51

Original Article

MODELING AND FORECASTING THE DYNAMICS OF THE UPPER FOREST LIMIT ON THE ZIGALGA RIDGE (SOUTHERN URALS)

© CC BY A. Grigoriev¹, G. Lozhkin², S. Vyukhin³,
N. Chizhikova⁴, P. Kudryavtsev⁵

¹ *Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
Ekaterinburg, Russian Federation
e-mail: grigoriev.a.a@ipae.uran.ru; ORCID: 0000-0002-7446-0654*

² *Kazan (Volga Region) Federal University
Kazan, Russian Federation
Institute of Geography, RAS
Moscow, Russian Federation
e-mail: lozhkin.grig@gmail.com; ORCID: 0009-0004-0962-3658*

³ *Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
Yekaterinburg, Russian Federation
e-mail: sergey.vyuhin@mail.ru; ORCID: 0000-0001-7173-4878*

⁴ *Kazan (Volga Region) Federal University
Kazan, Russian Federation
e-mail: nelly.chizhikova@stud.kpfu.ru; ORCID: 0000-0002-9969-9207*

⁵ *Taganay National Park
Zlatoust, Russian Federation
e-mail: kudryavcev@taganay.org; ORCID: 0009-0008-0666-156X*

Received 17.05.2025

Revised 10.08.2025

Accepted 25.08.2025

Abstract

Aim. To assess the change in the area of forested lands at the upper limit of tree vegetation growth on the Zigalga Ridge (Southern Urals). To develop a justified forecast of the forest area expansion over the next century using data on the spatial position, age, and morphometric parameters of about 1004 trees.

Methodology. The dendrochronological method was used to derive the age of 411 trees growing on permanent study plots covering an area of 1.1 hectares. The studied plots are in the upper forest line ecotone and differ in exposure and altitude. The current above-ground woody biomass was measured in situ. Woody biomass formed in previous years was assessed using tree cores. Models predicting woody biomass at given locations were developed as functions combining the time of observation and geographic coordinates.

Results. The article presents data on the shift of the upper boundaries of woody vegetation into the mountain tundra communities, observed in the last century on the slopes of various exposures of the Zigalga Ridge in the Southern Urals, and also presents an analysis of how this shift is currently progressing. The paper proposes a model that predicts the

accumulation of aboveground biomass of spruce stands and the movement of the upper forest boundary higher into the mountains in the coming years. The model forecasts that by 1965–2070, the pass between Mount Poperechnaya and Mount Lysaya will likely be covered with dense forest.

Research implications. The results of the study represent the first experience of modeling the advance of the upper forest boundary in the mountains of the Southern Urals and can be used in similar tasks in various mountain systems around the world. The obtained data on the spatial position of trees and their morphometric parameters can be used to monitor the condition of trees under various climate change scenarios in the future.

Keywords: aboveground biomass, modeling, forecast of upper forest line dynamics, climate change, Southern Urals

Acknowledgments. The work was supported by the Russian Science Foundation grant 24-27-00338 within the framework of scientific cooperation between the Institute of Plant and Animal Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences and Taganay National Park. The authors of the article express their sincere gratitude to Professor S.G. Shiyatov, Doctor of Biological Sciences, for the motivation to study the Zigalga Ridge.

For citation:

Grigoriev A. A., Lozhkin G. I., Vyukhin S. O., Chizhikova N. A., Kudryavtsev P. P. Modeling and forecasting the dynamics of the upper forest limit on the Zigalga ridge (Southern Urals). In: *Geographical Environment and Living Systems*, 2025, no. 3, pp. 32–51. DOI: 10.18384/2712-7621-2025-3-32-51

ВВЕДЕНИЕ

В каждом из последних четырёх десятилетий температура климатической системы была выше, чем в любое предыдущее десятилетие, начиная с 1850 г. [18]. Известно, что на фоне наблюдаемых изменений климата происходит смещение ареалов многих видов растений, произрастающих преимущественно в экстремальных условиях [17; 20]. Одним из наиболее заметных и обсуждаемых проявлений реакции биоты на климатические изменения является продвижение древесной растительности в высокогорные экосистемы [15]. Это связано с тем, что высотное положение верхней границы леса, в первую очередь, обусловлено климатическими факторами и поэтому является высокочувствительным биоиндикатором [3]. Факты смещения древесной растительности в альпийские и тундровые сообщества выявлены во многих горных системах планеты [15; 16]. Предполагается, что данные процессы могут стать серьёзной угрозой для ограниченных по ареалу высокогорных видов, сокращая площадь подходящих для них местообитаний [8]. Поэтому вызванное изменением климата продвижение лесов в горы представляет риск для эндемичных видов. На современном этапе исследова-

ний в данной области значительный интерес представляет не только выявление фактов смещения лесов в горы, но и моделирование, и прогнозирование данных процессов в будущем [9].

Горные тундры – это экосистемы, занимающие в горах Южного Урала крайне незначительные территории [4]. Недавние исследования [6] показали, что в последние десятилетия в горах Южного Урала по сравнению с другими горными провинциями Урала происходило стремительное сокращение площадей, занятых горно-тундровыми сообществами, вследствие продвижения верхней границы древесной и кустарниковой растительности в горы. На многих сравнительно невысоких горных вершинах и перевалах Южного Урала к настоящему времени горные тундры полностью исчезли, и при сохранении существующих тенденций есть реальный риск их исчезновения на значительной части вершин Южного Урала в будущем [4].

Такой хребет, как Зигальга является природным объектом, где в настоящее время сообщества горных тундр занимают самые большие площади среди всех вершин Южного Урала [4]. Потенциально горные тундры хр. Зигальга могут стать одним из рефугиумов по сохранению высокогорных эндемиков Южного Урала (например,

Lagotis uralensis Schischk., *Gypsophila uralensis* Less., *Cerastium krylovii* Schischk. & Gorczak., *Scorzonera glabra* Rupr., *Saussurea uralensis* Lipsch.), если темпы изменения климата и реакция на него растительности усилятся в будущем.

Полученные разновременные пейзажные фотоснимки (рис. 1) наглядно демонстрируют, что здесь также происходят процессы зарастания горных тундр древесной растительностью. В этой связи в настоящем исследовании на примере хр. Зигальга с использованием древесно-кольцевых данных была проведена оценка смещения

верхней границы леса и выполнено моделирование вероятного продвижения леса на территории горной тундры.

Территория исследования находится в пределах Национального парка «Зигальга». Работы производились в районе гор г. Поперечная (1389 м н. у. м., координаты: N 54,648878°; E 58,654820°) и г. Лысяя (1371 м н. у. м., координаты: N 54,646439°; E 58,634778°), составляющих северную часть хр. Зигальга (рис. 2).

В тектоническом отношении хребет Зигальга является частью Зигальгинской свиты, сложен из мономинеральных квар-

