
ОТКЛИКИ ЛАНДШАФТОВ И ЭКОСИСТЕМ НА ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Научная статья

УДК 581.091:57.045(234.851)

DOI: 10.18384/2712-7621-2025-4-7-34

ОТКЛИК ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ЗАПАДНОГО МАКРОСКЛОНА ПРИПОЛЯРНОГО УРАЛА НА СОВРЕМЕННОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ КЛИМАТА

© СС ВУ Григорьев А. А.¹, Вьюхин С. О.², Шубница Е. И.³,
Шалаумова Ю. В.⁴, Басманов А. А.⁵, Богачёв М. И.⁶

¹ Институт экологии растений и животных
Уральского отделения Российской академии наук
г. Екатеринбург, Российская Федерация
e-mail: grigoriev.a.a@iraе.uran.ru; ORCID: 0000-0002-7446-0654

² 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

³ Национальный парк «Югыд ва»
Республика Коми, г. Вуктыл, Российская Федерация
e-mail: shub07@yandex.ru; ORCID: 0000-0001-6198-7281

⁴ Институт экологии растений и животных
Уральского отделения Российской академии наук
г. Екатеринбург, Российская Федерация
e-mail: jyshalautova@gmail.com; ORCID: 0000-0002-0173-6293

⁵ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
e-mail: alex.basmanov00@gmail.com; ORCID: 0009-0009-8063-7987

⁶ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
e-mail: mibogachev@etu.ru; ORCID: 0000-0002-0356-5651

Поступила в редакцию 17.03.2025

После доработки 16.08.2026

Принята к публикации 12.09.2025

Аннотация

Цель. Провести качественную и количественную оценку изменения лесопокрываемых площадей и трансформации древесной растительности на верхнем пределе её произрастания в пределах западного макросклона Приполярного Урала.

Процедура и методы. На постоянных пробных площадях, заложенных на склонах разных экспозиций в экотоне верхней границы леса, сделано описание 750 деревьев на общей площади 2,32 га. Выполнено повторное пейзажное фотографирование древесной растительности с той же точки. Проведён сравнительный анализ пространственного и высотного расположения верхней границы редколесий на аэрофотоснимках и спутниковых изображениях 1963 и 2022 г. С использованием геоинформационных технологий сделаны расчёты изменения пространственно-временного положения верхней границы редколесий. На основе данных ширины годовых колец и аллометрических уравнений зависимости фитомассы деревьев от их диаметра произведена реконструкция погодичного накопления фитомассы древостоев. Проведён анализ динамики радиального прироста деревьев в последнем столетии.

Результаты. Установлено, что за последние 50–70 лет на западном макросклоне Приполярного Урала произошёл сдвиг верхней границы распространения редколе-

сий в сообщества горных тундр. Показано, что наиболее интенсивное кумулятивное изменение общей надземной фитомассы происходило в последнем столетии, особенно после 1950-х гг. Установлено, что в последние десятилетия (с 1990-х гг. по настоящее время) происходило увеличение радиального прироста деревьев независимо от их возраста. Отмечено, что продвижение и трансформация древесной растительности в последнем столетии происходила более медленными темпами, чем в других ранее исследованных частях Урала (Южный Урал, Северный Урал, Полярный Урал). Это может объясняться увеличением количества осадков в твёрдом виде и более поздними сроками схода снежного покрова.

Теоретическая и/или практическая значимость. Результаты исследования могут быть использованы при создании сценарных моделей климатогенной трансформации высокогорных экосистем Приполярного Урала.

Ключевые слова: изменение климата, динамика растительности, фитомасса древостоев, верхняя граница леса, геоинформационные технологии, Уральские горы

Благодарности. Работа выполнена в рамках научного сотрудничества Института экологии растений и животных УрО РАН и национального парка «Югыд ва». Авторы статьи выражают искреннюю благодарность профессору, д.б.н. С. Г. Шиятову за научную идею и исследовательскую мотивацию, Ю. С. Трубникову за помощь в сборе экспериментального материала. Исследования выполнены при поддержке Государственного задания Института экологии растений и животных УрО РАН № 122021000083-7. Методологические аспекты и инструменты анализа данных разработаны в рамках проекта Российского научного фонда (проект № 22-76-10042).

Для цитирования:

Григорьев А. А., Вьюхин С. О., Шубницина Е. И., Шалаумова Ю. В., Басманов А. А., Богачёв М. И. Отклик древесной растительности западного макросклона Приполярного Урала на современное потепление климата // Географическая среда и живые системы. 2025. № 4. С. 7–34. DOI: 10.18384/2712-7621-2025-4-7-34

Original Article

RESPONSE OF THE TREELINE OF THE WESTERN RIDGES OF THE SUBPOLAR URALS TO CURRENT CLIMATE CHANGE

© CC BY A. Grigoriev¹, S. Vyukhin², Shubnitsina E.I.³,
Y. Shalaumova⁴, A. Basmanov⁵, M. Bogachev⁶

¹ Institute of Plant and Animal Ecology (Ural Branch of the Russian Academy of Sciences)
Yekaterinburg, Russian Federation

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

² 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

³ National Park «Yugyd Va»

Komi Republic, Vuktyl, Russian Federation

e-mail: shub07@yandex.ru; ORCID: 0000-0001-6198-7281

⁴ Institute of Plant and Animal Ecology (Ural Branch of the Russian Academy of Sciences)
Yekaterinburg, Russian Federation

e-mail: jyshalaumova@gmail.com; ORCID: 0000-0002-0173-6293

⁵ St. Petersburg Electrotechnical University «LETI»

St. Petersburg, Russian Federation

e-mail: aabasmanov00@gmail.com; ORCID: 0009-0009-8063-7987

⁶ St. Petersburg Electrotechnical University «LETI»

St. Petersburg, Russian Federation

e-mail: mibogachev@etu.ru; ORCID: 0000-0002-0356-5651

Received 17.03.2025

Revised 16.08.2026

Accepted 12.09.2025

Abstract

Aim. This work aimed to qualitatively and quantitatively evaluate alterations in forest land cover and the transformation of woody vegetation at the upper limit of its growth within the western ridges of the Subpolar Urals.

Methodology. Permanent sample plots were established on different slopes within the upper forest ecotone, encompassing a total of 750 trees across an area of 2,32 ha. Repeated landscape photography of woody vegetation was carried out from the same point. A comparative analysis of the spatial and altitudinal distribution of the forest vegetation was conducted using aerial photographs and satellite multispectral imagery acquired between 1963 and 2022. Corresponding treeline positions were determined using GIS. Based on the tree-ring data and allometric equations relating tree phytomass to diameter, we reconstructed annual phytomass accumulation and analyzed tree radial growth dynamics over the past century.

Results. It has been established that a shift in the upper boundary of open forests into mountain tundra communities occurred on the western ridges of the Subpolar Urals over the past 50–70 years. The most intense cumulative change in total aboveground phytomass occurred during the last century, particularly after the 1950s. In recent decades (from the 1990s to the present), there has been an increase in radial growth of trees of all ages. However, the expansion and transformation of woody vegetation during the last century occurred at a slower pace than in other previously studied parts of the Urals (the Southern, Northern, and Polar Urals). This can be explained by an increase in the amount of solid precipitation and later dates for the melting of snow cover.

Research implications. Our results are indicative of the climate transformations in high-rise ecosystems of the Subpolar Urals.

Keywords: climate change, growth dynamics, tree phytomass, treeline, geoinformation technologies, Ural Mountains

Acknowledgements. This work was conducted as a part of a collaboration between the Institute of Plant and Animal Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences and the Yugyd Va National Park. The authors express their sincere gratitude to Professor S. G. Shiya-tov for the scientific concept and for inspiring this research, and to Yu. S. Trubnikov for assistance with collecting experimental data. This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under State Assignment no. 122021000083-7. Methodological aspects and data analysis tools employed in this research were partly developed under the support of the Russian Science Foundation (project no. 22-76-10042).

For citation:

Grigoriev A. A., Vyukhin S. O., Shubnitsina E. I., Shalaumova Yu. V., Basmanov A. A., Bogachev M. I. Response of the treeline of the western ridges of the Subpolar Urals to current climate change. In: *Geographical Environment and Living Systems*, 2025, no. 4, pp. 7–34. DOI: 10.18384/2712-7621-2025-4-7-34

ВВЕДЕНИЕ

Проблема изменения климата в последние десятилетия стала неотъемлемой частью научных дискуссий [11; 28]. Известно, что начиная с 1850 г. каждое из четырёх последних десятилетий было более тёплым по сравнению с любым предшествующим десятилетием. Масштабы происходящих изменений в климатической системе в целом, а также нынешнее состояние многих компонентов климатической системы,

являются беспрецедентными для периодов от многих столетий до многих тысяч лет [11]. Одним из последствий данного процесса является расширение ареалов древесных и кустарниковых видов в Арктике, криолитозоне и в горах [2; 30; 44]. Именно в этих экстремальных условиях растительность чутко реагирует на изменения условий среды и поэтому имеет индикаторное значение [2; 34; 43]. Неоднократно показано, что в последние десятилетия практически во всех горных системах мира и

на всех континентах планеты происходило стремительное продвижение древесной растительности в тундровые и альпийские сообщества [20; 22; 26]. Однако в отдельных горных регионах смещение границы леса не фиксируется даже при заметном потеплении, что связывают с сочетанием локальных топографических и микроклиматических ограничений [38].

Одним из наиболее исследованных и перспективных в данном отношении регионом являются Уральские горы [18; 49]. Эта горная страна протянулась с севера на юг от берегов студёного Карского моря до среднеазиатских степей и полупустынь практически на 3000 км, что позволяет исследовать процессы климатогенной трансформации высокогорных экосистем в разных широтах, но в пределах одной горной системы.

В пределах нескольких природных областей Урала (Южного, Северного, Приполярного и Полярного) существует важный биогеографический рубеж – климатически обусловленная верхняя граница древесной растительности, выше которой распространены горные тундры [4]. На Южном и частично Северном Урале граница леса сформирована из ели сибирской *picea obovata* L. Постепенно, по мере продвижения с юга на север, ель сменяется лиственницей сибирской *larix sibirica* L.; на Приполярном и Полярном Урале на верхнем пределе произрастания древостоя она уже является доминирующим видом [4; 49].

Значительный вклад в изучение динамики верхней границы леса и сопряжённых с этим природных процессов на Урале внесли профессор С. Г. Шиятов и его ученики – участниками созданной им уральской научной школы дендрохронологов [16]. По результатам многочисленных исследований, начиная с 1960-х гг., приведены убедительные доказательства значительных изменений в составе, структуре, фитомассе и высотном положении древостоев верхней границы леса в горах Урала, произошедших с начала XX в. по настоящее время [18; 49]. Установлены значительные сдвиги верхних пределов лесов в сообществах горных тундр на Южном, Северном, Приполярном и Полярном Урале [6; 16;

19; 49]. Показано, что существует тенденция ускорения данных процессов [27].

Известно, что значительное влияние на климат Уральских гор оказывают преобладающие северные – северо-западные ветра и осадки, особенно в северной части Урала, которых на западном макросклоне аккумулируется больше, чем на восточном [8]. Высказывались мнения, что именно по этим причинам положение верхней границы леса на западном макросклоне в среднем на 100 м ниже, чем на восточном [14]. До настоящего времени в основном все исследования динамики верхней границы леса проводились либо в центральных частях горной страны, либо на восточном макросклоне Урала. Западный макросклон Уральских гор и верхняя граница леса, особенно в северных широтах, на большей части Урала не исследовались, либо проведённые исследования носили исключительно описательный характер.

Одним из наименее изученных районов Урала до сих пор является Приполярный Урал. Эта горная провинция наиболее труднодоступна, и имеет свои отличительные природные (как геоморфологические, так и климатические) особенности.

Цель работы: выявление и количественная оценка пространственно-временных сдвигов верхних границ распространения древесной растительности и её трансформации на западном макросклоне Приполярного Урала (на примере хр. Сабля и г. Сундук).

Приполярный Урал – наиболее высокая, труднодоступная, характеризующаяся большим количеством осадков (до 1500 мм на западном макросклоне) горная провинция Урала. Благодаря своеобразию орографии и ландшафтно-климатических особенностей, Приполярный Урал в 1927 г. был выделен Североуральской экспедицией Академии наук в особый район Уральских гор. В настоящее время к Приполярному Уралу относят участок Уральских гор, протяжённостью около 240 км между верховьями р. Хулга и широтным участком течения р. Щугор (65°40' – 64°00'). В административно-территориальном отношении Приполярный Урал является частью Республики Коми (западный склон) и Ханты-Мансийского автономного окру-

га (восточный склон). Приполярный Урал в значительной степени отличается от других районов Урала (максимальными для всего Урала высотами основных горных хребтов, шириной горной полосы и количеством выпадающих осадков). Вследствие, своей сильной расчленённости территории (с колебаниями относительных высот до 500–1000 м), ярусности рельефа и широкого развития альпийских форм, в зимнее время здесь происходит неравномерное распределение снега по элементам рельефа. В пределах Приполярного Урала находятся самые высокие вершины Уральских гор. Ещё одно важное отличие Приполярного Урала от Полярного, и особенно от Северного, состоит в том, что это не узкая полоса с горным рельефом, а настоящая горная страна, в центральной части которой Уральский хребет расширяется до 150 км [10].

Упомянутые в введении горный массив – хр. Сабля (максимальная высота – 1425 м) и г. Сундук (максимальная высота – 1137 м) расположены в западной части Приполярного Урала (64,932436°, 58,818724°; 64,713086°, 59,295942°). Особенностью этих массивов является то, что они представлены первыми меридиональными гребнями на пути западных воздушных масс, а в геоморфологическом отно-

шении отличаются несвойственным для Уральских гор альпинотипичным характером рельефа и крайней труднодоступностью [3; 5; 15; 34].

Район исследований входит в заповедную (Саблинский хребет) и особо охраняемую (г. Сундук) зоны Национального парка «Югыд ва». Здесь ранее не велась промышленная деятельность: геологоразведка и/или добыча полезных ископаемых. Расстояние до ближайшего города по прямой (г. Печора) составляет более 60 км.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе реализации данного исследования применялся комплекс методов: анализ материалов дистанционного зондирования, повторное сравнение фотоснимков, лесотаксационный, дендрохронологический и статистическая обработка собранных данных.

Данные дистанционного зондирования

Оценка сдвигов верхней границы редколесий (ВГР) с сомкнутостью крон 10–20% проводилась путём сравнительного анализа аэрофотоснимков 1963 г. и спутникового изображения 2025 г. В геоинформаци-

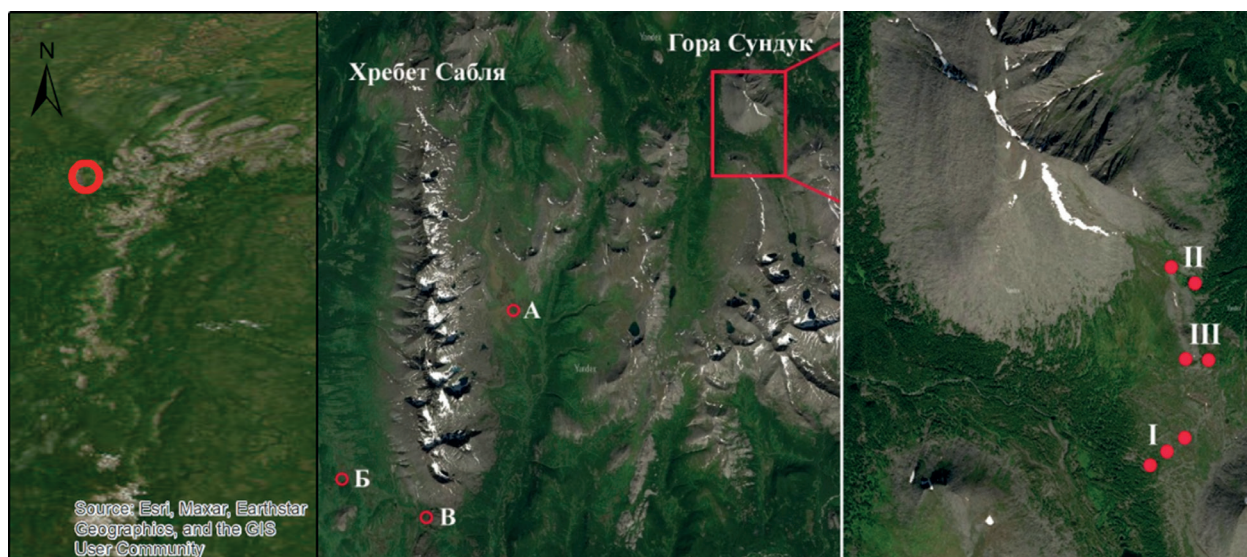


Рис. 1 / Fig. 1. Карта схема района исследования: А, Б, В – места расположения разновременных пейзажных фотоснимков; I, II, III – места расположения высотных профилей / Map of the study area: А, Б, В – locations of landscape photographs taken at different times; I, II, III – locations of elevation transects