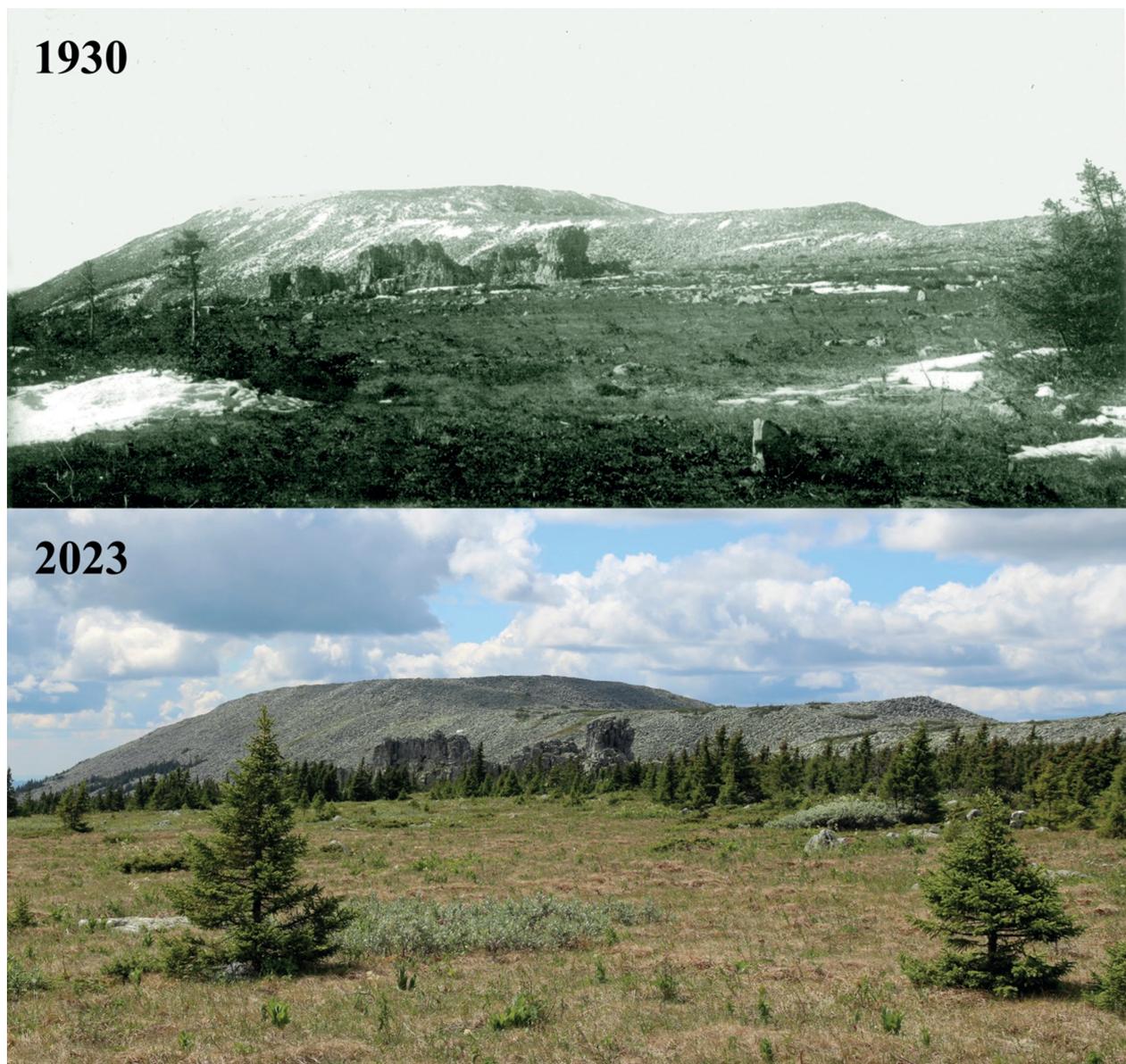


Рис. 1 / Fig. 1. Разновременные фотоснимки, сделанные на хребте Зигальга / Miscellaneous photographs taken on the Zigalga Ridge

Источник: в 1930 г. — фото Л. Н. Тюлиной, в 2023 г. — фото А. А. Григорьева

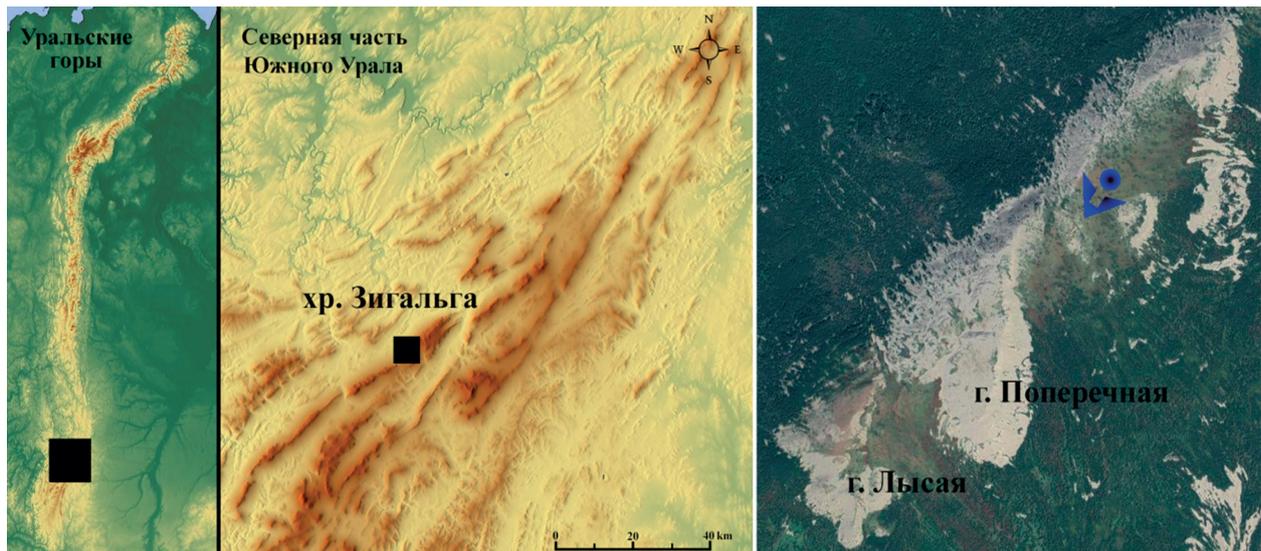


Рис. 2 / Fig. 2. Карта-схема района исследования, синяя точка – место и направление повторной фотосъёмки / Map-scheme of the study area, the blue dot is the location and direction of re-photography

Источник: составлено авторами

цевых песчаников и алевролитов с мало-мощными прослоями глинистых сланцев и конгломератов. Климат в районе исследования умеренно континентальный и характеризуется резкими климатическими контрастами. Количество осадков на Зигальге может достигать 1 000 мм. В июле (самом дождливом месяце) выпадает 90–110 мм. Высота снежного покрова колеблется от 10 см на вершинах и сильно ветрообдуваемых участках – до 200 см и более в подгольцовой зоне и надувах на границе леса. Среднемесячная температура воздуха наиболее жаркого месяца (июль) $+17,0^{\circ}\text{C}$, среднемесячная температура воздуха самого холодного месяца (январь) $-15,9^{\circ}\text{C}$. Абсолютные минимальные температуры могут опускаться до -48°C , а летом подыматься до $+38^{\circ}\text{C}$.

На вершине в местах накопления мелкозема развиты горно-тундровые и дерновые горно-луговые почвы. Низкорослые и разреженные леса подгольцового пояса произрастают на дерновых горно-лесных почвах. Доминирующий древесный вид – *Picea obovata* Ledeb., малочисленно на отдельных участках встречается *Betula pubescens* ssp. *tortuosa* Ledeb. Выше границы леса на открытых участках в тундре произрастает *Juniperus sibirica* Burgsd., местами формируя сомкнутые заросли. В отличие от других горных вершин Южного Урала,

на границе леса хр. Зигальга не встречается *Larix sibirica* Ledeb. В настоящее время площадь, занимаемая горными тундрами, в районе между г. Лысая и г. Поперечная составляет около 190 га.

Вершины хребта являются одними из самых труднодоступных на всём Южном Урале, здесь никогда не велась пастьба скота и любая другая хозяйственная деятельность. Древесная растительность, произрастающая на обоих высотных профилях, за последние, как минимум, 200 лет не подвергалась воздействию лесных пожаров и других неблагоприятных факторов.

Для параметризации моделей зарастания, а также для оценки возрастной структуры были заложены пробные площади (по высотным профилям) на склонах северо-западной и юго-восточной экспозиции. Отобранный материал был использован для оценки надземной фитомассы ели сибирской на каждой пробной площади, на основе измеренного прироста годичных колец была получена оценка надземной фитомассы для периода с 2010 по 2023 гг.

ЗАКЛАДКА ВЫСОТНЫХ ПРОФИЛЕЙ

В июне 2023 г. в пределах верхней границы древесной растительности, под которым понимается переходный пояс в горах

между верхней границей распространения сомкнутых лесов и отдельных деревьев в тундре [3], было заложено 2 высотных профиля.

Профиль I был заложен на склоне юго-восточной экспозиции в седловине между г. Лысая и г. Поперечная, профиль II — на склоне северо-западной экспозиции г. Лысая (рис. 2). На каждом профиле фиксировалось 3 высотных уровня:

- верхний уровень (уровень «1») — на верхней границе распространения отдельных деревьев в тундре;
- средний уровень (уровень «2») — на верхней границе распространения редин;
- нижний уровень (уровень «3») — на верхней границе распространения редколесий.

На каждом высотном уровне было заложено от 3 до 7 постоянных круговых пробных площадей размером 0,0227 га.

На каждой пробной площади фиксировалось:

- точное местоположение каждого дерева,
- диаметр на основании, диаметр на высоте 1,3 м, диаметр кроны в двух взаимно перпендикулярных направлениях,
- возраст и жизненное состояние.

Помимо этого, определялось точное местоположение и морфометрические параметры кустов можжевельника сибирского, если они произрастали в пределах пробной площади.

Возраст определяли путём взятия образцов древесины (кернов) в основании дерева либо взятием поперечного спила (менее 3 см в диаметре). Каждый образец древесины был наклеен на деревянную основу, зачищен острым лезвием и для лучшей визуализации годичных колец пигментирован зубным порошком. Подсчёт годичных колец и датировку кернов проводили по общепринятой методике [5] в лабораторных условиях. Все образцы древесины измерены на полуавтоматической установке Lintab 5.

Для выявления ложных и выпадающих колец была построена обобщенная древесно-кольцевая хронология по кернам (40 шт.), специально взятым у старых

деревьев в районе исследований. К подросту были отнесены деревья высотой не более 1,5 м и возрастом не старше 30 лет. В случае, если взятые керны не достигали центра ствола, то для уточнения года формирования центрального кольца производили расчёт недостающих колец при помощи прозрачной пленки с нанесёнными линиями окружностей разного размера. Поскольку возраст подроста выше 0,2 см и диаметром <3–4 см был определён по спилам, взятым на уровне корневой шейки, то он был достоверным в наибольшей степени. Используя возраст таких деревьев и высоту их стволиков, было рассчитано уравнение регрессии зависимости между этими показателями, с помощью которого вычисляли поправки для определения более точного возраста каждого изученного нами дерева, имеющего диаметр >3–4 см. На поперечных дисках и радиальных кернах не были обнаружены следы пожаров (подсушин), также при закладке пробных площадей не наблюдалось значительного количества усохших деревьев. В целом, на общей площади 1,1 га были определены морфометрические параметры 1004 древесных растений, с учётом подроста и крупных кустарников, для 411 деревьев определён возраст.

С использованием отобранного на пробных площадях материала были созданы модели оценки надземной фитомассы популяции ели сибирской для двух склонов. В разработанных моделях надземная фитомасса в некоторой точке зависит от расстояния до линии раздела склонов и от времени.