Источник: составлено авторами

онной системе ArcGIS (ESRI Inc., США) эти данные были совмещены с цифровой моделью рельефа разрешения 2×2 м (ArcticDEM v.4.1), после чего вручную оцифрованы исторические и современные границы распространения редколесий. Область сдвига ВГР была разделена на участки с сильным и слабым влиянием эдафических ограничений (заболачивание, отсутствие почвенного покрова). Высотное положение ВГР (минимальное, максимальное, среднее ± среднее квадратическое отклонение) оценивалось по значениям ячеек цифровой модели рельефа, находящихся на линиях, очерчивающих распространение редколесий. Разница средних значений для исторической и современной ВГР рассчитывалась в каждом анализируемом сегменте, учитывающем разделение по распространению каменистых россыпей, для которой затем вычислялось взвешенное среднее по площади. При анализе горизонтального продвижения ВГР использовалась функция оценки евклидова расстояния. Расстояние измерялось от линии, очерчивающей границу редколесий в начале исследуемого периода, до линии их современного распространения. На основе полученных результатов определяли медиану величины сдвига. При этом участки без выраженных эдафических ограничений позволяют получить более точную оценку скорости сдвига ВГР, обусловленную преимущественно климатическими изменениями. Оценка площади экспансии редколесий выполнена по данным цифровой модели рельефа с применением метода билинейной интерполяции (при вычислении используются значения четырёх ближайших ячеек).

С целью выявления наиболее благоприятных условий для продвижения ВГР в высокогорьях были рассмотрены факторы среды, которые могут оказывать существенное влияние. Область сдвига ВГР разделили на участки в соответствии с грациями морфометрических (рассчитанных по цифровой модели рельефа) и климатических (полученных с платформы Google Earth Engine) параметров. Экспозиция склонов подразделялась на группы по 45°: северная (С, 337,5–22,5°), северо-восточная (СВ, 22,5–67,5°) и т. д. Кру-

тизна склонов была разбита на категории в диапазоне от 0 до 90° с шагом 10°. Для оценки продолжительности залегания снега использовался нормализованный разностный индекс снега – NDSI (*Normalized Difference Snow Index*) [37] (набор данных MODIS/061/MOD10A1). За период с 01.01.2018 по 01.06.2023 рассчитывались медианные значения NDSI, а затем полученный диапазон был разделён на интервалы, начиная со значения ≤ 44 до 72 с шагом 4. Оценка распределения облачности, оказывающей заметное влияние на величину поступающей солнечной радиации для древесной растительности, проводилась с помощью индекса облачности (набор данных COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_CLOUD). Индекс оценивался по медианам за тот же период, что и NDSI, но в данном случае диапазон значений с 0,61 до 0,66 был разделён на группы с шагом 0,01.

Информация о состоянии растительного покрова получена по данным дистанционного зондирования Земли со спутников Landsat 4...9 [47], доступным для района г. Сундук с 1985 г. за июль и август. Использовались данные отражения верхней границы атмосферы (TOA), прошедшие относительную радиометрическую коррекцию, а также данные температуры поверхности (LST). Спектральные каналы и производные индексы применялись для оценки межгодовой динамики вегетационного состояния, тогда как LST рассматривалась как дополнительная характеристика поверхности, отражающая различия в тепловом и влажностном режиме экотона. Для относительной коррекции в качестве эталона было выбрано одно атмосферно скорректированное изображение Landsat 7 с минимальным содержанием облаков (ID: LANDSAT/LE07/C02/T1_L2/LE07_168015_20010717), относительно которого были скорректированы все остальные с использованием метода сопоставления псевдоинвариантных признаков (Pseudo-Invariant Feature Matching, PIF) [39]. Псевдоинвариантные пиксели отбирались с помощью меры сходства между спектрами Spectral Angle Mapper (SAM) по порогу ниже 10-го перцентиля [40]. Обработка данных выполнялась на платформе Google Earth Engine [33].

Повторная ландшафтная фотосъёмка

Предварительно была проведена работа по поиску исторических снимков в архивах, у исследователей, в музеях Института экологии растений и животных УрО РАН, Института биологии Коми НЦ УрО РАН, Института геологии Коми НЦ УрО РАН. В данном исследовании были использованы исторические снимки экспедиций прошлых лет, сделанные в окрестностях южной части хребта Сабля и у ледника Гофмана: 1929 г. — А. Н. Алешков, 1951 г. — М. В. Фишман, 1954 г. — П. Л. Горчаковский и С. Г. Шиятов. Обязательными условиями для данных работ было соответствие времени года и нахождение точного места прежней съёмки, с которого производился повторный снимок. В общей сложности было получено более 20 пар повторных снимков.

Морфологическая и возрастная структура древостоев

Осенью 2023 г. на склонах г. Сундук было заложено 3 высотных профиля, ориентированных по следующим сторонам света: I — юго-западный, II — юго-восточный, III — восточный, на месте произрастания древесной растительности, не включающих участки каменистых россыпей (рис. 1). На каждом склоне было заложено от 2 до 3 высотных уровней, в зависимости от наличия древостоев определённой сомкнутости. Главным критерием при выделении высотных уровней являлись высота произрастания древостоев и сомкнутость крон.

На юго-западном склоне фиксировалось 3 высотных уровня: 1 — на границе отдельных деревьев в тундре, 2 — на границе распространения редколесий, 3 — на границе распространения сомкнутых лесов. На юго-восточном (профиль II) и восточном (профиль III) склонах фиксировалось 2 высотных уровня: 1 — на границе отдельных деревьев в тундре, 2 — на границе распространения сомкнутых лесов. На каждом высотном уровне закладывались либо круговые пробные площади размером 0,0227 га, либо, если деревья были сильно разрежены (верхние высотные уровни) — прямоугольные полигоны размером от 0,18 до 1,1 га. На каждой

пробной площади и полигоне фиксировалось точное местоположение каждого дерева, диаметр у основания, диаметр на высоте 1,3 м, диаметр кроны в двух взаимно перпендикулярных направлениях, возраст, высота и жизненное состояние [27].

Возраст деревьев определялся путём взятия радиальных кернов древесины у основания ствола дерева с последующей их обработкой в лабораторных условиях. Керны древесины были наклеены на деревянные основы и зачищены опасным лезвием. Для лучшей визуализации годовичных колец керны были пигментированы зубным порошком. Все образцы были измерены на полуавтоматической установке *Lintab 5* с точностью до 0.01 мм.

Дальнейшая обработка проводилась согласно общепринятым методам дендрохронологии [12]. Для выявления ложных и выпадающих колец была построена обобщённая древесно-кольцевая хронология для района исследований, в сравнении с которой проводилась датировка индивидуальных древесно-кольцевых хронологий. С целью определения поправки на высоту бурения были исследованы ход роста деревьев в молодом возрасте. При обследовании радиальных кернов древесины спилов деревьев, визуальном осмотре стволов деревьев было установлено, что исследуемые древостои за последние как минимум 450 лет не подвергались пожарам, так как следы от повреждения пожаром отсутствовали. В общей сложности на заложенных высотных профилях были исследованы 750 деревьев, на общей площади 2,32 га.

Поскольку наиболее распространённым древесным видом на исследованных пробных площадях была *Larix sibirica*, дальнейший анализ в настоящей статье приводится по этому виду. Менее распространённый древесный вид — *Betula tortuosa*, единично встречаются *Abies sibirica*, *Picea obovata*, в подлеске — *Juniperus sibirica* Burgsd.

Оценка динамики формирования надземной фитомассы и радиального роста деревьев и древостоев

Для оценки запасов надземной фитомассы лиственничного древостоя были использованы ранее полученные регрессионные уравнения зависимости надзем-

ной фитомассы от диаметра у основания ствола для экотона лес-горная тундра на Приполярном Урале [35]: для верхних уровней $y=0.016 x^{2.63}$; для средних уровней $y=0.014 x^{2.75}$; для нижних уровней $y=0.013 x^{2.75}$. Статистические параметры уравнений были рассчитаны отдельно для каждого высотного уровня: верхней границы редины, редколесий и сомкнутых лесов.

Для оценки погодичного изменения запасов надземной фитомассы были использованы значения ширины годичных колец отобранных образцов. При помощи полученных формул был рассчитан запас фитомассы для каждого календарного года в экотоне лес – горная тундра, переведённый на площадь. В дальнейшем был проведён расчёт накопленной фитомассы для каждого высотного профиля погодично в течение последнего столетия.

Поскольку изменение динамики прироста обусловлено множественными факторами, включая изменения возрастной структуры леса, климатические изменения, особенности локальных условий местообитания и др. [12], был выполнен детализированный анализ динамики относительных локальных трендов $x = \Delta y/\sigma$, где Δy – абсолютное увеличение годичного прироста, σ – стандартное отклонение годичного прироста за интервал анализа [25]. Оценки относительных трендов x , полученные для древесно-кольцевых хронологий каждого дерева, нормировались к аналогичным оценкам для модельных рядов данных равной длительности с типичными показателями инерционности прироста. При этом в качестве типичной модели инерционности использовалось консенсусное значение показателя Хёрста, полученное в предыдущих дендрохронологических исследованиях для многолетних наблюдений $H=1,0$ [46] по методике, аналогичной описанной в работах [29; 42].

Для уточнения климатически обусловленных факторов прироста в дальнейшем выполнялось декомпозиция динамики годичного прироста (TRW) и, соответственно, её локальных трендов на основные компоненты:

$$TRW = X_{age} + X_{clim} + X_{local},$$

представляющие возрастные изменения, климатически обусловленные и прочие, связанные с локальными условиями местообитания, которые не могут быть отнесены к первым двум группам факторов.

Для оценки возрастной кривой динамики использовалась стандартная методика с выравниванием древесно-кольцевых хронологий по возрасту и усреднением для каждого вида и местообитания. Для выделения климатически обусловленных флуктуаций динамики прироста выполнялась их реконструкция на основе частных корреляций с климатическими колебаниями по методике, описанной в [41]. Реконструкция выполнялась в форме непараметрической байесовской сети [13; 48] с помощью программного инструментария BANSHEE [24], разработанного специалистами Потсдамского института климатических исследований (PIK).

При построении реконструкции делались следующие допущения:

- возрастные изменения полагались универсальными для заданного вида деревьев, но пропорционально масштабируемыми (с сохранением формы возрастной кривой) в зависимости от иных факторов (локальных условий местообитания на разных площадках, а также климатических флуктуаций);

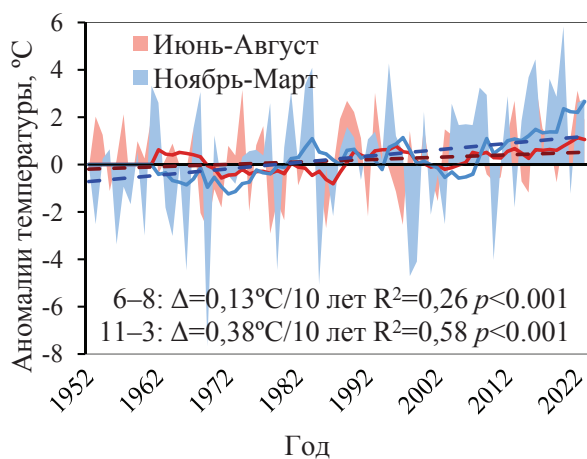
- в качестве входных параметров модели использовались показатели среднесезонной температуры и индекса засушливости Палмера за 10 сезонов, включающих и предшествующих сезону анализируемого прироста (всего 20 переменных), общие для всех исследованных участков;

- влияние климатических флуктуаций на относительную динамику прироста определялось взаимными корреляциями Спирмена, статистически накопленными для деревьев каждого из исследуемых видов. Подобный подход отражает возможное масштабирование абсолютного прироста на фоне различий локальных условий местообитания, но с сохранением относительного характера взаимосвязей.

Климатические данные

Оценка климатических условий в регионе исследования проводилась по данным АМСГ «Печора» (индекс 23418, 65°07' с.ш.,

57°06' в.д., абсолютная высота — 53 м), расположенной в 90 км от изучаемых объектов. Динамика температуры приземного воздуха проанализирована за период 1952–2023 гг., скорректированных суммарных осадков — за период 1944–2015 гг. Корректировка данных о количестве осадков учитывала поправки на смачивание и смену приборов. Исходные данные взяты из базы данных Росгидромета России¹. Для анализа климатических данных рассматривались тёплый (июнь–август) и холодный (ноябрь–март) сезоны. Выбор тёплого периода соответствовал фазе наиболее активного роста древесно-кустарниковой растительности на исследуемых участках, когда дневные температуры превышают 5°C. К холодному периоду относились месяцы со средней температурой воздуха ниже 0°C и относительно стабильной высотой снежного покрова. Аномалии климатических параметров в тёплый и холодный периоды каждого года определялись по отклонению текущего значения от среднего за базовый период 1961–1990 гг. Далее вычислялись ряды скользящих средних значений за 10-летний период, на основе которых были получены модели линейной регрессии для оценки трендов климатических параметров.



РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ климатических изменений

Анализ рядов инструментальных наблюдений на ближайшей к хр. Сабля и г. Сундук метеостанции за более чем 70-летний период показал выраженные тенденции потепления и увлажнения климата (рис. 2). В холодное время года повышение средней температуры воздуха было практически в 3 раза больше, чем в тёплый период (0,38°C / 10 лет и 0,13°C / 10 лет). Обратная тенденция наблюдается для показателя суммарного количества осадков, увеличение которого в тёплом сезоне двукратно превысило аналогичные значения холодного сезона (8,4 мм / 10 лет и 3,4 мм / 10 лет).

Количественная оценка пространственно-временного сдвига верхней границы редколесий

Анализ продвижения верхней границы редколесий на г. Сабля показал, что доля участков, выше которых наблюдается широкое распространение каменистых россыпей или заболоченных участков, составляет в 1963 и 2024 г. 39 и 32% (рис. 3) и оказывает сдерживающее воздействие на расселение деревьев. На склонах с таким

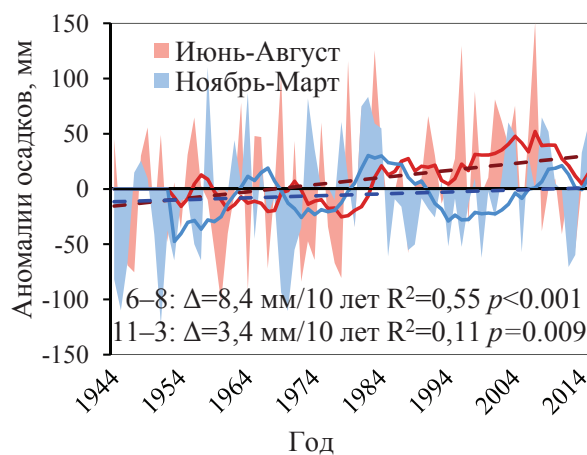


Рис. 2 / Fig. 2. Аномалии средней температуры воздуха и суммарных осадков для тёплого (июнь–август, показаны красным) и холодного (ноябрь–март, показаны синим) периодов на метеостанции «Печора» (а, б). Аномалии рассчитаны относительно базового периода 1961–1990 гг. Сплошной линией обозначено 10-летнее скользящее среднее, пунктиром — тренд линейной регрессии / Anomalies of mean air temperature and total precipitation for the warm (June–August, shown in red) and cold (November–March, shown in blue) periods at the Pechora weather station (a, b). Anomalies are calculated relative to the base period of 1961–1990. The solid line indicates the 10-year moving average, and the dotted line represents the linear regression trend

Источник: составлено авторами

¹ Росгидромет России: [сайт]. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/opendata> (дата обращения: 25.10.2025).