КАЛИБРОВКА МОДЕЛИ

На основе заложенных в 2023 г. пробных площадей откалиброваны 2 линейные модели — для северо-западного и юго-восточного склонов. С использованием измеренных диаметров ствола и опубликованных ранее [12] аллометрических зависимостей для деревьев ели сибирской, произрастающих в горах Южного Урала, произведён расчёт текущей надземной фитомассы древостоев на каждой пробной площади. На основе данных о ширине го-

дичных колец и измеренных диаметров стволов в 2023 г. определены значения диаметров стволов прошлых лет по методу, описанному в работе П. А. Моисеева с соавторами [19], из которых получены соответствующие значения фитомассы для предыдущих лет по каждой пробной площади. Временной интервал данных калибровки был ограничен периодом 2010–2023 гг., т. к. при смещении по временной оси в прошлое может увеличиваться влияние смертности деревьев на оценку фитомассы.

Для калибровки модели использованы относительные фитомассы пробных площадей, нормированные к максимальной зафиксированной на площадях фитомассе (145 т/га). В связи с существованием ограничений предсказываемой величины (фитомасса не может быть <0 или превышать некоторый предел, определённый ёмкостью среды) оценка фитомассы (p) была определена сигмоидальной функцией вида:

$$p = \frac{1}{(1+e^{-y})} \quad (1),$$

которая асимптотически стремится к 1 при достижении максимальной фитомассы, оцененной по пробным площадям, и к 0 – при достижении минимально возможной фитомассы.

Величина y в уравнении (1) линейно зависит от координат в трёхмерном пространстве и от времени, по аналогии с применением линейных моделей при анализе временных рядов [29]. За единицу измерения времени принят год, начальная точка отсчёта приведена к 2023 г. ($t=0$). Так как одним из условий корректного применения регрессионных моделей яв-

ляется отсутствие мультиколлинеарности [7], мы трансформировали координаты (XYZ), которые были определены для пробных площадей или ячеек сетки по цифровой модели рельефа (ЦМР), в одно значение, соответствующее евклидову расстоянию (d) до ближайшей точки на линии раздела северо-западного и юго-восточного склонов. Полученные значения d были приведены к диапазону от 0 до 1 по принципу «*min-max*» [14], где для точек на линии раздела склонов $d=0$, а для наиболее удаленных $d=1$. Коэффициенты линейной зависимости (a , b , c , уравнения (2) и (3) определены для каждого склона по отдельности (северо-западный и юго-восточный склоны обозначены NW и SE, соответственно) с помощью функции `linear_model.LinearRegression()` библиотеки `scikit-learn` [24].

$$y_{NW} = a_{NW} + b_{NW} * d + c_{NW} * t \quad (2)$$

$$y_{SE} = a_{SE} + b_{SE} * d + c_{SE} * t \quad (3)$$

Принадлежность пробной площади или ячейки сетки одному из склонов определена на основе ЦМР, переведённой в растр со значениями экспозиции склона. С целью создания прогнозов разработан вариант совместной реализации моделей, при котором линейная модель одного склона может предполагать увеличение фитомассы на другом склоне (например, если лес достиг линии раздела с одного склона быстрее, чем с другого). Для таких случаев использована та же модель, но расстояние до линии раздела склонов (d) взято с отрицательным знаком. Таким образом, фитомасса точек каждого склона (p_{NW} или p_{SE}) определена через сумму сигмоидальных кривых:

$$p_{NW} = \frac{1}{(1+e^{-a_{NW}-b_{NW}*d-c_{NW}*t})} + \frac{1}{(1+e^{-a_{SE}+b_{SE}*d-c_{SE}*t})} \quad (4)$$

$$p_{SE} = \frac{1}{(1+e^{-a_{SE}-b_{SE}*d-c_{SE}*t})} + \frac{1}{(1+e^{-a_{NW}+b_{NW}*d-c_{NW}*t})} \quad (5)$$

Для формирования оценки фитомассы в заданной точке в заданный год используется уравнение (4) или (5) в зависимости от принадлежности точки склону северо-западной или юго-восточной экспозиции. В случае, когда $p_{NW} > 1$ или $p_{SE} > 1$, значение

относительной древесной фитомассы принимается равным 1. Линейные коэффициенты и сдвиги, полученные для уравнений (2) и (3), дополнительно скорректированы с учётом уравнений (4) и (5). Для решения задачи оптимизации использована функ-

ция minimize() из модуля scipy.optimize с алгоритмом «Nelder-Mead» [22; 30], в ходе которой был минимизирован квадрат разницы p_{NW} или p_{SE} и оценок фитомассы на пробных площадях. Общая схема моделирования на примере склона северо-западной экспозиции представлена на рис. 3.

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ

Для верификации полученной модели выполнено сопоставление оценок модели для 1958 г. ($t = -65$) с верхней границей редколесий из топоматериалов 1958 г. (топокарты масштаба 1:25000). Также проведено сравнение модельной древесной фитомассы со слоями опубликованных глобальных моделей оценки наземной фитомассы: (1) модельная фитомасса при $t = -13$ была сравнена со слоем, включающим оценку фитомассы тундры, леса, лугов и пахотных земель для 2010 г. с разрешением 300 м [26; 27]; (2) модельная фитомасса при $t = -3$ была сравнена со слоем оценки наземной древесной фитомассы для 2020 г. с разрешением 30 м [10]. В качестве метрик сравнения оценок фитомассы использованы коэффициент корреляции Спирмена и коэффициент эффективности Нэша-Сатклифа [21], который определен как:

$$CE = 1 - \frac{\sum(x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2} \tag{6}$$

где:
 x_i – известное значение предсказываемой величины,
 \bar{x} – среднее значение предсказываемой величины,
 \hat{x}_i – оценка модели.

Значение CE будет ниже 0 в случаях, когда сумма квадратов разности известных значений и оценок будет выше суммы квадратов разности известных значений со средним значением известной величины. Максимально возможное значение $CE=1$, при котором оценки точно описывают известные значения.

ВОЗРАСТНАЯ И МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ДРЕВОСТОЕВ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ЛЕСА

Средние морфометрические показатели и площадные характеристики еловых и берёзовых древостоев и кустов можжевельника, произрастающих на заложенных высотных профилях, приведены в табл. 1. Наблюдается незначительное (с высокой степенью перекрытия доверительных интервалов) снижение среднего диаметра

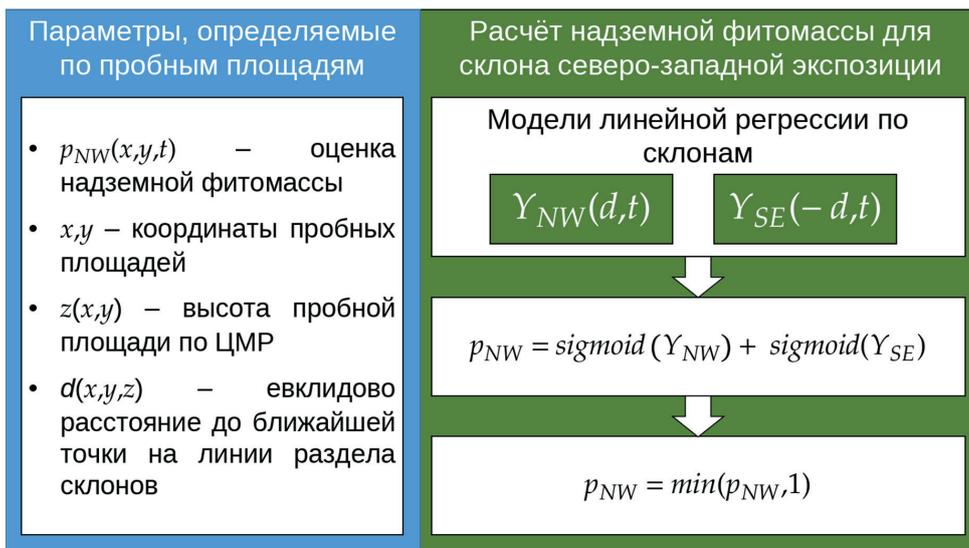


Рис. 3 / Fig. 3. Схема моделирования наземной фитомассы на примере склона северо-западной экспозиции / Scheme of modeling aboveground phytomass using the example for a north-west facing slope

Источник: составлено авторами

Таблица 1 / Table 1

Средние морфометрические показатели и площадные характеристики еловых (PO) и березовых (BP) древостоев и можжевельника (JS), произрастающих на заложенных высотных профилях / Average morphometric indices and area characteristics of spruce (PO) and birch (BP) stands and juniper (JS) growing on the established altitudinal profiles