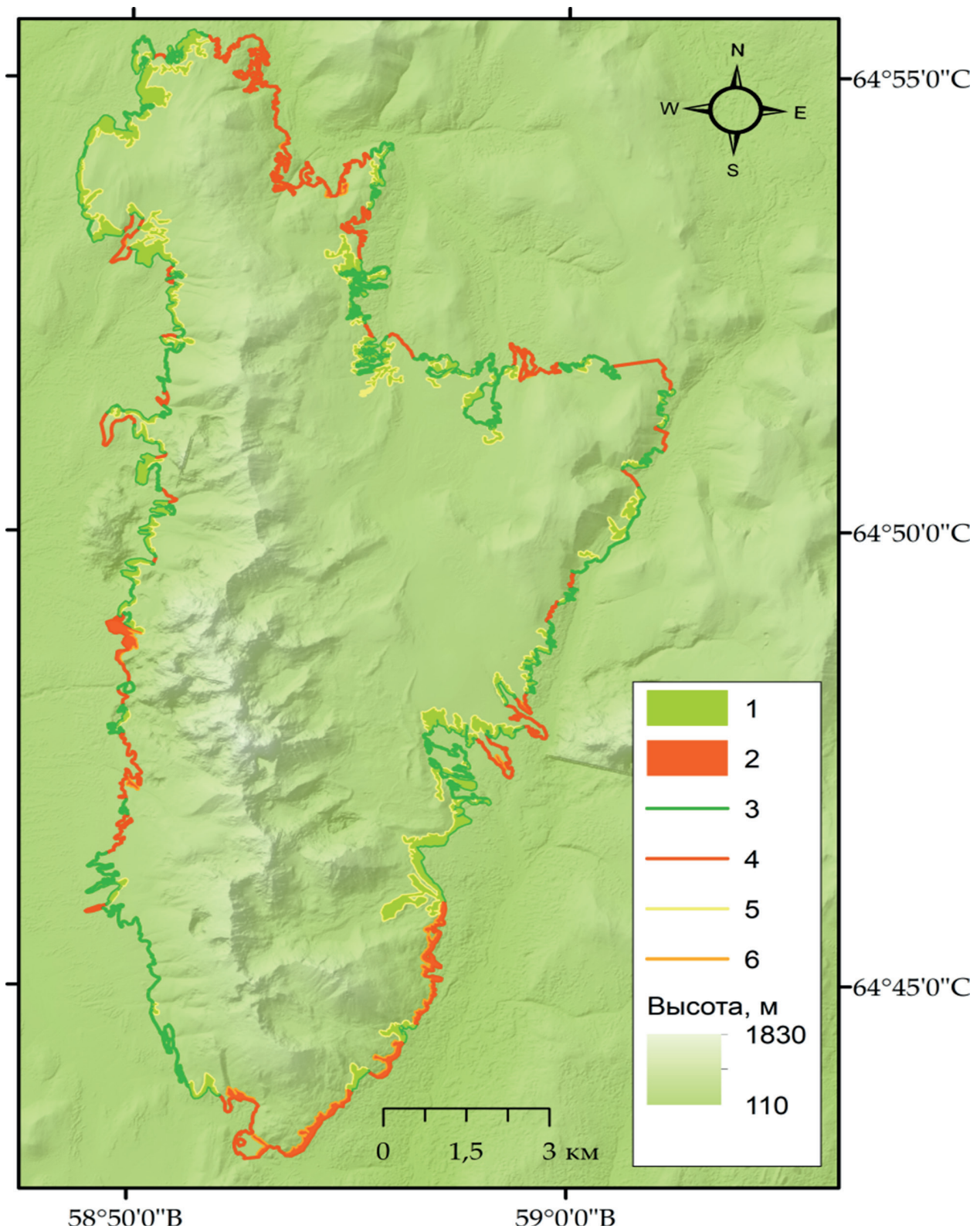


Рис. 3 / Fig. 3. Площадь продвижения верхней границы редколесий (1 и 2) и её высотное положение в 1963 (3 и 4) и 2024 гг. (5 и 6) на г. Сабля, Приполярный Урал (1, 3, 5 – на склонах без сильных эдафических ограничений; 2, 4, 6 – на склонах с сильными эдафическими ограничениями) / The area of shift of the upper open forest boundary (1 and 2) and its altitudinal position in 1963 (3 and 4) and 2024 (5 and 6) on Mount Sabylya, Subpolar Urals (1, 3, 5 – on slopes without strong edaphic restrictions; 2, 4, 6 – on slopes with strong edaphic restrictions)

Источник: составлено авторами

типом эдафических условий минимальное и максимальное значения высотного положения границы редколесий за прошедшие 63 года не изменилось, а среднее высотное положение ниже (до 38 м), чем на участках без заметных эдафических ограничений (табл. 1). При оценке динамики экспансии древостоев в горную тундру проведено сопоставление участков со слабой и сильной степенью распространения каменистых россыпей или заболоченности. Это сравнение показало, что на участках без выраженных эдафических ограничений превышение показателей сдвига по вертикали и горизонтали составило 9 и 1,6 раза соответственно. Скорость сдвига для типа ВГР без эдафических ограничений достигает 2,3 м / 10 лет по вертикали и 9,1 м / 10 лет по горизонтали. Общая площадь продвижения границы редколесий составила 471,8 га. На участках с незначительным распространением каменистых россыпей или заболоченных участков редколесья продвигались в основном по склонам южной и юго-западной экспозиции (34%), с крутизной $\leq 10^\circ$ (55%), значением NDSI (нормализованный разност-

ный индекс снега) 56–64 (72%), индексом облачности 0,64–0,65 (28%), тогда как при сильных эдафических ограничениях преобладали северные и северо-восточные склоны (42%), с большей крутизной 10–20° (38%), значением NDSI 52–60 (60%), индексом облачности 0,64–0,65 (45%).

Полученные повторные фотоснимки наглядно демонстрируют, что за последние 75–70 лет в районе Саблинского хребта произошли определённые изменения в распределении лесопокрываемых площадей (рис. 4). За рассматриваемый временной интервал произошло определённое смещение границы распространения древесной растительности вверх по склонам, а также увеличение плотности и морфометрических параметров произрастающих ранее древостоев.

Наиболее заметные изменения произошли на относительно пологих, лучше дренированных, более сухих участках склонов и на возвышениях. Не произошло сдвига границы леса на сильно каменистых участках и распространённых в значительном количестве на хр. Сабля заболоченных участках склонов.

Таблица 1 / Table 1

Изменение высотной позиции верхней границы редколесий на г. Сабля, Приполярный Урал за период 1963–2024 гг. / Changes in the altitude of the upper boundary of sparse forests on Mount Sablya, in the Subpolar Urals, over the period 1963–2024

Параметр	Тип верхней границы		
	Склоны без сильных эдафических ограничений	Склоны с сильными эдафическими ограничениями	
Высотное положение	минимальное, м	с 299 до 336	с 307 до 307
	максимальное, м	с 610 до 624	с 680 до 680
	среднее, м	с 489±47 до 497±44	с 457±69 до 459±67
Вертикальный сдвиг	среднее, м	14,4	1,6
	скорость, м/ 10 лет	2,3	0,3
Горизонтальный сдвиг	медиана, м	56,6	35,4
	скорость, м/10 лет	9,1	5,7
Площадь продвижения границы редколесий	значение, га	391,5	80,3
	скорость, га/10 лет	63,2	13,0