Профиль и уровень	Экспозиция	Высота над у.м.	Вид	Диаметр на 1.3 м (см)		Высота ствола (м)		Возраст (годы)		Диаметр кроны (м)		Площадь проективного покрытия крон м ² /га	Отпад, шт./га	Густота, шт./га	
				Mean	Max.	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max			<1.5m	>1.5m
1_1	SE	1290	PO	6.2±4.0	21.9	2.8	9.0	25±10	54	2.2±0.9	5.6	550	0	55	185
			BP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			JS	0	0	0.3±0.1	1.8	-	-	1.2±0.2	5.0	396	0	197	
1_2	SE	1265	PO	13.9±6.8	31.0	4.1±1.4	7.5	40±17	89	2.6±1.1	5.0	3329	0	245	585
			BP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			JS	0	0	0.6±0.1	0.8	-	-	0.8±0.2	1.7	59	0	44	
1_3	SE	1240	PO	20.3±7.9	67.0	6.5±1.9	11.2	62±24	155	2.8±0.8	4.9	6241	22	0	991
			BP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			JS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2_1	NW	1300	PO	5.5±2.2	10.0	2.4±0.7	3.6	37±23	98	1.4±1.0	5.4	1468	44	499	470
			BP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			JS	0	0	0.2±0.1	0.5	-	-	0.6±0.1	3.1	226	0	367	
2_2	NW	1265	PO	5.9±3.5	16.0	2.8±1.1	5.4	30±17	90	1.5±0.7	3.3	1806	0	646	1013
			BP	3.5±2.7	10.0	2.4±0.8	4.8	-	-	1.5±0.9	3.7	690	0	102	352
			JS	0	0	0.2±0.1	0.5	-	-	0.6±0.1	1.8	123	0	294	
2_3	NW	1230	PO	15.6±7.5	37.0	7.5±2.9	17.0	78±32	148	2.5±0.9	4.7	6799	44	235	1292
			BP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			JS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Источник: составлено авторами

тра кроны, при продвижении от низких площадок к высоким. По большинству измеренных показателей зафиксировано уменьшение при продвижении в гору, особенно по площади проективного покрытия крон и густоте древостоев. Обнаруженная закономерность обусловлена, с одной стороны, большей долей молодых деревьев на высоких уровнях, а с другой — худшими условиями произрастания при приближении к перевалу. Помимо этого, отмечены различия для 2 склонов. Например, на уровне «2», который расположен на одной и той же абсолютной высоте на обоих склонах, все измеренные параметры для северо-западного склона ниже, чем для юго-восточного, что, скорее всего,

связано с разной теплообеспеченностью склонов.

Берёзы произрастают на заложенных высотных профилях в минимальном количестве. Можжевельник сибирский в большем количестве произрастает на верхних высотных уровнях, на средних уровнях единично, в редколесьях на нижних уровнях обоих профилей не встречается.

В связи с тем, что доминирующим древесным видом является ель сибирская на обоих высотных профилях, дальнейший анализ возрастной структуры приводится только по данному древесному виду (рис. 3).

Частотные гистограммы (рис. 3) свидетельствуют, что закономерности массового заселения деревьев имели свои от-

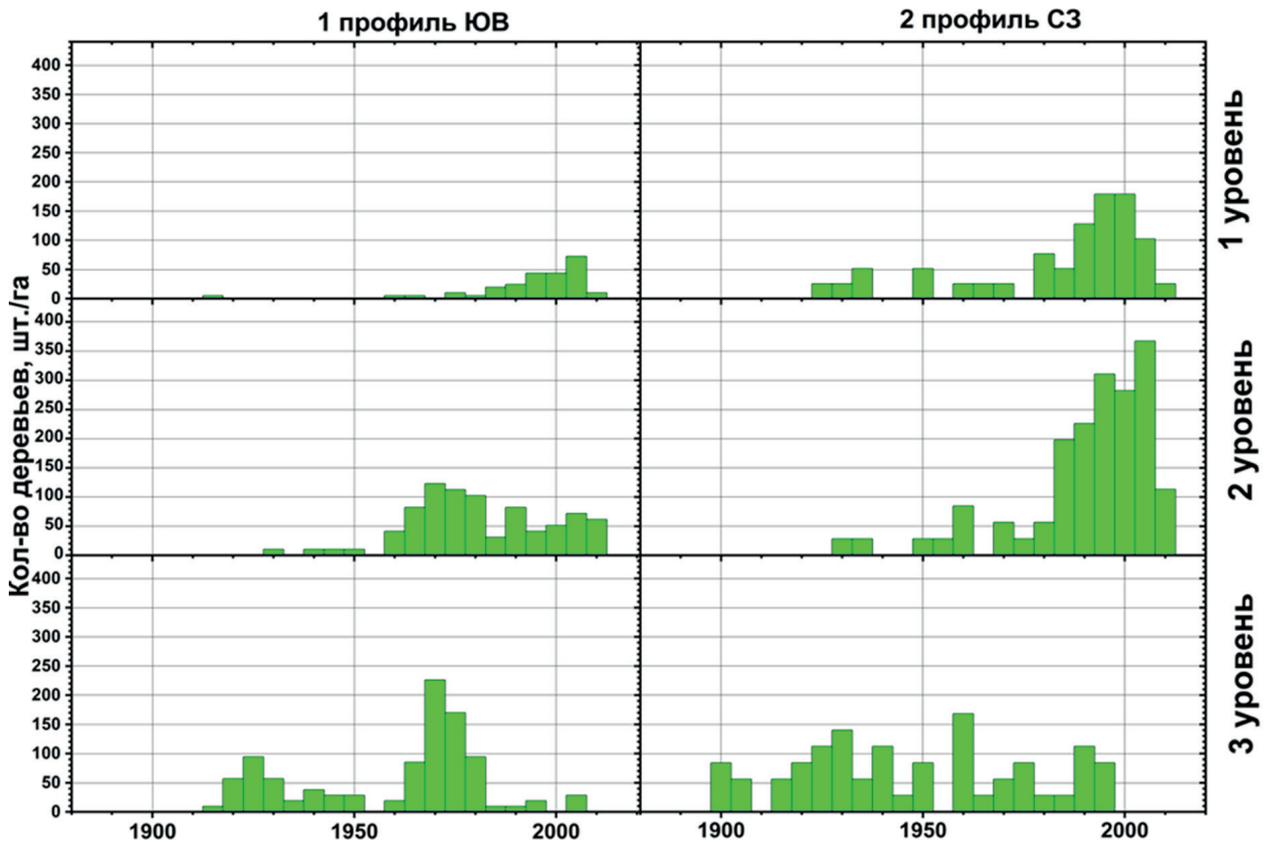


Рис. 3 / Fig. 3. Распределение количества деревьев ели сибирской по периодам их появления на заложенных высотных профилях / Distribution of the number of Siberian spruce trees by periods of their appearance on the laid altitude profiles

Источник: составлено авторами

личительные особенности. На профиле I первые деревья ели стали заселяться на нижнем уровне в начале XX в. – в период с 1920 по 1935 гг. На среднем высотном уровне несколько позднее, период наиболее массового заселения происходил с 1960 по 1980 гг. На верхнем уровне большая часть деревьев стала появляться после 1970-х гг. По возрастной структуре древостоев данного профиля можно выделить 3 чётко выраженных периода массового заселения деревьев: с 1920 по 1935 гг., с 1960 по 1985 гг., с 1990 по 2010 гг.

На профиле II деревья ели заселялись по иному сценарию. Первые деревья на исследованном участке склона появились в конце XIX в. – начале XX в. на ниж-

нем высотном уровне. Период массового заселения здесь происходил с 1915 по 1940 гг. и с 1990 по 2000 гг. На среднем уровне первые деревья появились в 1930-х гг., наиболее массово на данном высотном уровне деревья заселялись в период с 1985 по 2010 гг. На верхнем высотном уровне деревья заселялись по схожему сценарию со средним высотным уровнем.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СДВИГА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ЛЕСА

В результате калибровки моделей (4) и (5) были получены модели со следующими коэффициентами:

$$p_{NW} = \frac{1}{(1+e^{3.437-8.858*d-0.058*t})} + \frac{1}{(1+e^{3.904+4.808*d-0.080*t})} \quad (7)$$

$$p_{SE} = \frac{1}{(1+e^{3.904-4.808*d-0.080*t})} + \frac{1}{(1+e^{3.437+8.858*d-0.058*t})} \quad (8)$$

Так же, как и при калибровке, в случае, когда $p_{NW} > 1$ или $p_{SE} > 1$, значение относительной древесной фитомассы принимается равным 1. Для сравнения полученных оценок фитомассы с другими источниками выполнен обратный перевод из относительных величин в т/га.

Метрики валидации моделей, основанные на сравнении модельных оценок фитомассы с полевыми данными, приведены в табл. 2. Для обоих склонов получен высокий значимый коэффициент корреляции Спирмена, а также положительные значения SE .

Рассчитаны значения остатков через разницу между оценками фитомассы (по материалам из пробных площадей) и оценками моделей (7) и (8). Несмотря на ненормальное распределение остатков (p -value теста Шапиро < 0.05 ; [25]), медиана остатков либо незначимо отличается от 0 (p -value теста Вилкоксона < 0.05 ; [31]) либо отличается значимо, но на относительно небольшую величину, как на северо-западном склоне, где имеет место небольшая недооценка фитомассы (-4.589 т/га, что составляет 3.16% от максимальной фитомассы). Коэффициент корреляции Спирмена не выявил значимой связи между остатками и временем. Для юго-восточного склона имеет место слабая, но статистически значимая корреляция (-0.272) между удалённостью от склона и ошибкой,

можно предположить, что на самых удаленных площадках юго-восточного склона модель занижает оценки фитомассы.