Источник: составлено авторами

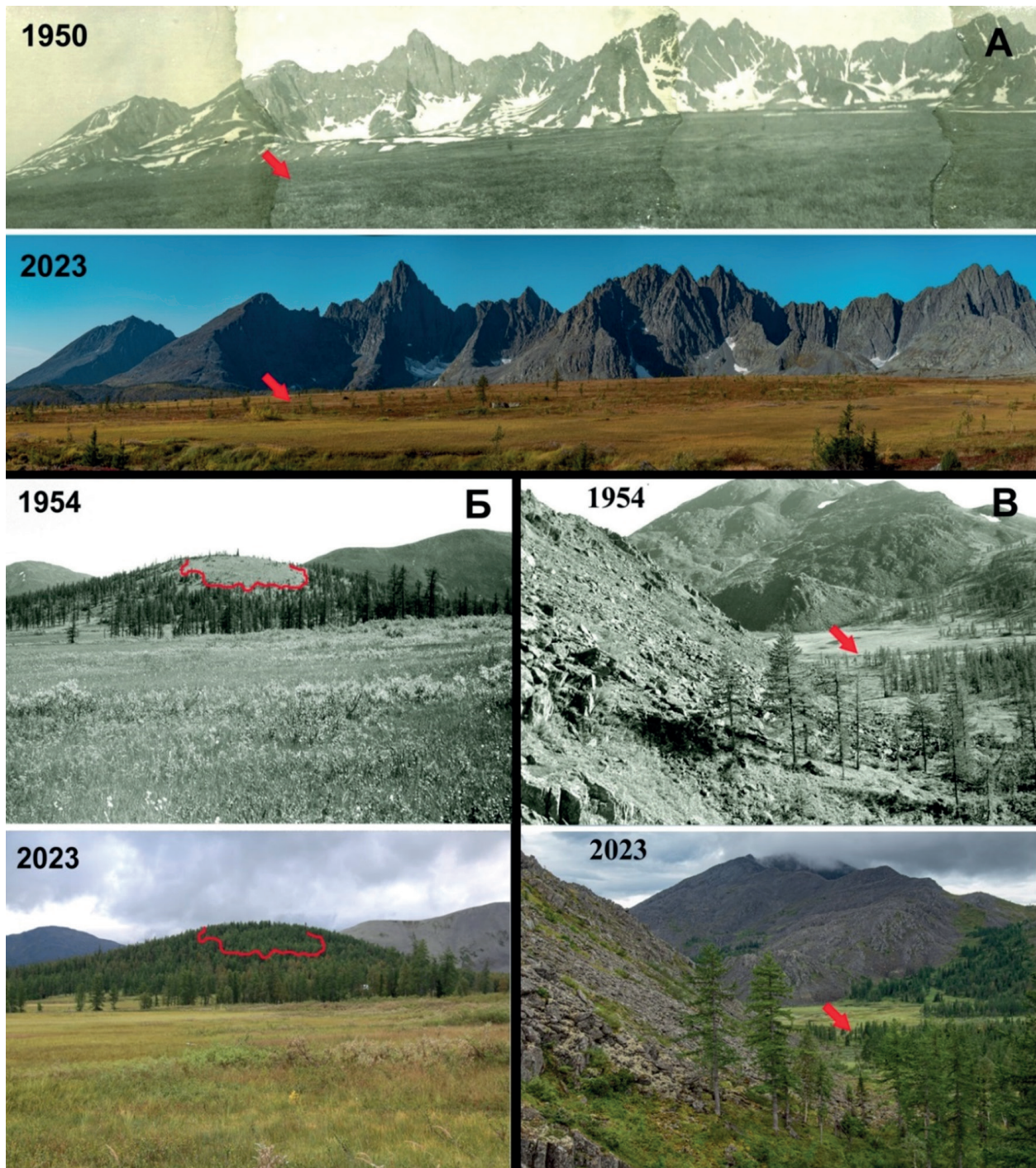


Рис. 4 / Fig. 4. Разновременные фотоснимки, сделанные на хр. Сабля / Photographs taken at different times on Mount Sablya, Subpolar Urals

Источник: 1950 г. — фото М. В. Фишмана, 1954 г. — фото П. Л. Горчаковского, 2023 г. — фото А. А. Григорьева, Ю. С. Трубникова

Морфологическая и возрастная структура древостоев

На заложенных высотных профилях по мере продвижения в гору (по мере ухудшения условий для роста) наблюдается закономерное уменьшение морфометрических параметров деревьев (табл. 2). Так,

средняя высота деревьев уменьшается в 2 раза, диаметр на 1,3 м в 2–3 раза, диаметр кроны в 1,5–2 раза. Особого внимания заслуживает уменьшение среднего и максимального возраста деревьев, причём наиболее значительные изменения наблюдаются при переходе от средней к верхней

Таблица 2 / Table 2

Средние морфометрические и площадные характеристики лиственничных древостоев на заложенных высотных профилях / Average morphometric and area characteristics of larch stands along established altitudinal profiles

Профиль и уровень	Экспозиция	Высота над ур.м.	Диаметр на 1.3 м (см)		Высота ствола (м)		Возраст (лет)		Диаметр кроны (м)		Проективное покрытие крон м ² /га	Отпад, шт./га	Густота, шт./га	
			Средн.	Макс.	Средн.	Макс.	Средн.	Макс.	Средн.	Макс.			<1.5м	>1.5м
1_1	SW	645	9.6±6.3	30.2	4.8±2.4	10.5	38±5	115	2.3±1.1	6.4	452	14	57	112
1_2		620	14.8±8.7	37.3	7.3±3.4	16.0	124±9	290	2.9±1.3	6.5	3973	18	44	625
1_3		610	18.6±7.7	41.7	8.8±3.3	15.0	167±12	347	3.0±1.2	6.0	5033	55	22	617
2_1	NE	660	8.5±1.1	22.9	4.3±2.1	8.7	45±5	117	2.2±1.1	6.2	126	2	32	25
2_2		584	27.4±14.1	57.3	11.9±4.6	19.0	153±12	371	4.7±2.2	9.5	12717	44	0	646
3_1	E	650	7.3±5.2	21	4.4±2.3	9.0	106±8	153	2.5±0.9	3.7	678	11	11	250
3_2		640	14.8±6.8	29.3	7.7±2.8	14.0	153±11	343	2.9±0.9	5.0	2579	79	f	510

Источник: составлено авторами

части экотона. Деревья, произрастающие на самых высоких позициях, отличаются значительно меньшим возрастом от деревьев, произрастающих на нижних уровнях. Площадные характеристики также изменяются (уменьшаются) по мере продвижения в гору – площадь проективного покрытия крон в 5–10 раз, густота деревьев в 2–20 раз.

Возрастная структура исследованных древостоев и история заселения склонов имеют значительные различия в зависимости от высоты их произрастания над уровнем моря и экспозиции (рис. 5). На юго-западном профиле на нижнем уровне первые лиственницы стали появляться ещё в середине XVII в. Этот процесс происходил без явных всплесков численности вплоть до XX в. На уровне «II» деревья стали появляться примерно на 100 лет позднее, а период наиболее массового возобновления деревьев пришёлся на вторую половину XX в. На верхнем уровне деревья стали появляться только в XX в., наиболее активно – во второй половине столетия.

На юго-восточном профиле на уровне «II» единичные деревья заселялись ещё в середине XVII в., более массово этот процесс стал происходить здесь в середине XVIII в. На верхнем уровне деревья появились в небольшом количестве только в XX в. Примерно схожим образом заселялись деревья лиственницы на III профиле.

Сделанные расчёты накопленной надземной фитомассы древостоев лиственницы свидетельствуют (рис. 6), что наибольший вклад в формирование надземной фитомассы в экотоне верхней границы леса г. Сундук вносят древостои, произрастающие на II уровне юго-восточного склона. Здесь к настоящему времени фитомасса достигает 250 т/га. Примерно равную (до 100 т/га) надземную фитомассу формируют древостои, произрастающие на III уровне юго-западного склона и II уровне восточного склона. Данные графического изображения свидетельствуют, что по мере продвижения с нижних уровней к верхним надземная фитомасса может различаться в 250 раз.



Рис. 5 / Fig. 5. Распределение количества деревьев по периодам их появления на заложенных высотных профилях / Distribution of the number of trees by periods of establishment along the elevation transects

Источник: составлено авторами

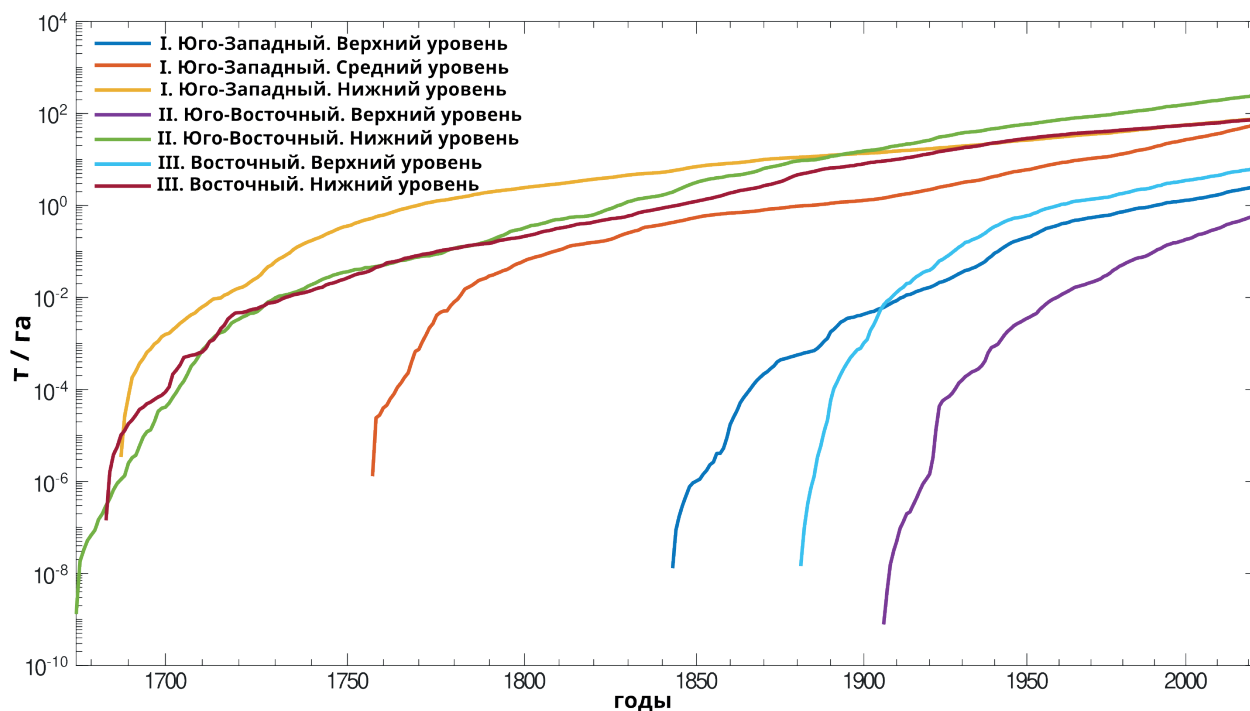


Рис. 6 / Fig. 6. Накопление надземной фитомассы лиственничных древостоев на заложенных высотных профилях / Accumulation of aboveground phytomass of larch stands on the elevation transects