Перед верификацией моделей по данным глобальных моделей биомассы было произведено сравнение обоих источников (за 2010 г. и 2020 г. [10; 26]) с оценками фитомассы, полученным по пробным площадям с использованием древесных кернов. Результаты сравнения приведены в табл. 3. Для обоих наборов получен значимый коэффициент корреляции, но биомассы по оценкам глобальной модели 2020 г. [10] больше согласуются с оценками древесной биомассы пробных площадей, так как SE в этом случае выше 0. Для более детального анализа мы разделили сравниваемые показатели по уровням сомкнутости (независимо от экспозиции склона). Для каждого уровня была рассчитана разница между оценкой фитомассы пробных площадей и оценками глобальных моделей.

Так как мы не можем отвергнуть гипотезу о нормальности распределения (p -value теста Шапиро > 0.05), значимость отличия среднего от 0 для разности по каждому уровню сомкнутости определялась с использованием теста Стьюдента. При повышении сомкнутости леса глобальная модель фитомассы 2010 г. [26] сильнее недооценивает значения древесной фитомассы, ошибка значимо не отли-

Таблица 2 / Table 2

Сравнение оценок фитомассы моделей и площадок / Comparison of model and site phyto-mass estimates

Показатель	Склон NW	Склон SE
Коэффициент корреляции Спирмена	0.912	0.909
p -value для коэффициента корреляции Спирмена	< 0.001	< 0.001
SE	0.633	0.703
p -value теста Шапиро для остатков	< 0.001	< 0.001
Медианное значение остатков (т/га)	-4.589	0.522
p -value теста Вилкоксона для остатков	< 0.01	0.104
Коэффициент корреляции Спирмена между ошибками и t	-0.106	-0.013
p -value коэффициента корреляции Спирмена между ошибками и t	0.254	0.845
Коэффициент корреляции Спирмена между ошибками и d	0.154	-0.272
p -value коэффициента корреляции Спирмена между ошибками и d	0.098	< 0.001

Источник: составлено авторами

Таблица 3 / Table 3

Сравнение оценок биомассы глобальных моделей с наземными измерениями пробных площадей / Comparison of global model biomass estimates with ground-based measurements of sample areas

Показатель	Модель 2010 (Spawn, Gibbs, 2020)	Модель 2020 (Duncanson et al., 2020)
<i>CE</i>	-0.780	0.228
Коэффициент корреляции Спирмена	0.402	0.524
p-value для коэффициента корреляции Спирмена	<0.05	<0.01
p-value теста Шапиро для разницы (сомкнутый лес, уровень 3)	0.843	0.710
p-value теста Шапиро для разницы (открытый лес, уровень 2)	0.594	0.135
p-value теста Шапиро для разницы (отдельные деревья, уровень 1)	0.884	0.383
Среднее значение разницы (сомкнутый лес, уровень 3), т/га	-75.859	-33.578
Среднее значение разницы (открытый лес, уровень 2), т/га	-28.961	4.373
Среднее значение разницы (отдельные деревья, уровень 1), т/га	-0.659	20.587
p-value теста Стьюдента (сомкнутый лес, уровень 3)	<0.001	<0.05
p-value теста Стьюдента (открытый лес, уровень 2)	0.00012	0.544
p-value теста Стьюдента (отдельные деревья, уровень 1)	0.478	<0.01

Источник: составлено авторами

чается от 0 только на площадках верхнего уровня. Оценки наземной биомассы в соответствии с глобальной моделью 2020 г. [10] не отличаются значимо от 0 только на участках с среднего уровня, для остальных уровней сомкнутости глобальная модель 2020 г. либо переоценивает, либо недооценивает наземную древесную фитомассу.

На рис. 4а представлено наложение результатов предлагаемой в данной работе модели (уравнения 7 и 8) древесной фитомассы для 2022 г. и оценки фитомассы по пробным площадям, заложенным в начале лета 2023 г. На рис. 4б показана реализация модели для 1958 г., на которую наложены верхние границы редколесий (ВГР) 1958 г., соответствующих контуру второго уровня сомкнутости.

На рис. 4с и 4д рассчитана разница между результатом модели с данными глобальных моделей биомассы для 2010 г. и 2020 г. [10; 26], соответственно. В участках с предполагаемым сомкнутым лесом оценка модели значительно превышает значения обоих растров глобальных моделей, а в участках с тундрой оценка модели ниже, чем указывают глобальные модели. Близкая к 0 разница фрагментарно отмечена в переходной зоне.

Согласно табл. 2 обе глобальные модели недооценивают фитомассу сомкнутого леса по сравнению с оценкой из пробных площадей, вероятно с этим связаны существенные отличия с сомкнутым лесом и отрицательные значения *CE* при сравнении модели с обоими растрами глобальных моделей. При этом в обоих случаях сравнения модельной биомассы с оценками глобальных моделей 2010 г. и 2020 г. получены высокие значимые коэффициенты корреляции Спирмена.

С помощью разработанной модели выполнен прогноз изменения древесной фитомассы, по которому перевал на хребте Загильга покроется сомкнутым лесом ориентировочно к 2065–2070 гг. На рис. 5 отображены прогнозируемые контуры верхней границы сомкнутого леса для разных лет (граница определена по среднему значению фитомассы на пробных площадях уровня «3» для 2022 г., которое составило 95.27 т/га).

ОБСУЖДЕНИЕ

Основываясь на полученных линейных коэффициентах (уравнения 7 и 8), мы предполагаем, что деревья склона севе-