Источник: составлено авторами

В целом, выявляется, что на исследованных склонах г. Сундук наиболее значительное увеличение фитомассы произошло в последнем столетии, причём накопление фитомассы за последние 4 десятилетия (1984–2023) было примерно в 2,5 раза выше, чем в 4 предыдущие десятилетия (1944–1983).

Изменение динамики радиального прироста на фоне возрастных и климатических изменений

Рассмотрим динамику среднего годового прироста деревьев по отдельным площадкам и в скользящем временном окне длительностью 5 лет (рис. 7). Для нижнего и среднего уровней залитыми символами отражены статистически значимые различия с верхним уровнем (U-тест Манна-Уитни, $p < 0,05$).

Из рисунка видно, что наблюдается увеличение интенсивности радиального прироста лиственницы с ~2000 г. по настоящее время, по крайней мере, для 2 из 3 профилей, причём интенсификация прироста статистически значимо более выражена на нижних уровнях. Также можно отметить циклический характер изменения динамики прироста, формирующий «пилообразный» сигнал с плечом порядка 5–10 лет, что в принципе достаточно часто наблюдается для хвойных пород [47].

Результаты оценки относительных трендов длительностью от 5 лет и более приведены на рисунке 8, при этом цветовая палитра ограничена $\pm 2/\sigma$, что соответствует 95% доверительному интервалу случайных флуктуаций процесса с $H=1,0$, соответствующего нулевой гипотезе (отсутствию статистически значимого внешнего фактора тренда). Из рисунка видно, что статистически значимые тренды наблюдаются для периодов прироста в начале XX в., предположительно обусловленные возрастными изменениями. В то же время визуально выраженные тренды прироста в начале XXI в. лежат в пределах доверительного интервала, что предположительно обусловлено неоднородной возрастной структурой и связанным с этим значительным разбросом прироста отдельных деревьев.

Результаты анализа реконструкций климатически обусловленной составляющей относительных флуктуаций динамики годового прироста с использованием байесовского прогнозирования приведены на рисунке 9. Из рисунка видно, что из динамики прироста исключены ранее наблюдавшиеся возрастные тренды, однако проявляются выраженные климатически обусловленные тренды для большинства записей, захватывающих период начала XXI в. При этом для лиственницы на нескольких площадках наблюдается выход относительной динамики трендов за 95% доверительный интервал, что указывает на аномальное увеличение динамики прироста на фоне текущих климатических изменений по сравнению с консенсусными оценками, полученными по данным многолетних (в том числе палеодендрологических) исследований, отражающих типичную инерционность прироста хвойных пород деревьев с учётом их адаптивности к климатическим флуктуациям [42; 46].

Для сопоставления дендрохронологических оценок накопления надземной фитомассы с данными ДЗЗ использовали набор спектральных индексов, чувствительных к различным свойствам дневной поверхности. Как правило, спектральные индексы характеризуют экологически значимые свойства ландшафтов, индицируя биоклиматические условия [1]. В данной работе использованы такие индексы, как: *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*) и *EVI* (*Enhanced Vegetation Index*) рассматривались как обобщённые показатели зелёной фитомассы и вегетационной активности; *NDMI* (*Normalized Difference Moisture Index*) – как показатель влагосодержания растительного покрова; *NBR* (*Normalized Burn Ratio*) и *NBR2* (*Normalized Burn Ratio 2*) – как индексы, чувствительные к древесной растительности и влажностным особенностям поверхности [50; 54]. *NDSI* использовали как индикатор снеговых условий; *MNDWI* (*Modified Normalized Difference Water Index*) [23; 53] – как индикатор переувлажнённых поверхностей; *VARI* (*Visible Atmospherically Resistant Index*) [32], рассчитываемый по каналам видимого диапазона, применяли как дополнительный показатель зелёности; *SLAVI* (*Specific Leaf Area*

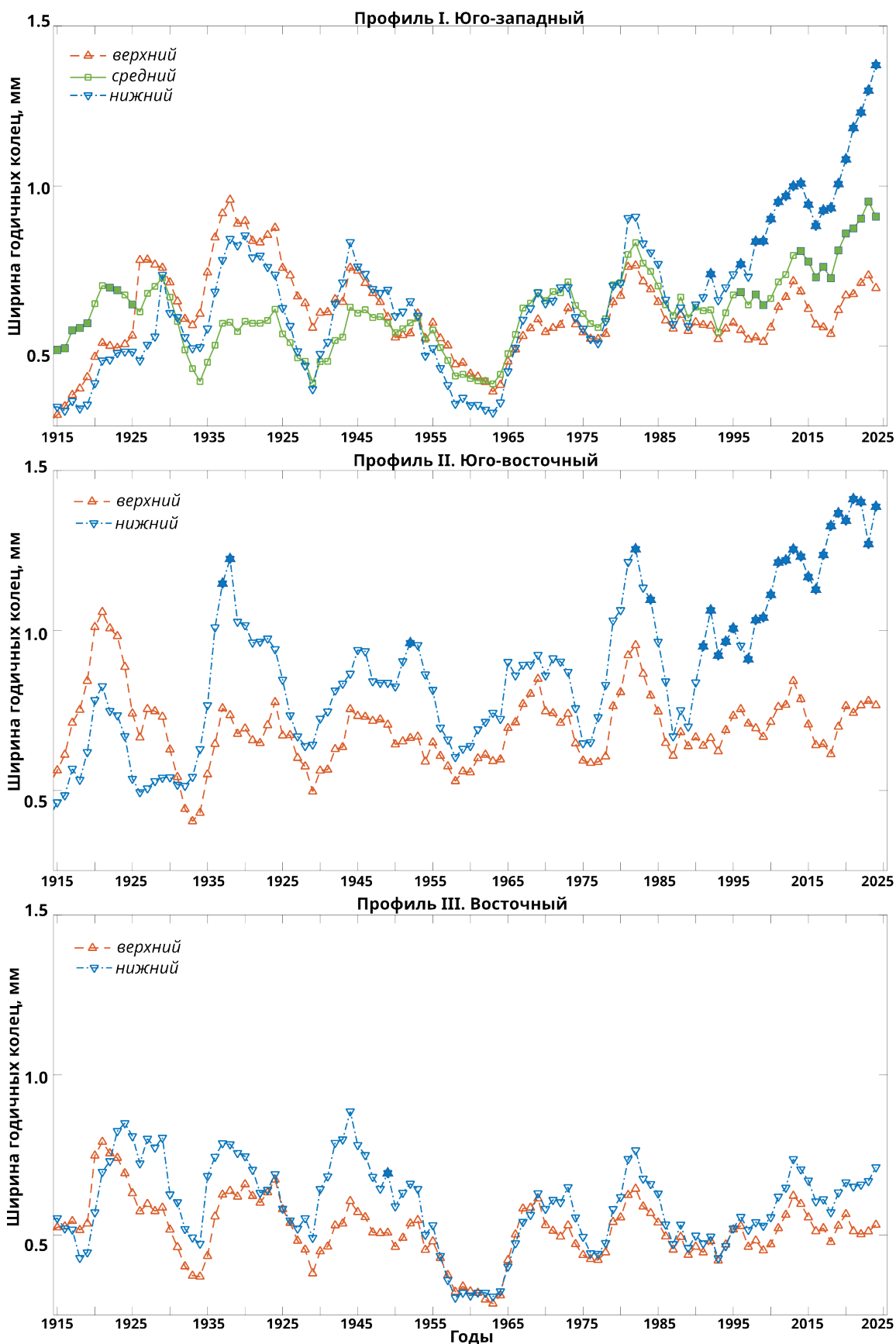


Рис. 7 / Fig. 7. Средний годичный прирост деревьев в XX–XXI вв. / Average annual growth of trees in the 20th–21st centuries