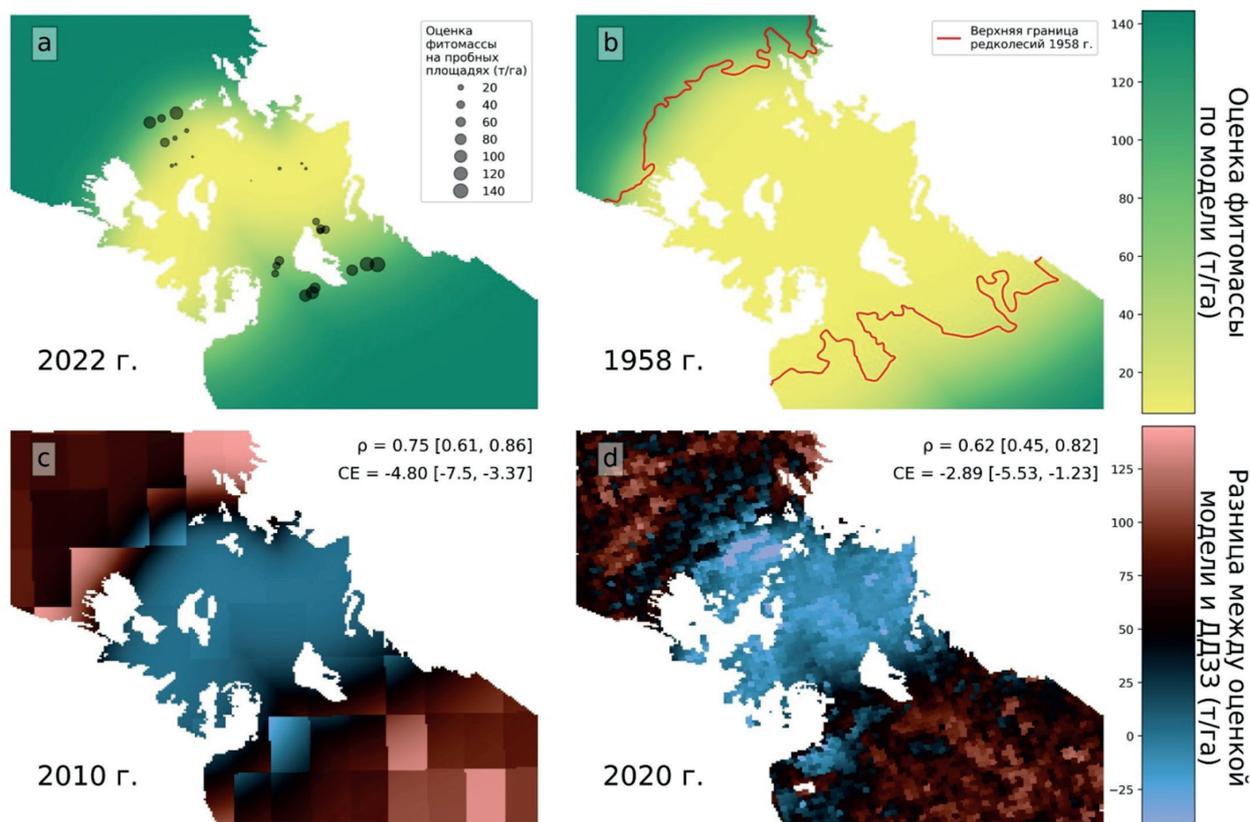


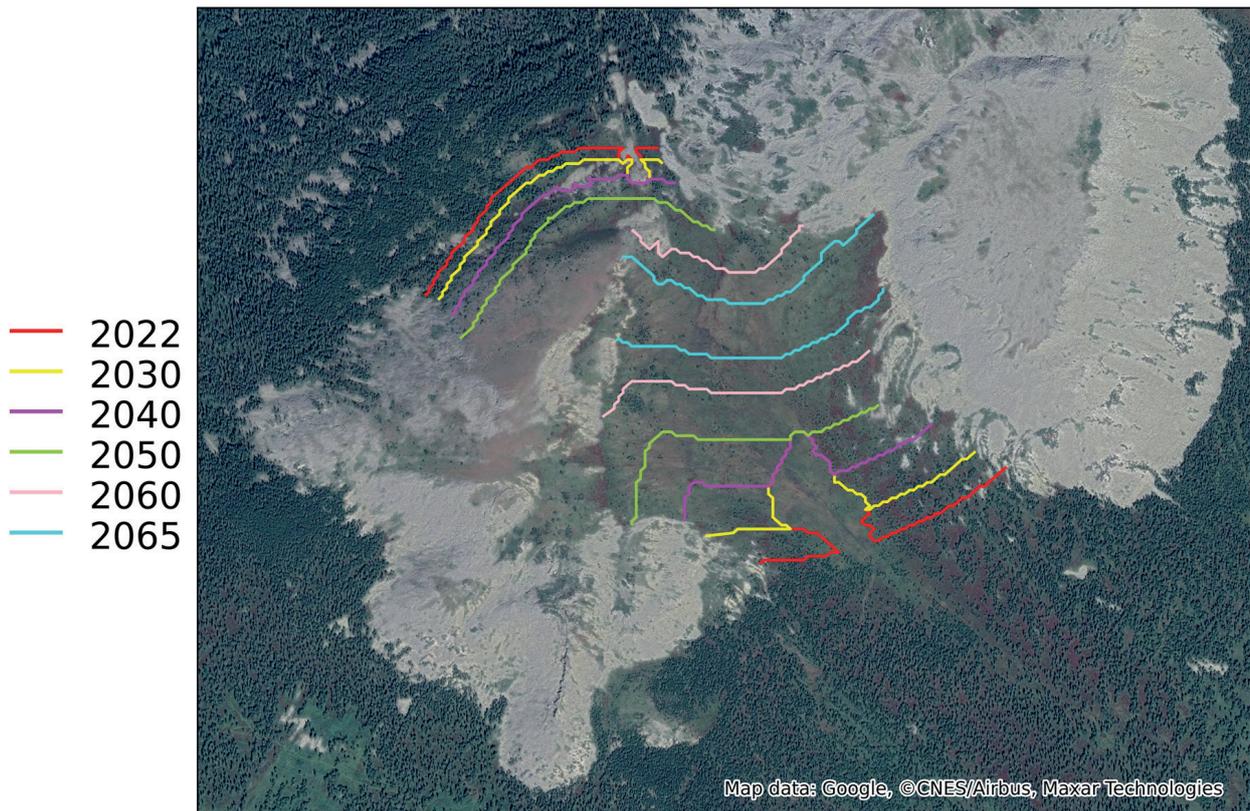
Рис. 4 / Fig. 4. Реализация модели для разных лет. а) 2022 г., сопоставление с биомассой площадок, заложенных летом 2023 г. (пунсоны); б) Реализация модели для 1958 г. с наложением на верхние границы редколесий из топоматериалов 1958 г. (изолиния); в) Разница между оценкой фитомассы по модели и глобальной модели 2010 г.; д) Разница между оценкой фитомассы по модели и глобальной модели 2020 г. Для в) и д) также указаны коэффициент корреляции Спирмена и СЕ с доверительными интервалами (95%) / Model realization for different years: а) 2022, comparison with biomass of sites laid down in summer 2023 (punsons); б) Model realization for 1958, overlaid with the upper limits of sparse forests from 1958 topos (isoline); в) Difference between the model phytomass estimate and the 2010 global model; д) Difference between model phytomass estimate and global model 2020. Spearman's correlation coefficient and CE with confidence intervals (95%) are also shown for в) and д)

Источник: в – [25]; д – [5]

ро-западной экспозиции с большей скоростью заполняют новое пространство по сравнению с юго-восточным склоном, но деревья юго-восточного склона показывают более высокую скорость накопления фитомассы во времени. Отмечено, что наиболее заметный переход от высоких значений фитомассы к низким значениям по предлагаемой в данной работе модели наблюдается в местах заложения пробных площадей уровня «2» (рис. 4а), что согласуется с принципом закладки пробных площадей (при котором среднему уровню соответствует резкий переход между лесом и тундрой).

Для склона северо-западной экспозиции удалось получить сопоставимую по

пространственному и высотному положению верхнюю границу редколесий из топоматериалов границу (рис. 4б). Для юго-восточного склона предлагаемая модель недооценила значения фитомассы на высоком удалении от линии раздела склонов (рис. 4б), что также было зафиксировано на шаге калибровки модели. По нашему предположению, это может быть связано с высокими показателями диаметра стволов елей юго-восточного склона по сравнению с северо-западным (табл. 1), как в абсолютных значениях, так и при делении среднего диаметра на средний возраст деревьев на каждом уровне, который можно рассматривать как показатель, пропорциональный скорости радиального прироста.



Примечание: Линии определены по среднему значению фитомассы на пробных площадях 3-го уровня для 2022 г. (95.27 т/га)

Рис. 5 / Fig. 5. Прогноз зарастания тундры вдоль перевала на хр. Зигальга / Forecast of tundra overgrowth along the pass on the Zigalga Ridge

Источник: составлено авторами

Можно считать, что построенная модель согласуется с глобальными моделями [10; 26] в разделении лесопокрытых площадей от горной тундры (получены высокие значимые коэффициенты корреляции Спирмена), но сами значения фитомассы не совпадают (отрицательные значения SE , рис. 4с–d). Это может быть связано как с неточностями предлагаемой модели, так и с ошибками в глобальных моделях: из всех представленных источников верификации самым достоверным, вероятно, являются топоматериалы, так как значения SE глобальных моделей при сравнении с оценками фитомассы пробных площадей низкие либо ниже 0 (табл. 3).

Как было показано выше, по полученным прогнозам, перевал между г. Лысая и г. Поперечная на хр. Зигальга может зарости к 2065–2070 гг. Мы считаем данный прогноз правдоподобным, т. к. в верхних точках перевала уже зафиксированы отдельные особи ели сибирской: пробные

площади верхних уровней в 2023 г. заложены в окрестностях линии раздела склонов. Поэтому мы считаем, что климатические условия уже не являются лимитирующим фактором распространения ели сибирской в горную тундру, что обуславливает применимость моделей без прямого учёта различных сценариев изменения климата в будущем. В связи с этим, мы выполняем прогноз на основе модели, экстраполирующей наблюдаемые по пробным площадям тенденции продвижения леса.

Согласно полученному прогнозу, вертикальная скорость смещения верхней границы сомкнутого леса составляет 1.038 м/г на склоне юго-восточной экспозиции и 1.5480 м/г на склоне северо-западной экспозиции. Полученные оценки попадают в верхнюю часть доверительного интервала оценки скорости вертикального смещения верхней границы сомкнутого леса на Южном Урале из работы Ф. Хагедорна с соавторами [13] с 1955 по 1985 гг.

Кроме этого, полученные показатели близки к оценке скорости вертикального смещения верхней границы ели из работы П. Жанга с соавторами [32] для сценария SSP585 1.12 м/г, предполагающего высокую степень антропогенной эмиссии парниковых газов. Таким образом, можно охарактеризовать предполагаемые темпы заполнения тундрового участка на перевале хр. Зигальга как высокие.

Процессы смещения леса в горы могут привести к уменьшению биоразнообразия высокогорной растительности, в частности, к снижению альфа- и бэта-разнообразия тундровых и луговых сообществ, а также к изменению структуры высокогорных ландшафтов [23]. В отдельных регионах изменение климата может привести к локальному вымиранию, являющемуся результатом конкурентной замены медленно растущих, устойчивых к стрессу альпийских видов более энергичными универсальными видами [28]. Данные, представленные в таблице 1 свидетельствуют, что

в немалом количестве на обоих высотных профилях произрастает можжевельник сибирский (преимущественно стланиковой формы). В большем количестве он фиксируется на верхних уровне, в меньшем — на средних уровнях, и не отмечается в сомкнутых еловых древостоях на нижних уровнях. Наблюдаемая закономерность ранее описывалась в литературе для высокогорий Южного Урала [11]. Данное обстоятельство обусловлено тем, что можжевельник не выдерживает конкуренции с елью и постепенно при смыкании крон деревьев погибает. В связи с этим при прогнозируемом полном зарастании перевала между г. Лысая и г. Поперечная к 2070 г. можно ожидать локальное вымирание, как минимум, можжевельника сибирского на этих участках (рис. 6.).

Вероятно, в будущем при продвижении леса и формировании сомкнутых древостоев на перевале хр. Зигальга можно ожидать и сокращение численности отдельных тундровых видов беспозвоночных



Рис. 6 / Fig. 6. Можжевельник сибирский стланиковой формы роста (на переднем плане) на «седловине» между г. Поперечная и г. Лысая. По полученному прогнозу, эта территория к 2065–2070 гг. зарастёт сомкнутым еловым лесом / Siberian juniper of stlanic form of growth (in the foreground) on the “saddle” between Poberezhnaya and Lysaya. According to the forecast, this area will be overgrown by 2065–2070 by a closed spruce forest

Источник: фото А. А. Григорьева

и травянистых растений, но для объективной оценки этого природного процесса требуются дополнительные длительные мониторинговые исследования.

Следует отметить, что некоторое продвижение и увеличение сомкнутости древесной растительности отмечается также и в районах с более континентальным климатом. Например, подобные процессы фиксируются на курумных россыпях в западной части Среднесибирского плоскогорья, что может свидетельствовать об изменении мерзлотных условий [1; 2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последнее столетие в горах Южного Урала на хр. Зигальга происходила интенсивная экспансия ели сибирской в сообщества горных тундр. С использованием данных морфометрических параметров, пространственного положения и возраста 411 деревьев ели предложена модель, предсказывающая значение надземной фитомассы деревьев ели сибирской в экотоне верхней границы леса в будущем. Показан способ учёта данных пробных площадей для калибровки моделей, в которой учтены особенности двух склонов. Установлено, что деревья склона северо-западной экспозиции с большей скоростью заполняют новое пространство по сравнению с юго-западным склоном, но деревья юго-западного склона показывают более высокую скорость накопления фитомассы по времени. Результаты модели согласуются с верхними границами редколесий 1959 г. для северо-западного склона, но несколько недооценивают значения фитомассы на юго-восточном склоне. По полученной модели перевал между г. Лысая и г. Поперечная на хр. Зигальга зарастет сомкнутым еловым древостоем к 2065–2070 гг.

Результаты исследования могут быть использованы при моделировании и прогнозировании климатогенной трансформации высокогорных экосистем, как на других горных вершинах Южного Урала, так и горных системах мира.

ЛИТЕРАТУРА

1. Высоцкая А. А., Медведков А. А. Климатогенные изменения ландшафтов курумов на западе Среднесибирского плоскогорья в зональных условиях средней тайги // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2024. № 4. Р. 17–29. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.2.
2. Высоцкая А. А., Медведков А. А. Климатогенное «позеленение» курумных ландшафтов в долине нижнего течения реки Подкаменная Тунгуска // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2022. Т. 28. № 1. С. 305–313. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-305-313
3. Горчаковский П. Л., Шиятов С. Г. Фитоиндикация условий среды и природных процессов в высокогорьях. М.: Наука, 1985. 208 с.
4. Григорьев А. А., Шалаумова Ю. В., Терентьева М. В., Вьюхин С. О., Балакин Д. С., Моисеев П. А. Горные тундры Южного Урала: современное распространение и угроза исчезновения в XXI веке // Географическая среда и живые системы. 2024. № 3. С. 26–46. DOI: 10.18384/2712-7621-2024-3-26-46
5. Шиятов С. Г., Ваганов Е. А., Кирдянов А. В., Круглов В. Б., и др. Методы дендрохронологии. Красноярск: КрасГУ, 2000. 80 с.
6. Шиятов С. Г., Моисеев П. А., Григорьев А. А. Фотомониторинг древесной и кустарниковой растительности в высокогорьях Южного Урала за последние 100 лет. Екатеринбург, 2020. 191 с.
7. Daoud J. I. Multicollinearity and Regression Analysis // Journal of Physics Conference Series. 2017. Vol. 1. № 949. P. 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/949/1/012009
8. Dirnböck T., Essl F., Rabitsch W. Disproportional risk for habitat loss of high-altitude endemic species under climate change // Global Change Biology. 2011. Vol. 2. № 17. P. 990–996. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02266.x
9. Dullinger S., Dirnböck T., Grabherr G. Modelling climate change-driven treeline shifts: Relative effects of temperature increase, dispersal and invasibility // Journal of Ecology. 2004. Vol. 2. № 92. P. 241–252. DOI: 10.1111/j.0022-0477.2004.00872.x
10. Duncanson L., Montesano P. M., Neuenchwander A., Thomas N., Mandel A., et al. Aboveground Biomass Density for High Latitude Forests from ICESat-2, 2020/2023. DOI: 10.3334/ORNLLDAAC/2186
11. Grigoriev A. A., Mikryukov V. S., Shalaumova Yu. V., Moiseev P. A., Vuykhin S. O., et al. Struggle zone: alpine shrubs are limited in the

- Southern Urals by an advancing treeline and insufficient snow depth // *Journal of Forestry Research*. 2024. Vol. 97. № 35. DOI: 10.1007/s11676-024-01745-3
12. Hagedorn F., Dawes M. A., Bubnov M. O., Devi N. M., Grigoriev A. A., et al. Latitudinal decline in stand biomass and productivity at the elevational treeline in the Ural mountains despite a common thermal growth limit // *Journal of Biogeography*. 2020. Vol. 8. № 47. P. 1827–1842. DOI: 10.1111/jbi.13867
 13. Hagedorn F., Shiyatov S. G., Mazepa V. S., et al. Treeline advances along the Urals mountain range – driven by improved winter conditions? // *Global Change Biology*. 2014. Vol. 11. № 20. P. 3530–3543. DOI: 10.1111/gcb.12613
 14. Han J., Kamber M., Pei J. "Data Transformation and Data Discretization". *Data Mining: Concepts and Techniques* // Elsevier. 2012. P. 111–118. DOI: 10.1016/C2009-0-61819-5
 15. Hansson A., Dargusch P., Shulmeister J. A review of modern treeline migration, the factors controlling it and the implications for carbon storage // *Journal of Mountain Science*. 2021. Vol. 18. P. 291–306. DOI: 10.1007/s11629-020-6221-1
 16. Harsch M. A., Hulme P. E., McGlone M. S., Duncan R. P. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming // *Ecology Letters*. 2009. № 12. P. 1040–1049. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2009.01355.x
 17. Körner C. *Alpine treelines. Functional Ecology of the Global High Elevation Tree Limits*. Berlin: Springer, 2012. 220 p.
 18. Masson-Delmotte V., et al., eds. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. United Kingdom, NY, 2021. P. 3–32.
 19. Moiseev P. A., Hagedorn F., Balakin D. S., Bubnov M. O., Devi N. M., et al. Stand Biomass at Treeline Ecotone in Russian Subarctic Mountains Is Primarily Related to Species Composition but Its Dynamics Driven by Improvement of Climatic Conditions // *Forests*. 2022. Vol. 13. P. 254. DOI: 10.3390/f13020254
 20. Myers-Smith I. H., Forbes B. C., Wilkening M., Hallinger M. Shrub expansion in tundra ecosystems: dynamics, impacts and research priorities // *Environmental Research Letters*. 2011. № 6. P. 1–15. DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045509
 21. Nash J. E., Sutcliffe J. V. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles // *Journal of Hydrology*. 1970. Vol. 10. № 3. P. 282–290.
 22. Nelder J. A., Mead R. A Simplex Method for Function Minimization // *The Computer Journal*. 1965. Vol. 4. № 7. P. 308–313.
 23. Pauli H., Gottfried M., Dullinger S., et al. Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits // *Science*. 2012. № 336. P. 353–355. DOI: 10.1126/science.1219033
 24. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., et al. *Scikit-learn: Machine Learning in Python* // *Journal of Machine Learning Research*. 2011. № 12. P. 2825–2830. DOI: 10.48550/ARXIV.1201.0490
 25. Shapiro S. S., Wilk M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples) // *Biometrika*, 1965. Vol. 52. P. 591–611. DOI: 10.2307/2333709
 26. Spawn S. A., Gibbs H. K. *Global Aboveground and Belowground Biomass Carbon Density Maps for the Year 2010*. Oak Ridge, 2020. DOI: 10.3334/ORNLDAAC/1763
 27. Spawn-Lee S. A., Sullivan C. C., Lark T., Gibbs H. Harmonized global maps of above and belowground biomass carbon density in the year 2010 // *Scientific Data*. 2020. Vol. 1. № 7. DOI: 10.1038/s41597-020-0444-4
 28. Steinbauer M. J., Grytnes J. A., Jurasinski G., et al. Accelerated increase in plant species richness on mountain summits is linked to warming // *Nature*. 2018. № 566. P. 231–236. DOI: 10.1038/s41586-018-0005-6
 29. Toner W., Darlow L. An Analysis of Linear Time Series Forecasting Models // *Proceedings of Machine Learning Research*. 2024. Vol. 235. P. 48404–48427. DOI: 10.48550/arXiv.2403.14587
 30. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T. E., et al. *SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python* // *Nature Methods*. 2020. Vol. 17. № 3. P. 261–272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2
 31. Wilcoxon F. Individual comparisons by ranking methods // *Biometrics Bulletin*. 1945. Vol. 1. № 6. P. 80–83. DOI: 10.2307/3001968
 32. Zhang P., Liang Y., Liu B., Ma T., Wu M. M. A coupled modelling framework for predicting tree species' altitudinal migration velocity in montane forest // *Ecological Modelling*. 2023. Vol. 2. № 484. P. 110481. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2023.110481

REFERENCES

1. Vysotskaya A. A., Medvedkov A. A. [Climate-Driven Changes of Kurum Landscapes in the West of the Central Siberian Plateau within the Middle-Taiga Zone]. In: *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya* [Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography], 2024, no. 4, pp. 17–29. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.2
2. Vysotskaya A. A., Medvedkov A. A. [Climate-driven "greening" of the kurum landscape in

- the valley of the lower reaches of the Podkamennaya Tunguska river]. In: *InterKarto. InterGIS*, 2022, vol. 28, no. 1, pp. 305–313. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-305-313
3. Gorchakovskiy P. L., Shiyatov S. G. *Fitoindikatsiya usloviy okruzhayushchey sredy i razvitiya protsessov v usloviyakh krizisa* [Phytoindication of environmental conditions and natural processes in the highlands]. Moscow: Pravo Publ., 1985. 208 p.
 4. Grigoriev A. A., Shalaumova Yu. V., Terentyeva M. V., Vyukhin S. O., et al. [Mountain tundra of the South Urals: modern distribution and threat of extinction in the 21st century]. In: *Geograficheskaya sreda i zhivyye sistemy* [Geographical environment and living systems], 2024, no. 3, pp. 26–46. DOI: 10.18384/2712-7621-2024-3-26-46
 5. Shiyatov S. G., Vaganov E. A., Kirdyanov A. V., Kruglov V. B., et al. *Metody dendrokronologii* [Methods of dendrochronology]. Krasnoyarsk: Krassu Publ., 2008. 80 p.
 6. Shiyatov S. G., Moiseev P. A., Grigoriev A. A. *Fotomonitoring drevesnoy i kustarnikovooy rastitelnosti v vysokikhryakh Yuzhnogo Urala za posledniye 100 let* [Photo monitoring of woody and shrubby vegetation in the highlands of the Southern Urals over the past 100 years]. Yekaterinburg, 2020. 191 p.
 7. Daoud J. I. Multicollinearity and Regression Analysis. In: *Journal of Physics Conference Series*, 2017, vol. 1, no. 949, art. 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/949/1/012009
 8. Dirnböck T., Essl F., Rabitsch W. (2011). Disproportional risk for habitat loss of high-altitude endemic species under climate change. In: *Global Change Biology*, 2011, vol. 2, no. 17, pp. 990–996. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02266.x
 9. Dullinger S., Dirnböck T., Grabherr G. Modelling climate change-driven treeline shifts: Relative effects of temperature increase, dispersal and invisibility. In: *Journal of Ecology*, 2004, vol. 2, no. 92, pp. 241–252. DOI: 10.1111/j.0022-0477.2004.00872.x
 10. Duncanson L., Montesano P. M., Neuenchwander A., Thomas N., Mandel A., et al. *Aboveground Biomass Density for High Latitude Forests from ICESat-2, 2020*. DOI: 10.3334/ORNLDAAC/2186
 11. Grigoriev A. A., Mikryukov V. S., Shalaumova Yu. V., Moiseev P. A., Vuykhin S. O., Camarero J. J. Struggle zone: alpine shrubs are limited in the Southern Urals by an advancing treeline and insufficient snow depth. In: *Journal of Forestry Research*, 2024, vol. 97, no. 35. DOI: 10.1007/s11676-024-01745-3
 12. Hagedorn F., Dawes M. A., Bubnov M. O., Devi N. M., Grigoriev A. A., et al. Latitudinal decline in stand biomass and productivity at the elevational treeline in the Ural mountains despite a common thermal growth limit. In: *Journal of Biogeography*, 2020, vol. 8, no. 47, pp. 1827–1842. DOI: 10.1111/jbi.13867
 13. Hagedorn F., Shiyatov S. G., Mazepa V. S., et al. Treeline advances along the Urals mountain range – driven by improved winter conditions? In: *Global Change Biology*, 2014, vol. 11, no. 20, pp. 3530–3543. DOI: 10.1111/gcb.12613
 14. Han J., Kamber M., Pei J. "Data Transformation and Data Discretization". Data Mining: Concepts and Techniques. In: *Elsevier*, 2012, pp. 111–118. DOI: 10.1016/C2009-0-61819-5
 15. Hansson A., Dargusch P., Shulmeister J. A review of modern treeline migration, the factors controlling it and the implications for carbon storage. In: *Journal of Mountain Science*, 2021, no. 18, pp. 291–306. DOI: 10.1007/s11629-020-6221-1
 16. Harsch M. A., Hulme P. E., McGlone M. S., Duncan R. P. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. In: *Ecology Letters*, 2009, no. 12, pp. 1040–1049. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2009.01355.x
 17. Körner C. *Alpine treelines. Functional Ecology of the Global High Elevation Tree Limits*. Berlin: Springer, 2012. 220 p.
 18. Masson-Delmotte V., et al., eds. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. United Kingdom, NY, 2021. P. 3–32.
 19. Moiseev P. A., Hagedorn F., Balakin D. S., Bubnov M. O., Devi N. M., et al. Stand Biomass at Treeline Ecotone in Russian Subarctic Mountains Is Primarily Related to Species Composition but Its Dynamics Driven by Improvement of Climatic Conditions. In: *Forests*, 2022, no. 13, p. 254. DOI: 10.3390/f13020254
 20. Myers-Smith I. H., Forbes B. C., Wilkink M., Hallinger M. Shrub expansion in tundra ecosystems: dynamics, impacts and research priorities. In: *Environmental Research Letters*, 2011, no. 6, pp. 1–15. DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045509
 21. Nash J. E., Sutcliffe J. V. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. In: *Journal of Hydrology*, 1970, vol. 10, no. 3, pp. 282–290.
 22. Nelder J. A., Mead R. A Simplex Method for Function Minimization. In: *The Computer Journal*, 1965, vol. 4, no. 7, pp. 308–313.
 23. Pauli H., Gottfried M., Dullinger S., et al. Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits. In: *Science*, 2012, vol. 336, pp. 353–355. DOI: 10.1126/science.1219033

24. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. In: *Journal of Machine Learning Research*, 2011, no. 12, pp. 2825–2830. DOI: 10.48550/ARXIV.1201.0490
25. Shapiro S. S., Wilk M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples) In: *Biometrika*, 1965, no. 52, pp. 591–611. DOI: 10.2307/2333709
26. Spawn S. A., Gibbs H. K. *Global Aboveground and Belowground Biomass Carbon Density Maps for the Year 2010*. Oak Ridge, 2020. DOI: 10.3334/ORNLDAAAC/1763
27. Spawn-Lee S. A., Sullivan C. C., Lark T., Gibbs H. Harmonized global maps of above and below-ground biomass carbon density in the year 2010. In: *Scientific Data*, 2020, vol. 1, no. 7. DOI: 10.1038/s41597-020-0444-4
28. Steinbauer M. J., Grytnes J. A., Jurasinski G., et al. Accelerated increase in plant species richness on mountain summits is linked to warming. In: *Nature*, 2018, vol. 566, pp. 231–236. DOI: 10.1038/s41586-018-0005-6
29. Toner W., Darlow L. An Analysis of Linear Time Series Forecasting Models. In: *Proceedings of Machine Learning Research*, 2024, vol. 235, pp. 48404–48427. DOI: 10.48550/arXiv.2403.14587
30. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T. E., et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. In: *Nature Methods*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 261–272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2
31. Wilcoxon F. Individual comparisons by ranking methods. In: *Biometrics Bulletin*, 1945, vol. 1, no. 6, pp. 80–83. DOI: 10.2307/3001968
32. Zhang P., Liang Y., Liu B., Ma T., Wu M. M. A coupled modelling framework for predicting tree species' altitudinal migration velocity in montane forest. In: *Ecological Modelling*, 2023, vol. 2, no. 484, art. 110481. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2023.110481

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Григорьев Андрей Андреевич (г. Екатеринбург) — кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории геоинформационных технологий Института экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук;
e-mail: grigoriev.a.a@ipae.uran.ru; ORCID: 0000-0002-7446-0654

Ложкин Григорий Иванович (г. Казань) — ассистент кафедры моделирования экосистем Института экологии, биотехнологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального университета; инженер-исследователь лаборатории дендрохронологии Института географии Российской академии наук;
e-mail: lozhkin.grig@gmail.com; ORCID: 0009-0004-0962-3658

Вьюхин Сергей Олегович (г. Екатеринбург) — младший научный сотрудник лаборатории геоинформационных технологий Института экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук;
e-mail: sergey.vyuhin@mail.ru; ORCID: 0000-0001-7173-4878

Чижикова Нелли Александровна (г. Казань) — кандидат биологических наук, доцент кафедры моделирования экосистем Института экологии, биотехнологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального университета;
e-mail: nelly.chizhikova@stud.kpfu.ru; ORCID: 0000-0002-9969-9207

Кудрявцев Павел Павлович (г. Златоуст) — начальник научного отдела Национального парка «Таганай»;
e-mail: kudryavcev@taganay.org; ORCID: 0009-0008-0666-156X

REFERENCES

Andrey A. Grigoriev (Ekaterinburg) — PhD (Agriculture), Senior Researcher, Laboratory of Geoinformation Technologies, Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences;
e-mail: grigoriev.a.a@ipae.uran.ru; ORCID: 0000-0002-7446-0654

Grigory I. Lozhkin (Kazan) – Assistant, Department of Ecosystem Modeling, Institute of Ecology, Biotechnology, and Nature Management, Kazan (Volga Region) Federal University; Research Engineer, Laboratory of Dendrochronology, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences; e-mail: lozhkin.grig@gmail.com; ORCID: 0009-0004-0962-3658

Sergey O. Vyukhin (Ekaterinburg) – Junior Researcher, Laboratory of Geoinformation Technologies, Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: sergey.vyuhin@mail.ru; ORCID: 0000-0001-7173-4878

Nelli A. Chizhikova (Kazan) – PhD (Biology), Assoc. Prof., Department of Ecosystem Modeling, Institute of Ecology, Biotechnology, and Nature Management, Kazan (Volga Region) Federal University; e-mail: nelly.chizhikova@stud.kpfu.ru; ORCID: 0000-0002-9969-9207

Pavel P. Kudryavtsev (Zlatoust) – Departmentally Head, Research Department, Taganay National Park; e-mail: kudryavcev@taganay.org; ORCID: 0009-0008-0666-156X