Источник: составлено авторами

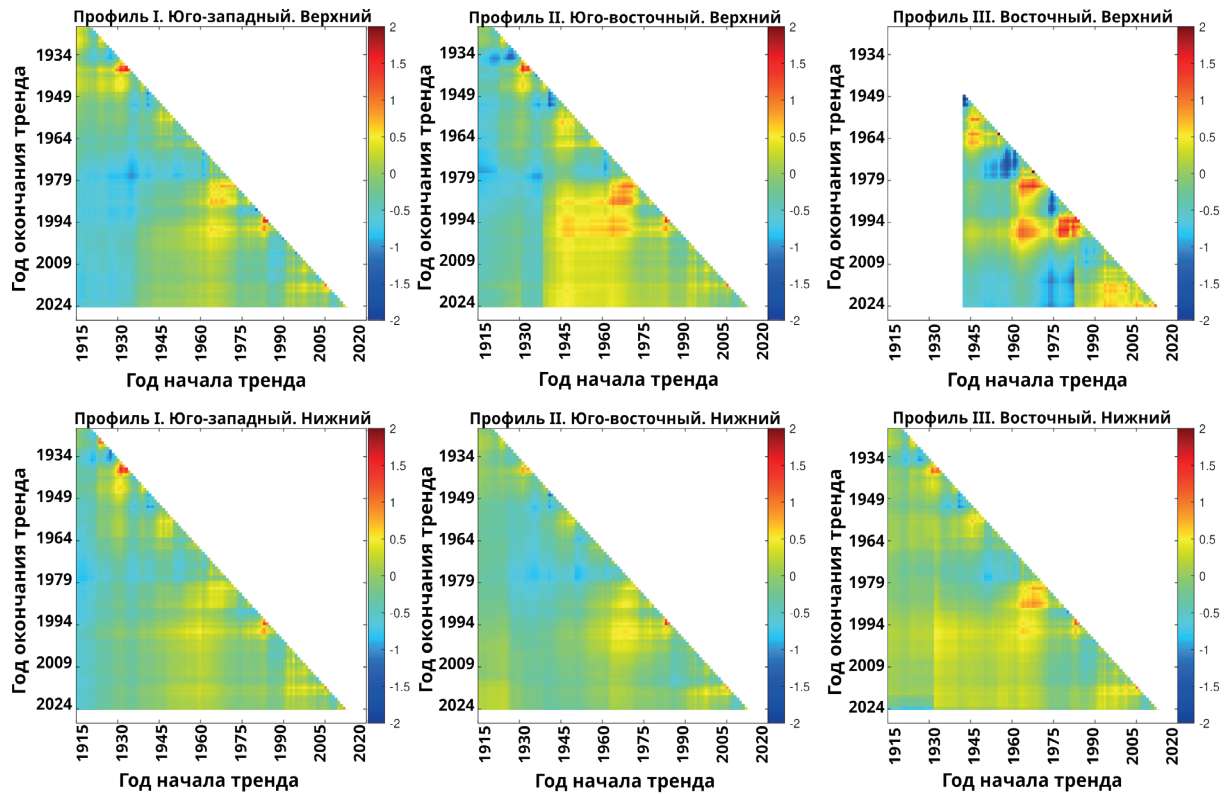


Рис. 8 / Fig. 8. Относительные тренды динамики годичного прироста (окраска соответствует относительным значениям тренда x , нормированного к среднеквадратическому отклонению аналогичных оценок для нулевой гипотезы, соответствующей отсутствию тренда) / Relative trends in the dynamics of annual growth (color indicates relative trends x normalized to its standard deviation in the absence of trends)

Источник: составлено авторами

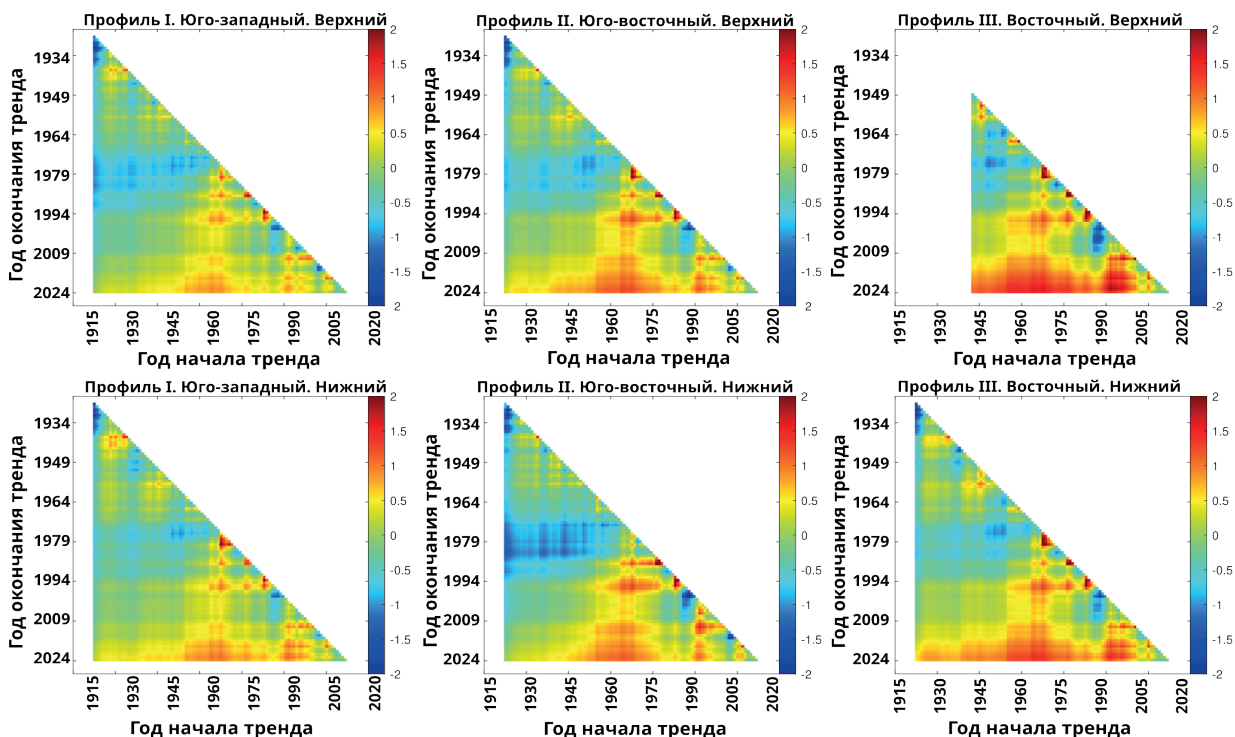


Рис. 9 / Fig. 9. Относительные тренды динамики годичного прироста x , обусловленные климатическими изменениями / Relative trends in the dynamics of annual growth of x , caused by climate change

Источник: составлено авторами

Vegetation Index) [36] — как индекс, связанный с удельной площадью листа и структурой покрова; *CVI (Chlorophyll Vegetation Index)* [52] — как показатель, чувствительный к содержанию хлорофилла.

На рисунке 10 приведено сопоставление стандартизированных среднесезонных значений индекса *NDVI* и стандартизированного годичного накопления надземной фитомассы, реконструированного по данным радиального прироста для каждого профиля. Для *NDVI* наблюдается согласие направленности многолетних трендов с динамикой накопления фитомассы. Анализ остальных индексов показал, что наиболее устойчивое совпадение трендов для всех профилей характерно для *NBR* и *NBR2*, а для *SLAVI*, *VARI* и *CVI* оно отмечено на большинстве профилей. Для *EVI* сходство выражено слабее. В целом это указывает на то, что увеличение древесной растительности в исследованном экотоне отражается в спутниковых данных достаточно устойчиво. В целом это означает, что увеличение древесной растительности

в исследованном экотоне устойчиво фиксируется по данным *Landsat*, причём наиболее отчётливо — индексами, чувствительными к фитомассе и влаге.

На рисунке 11 приведена матрица корреляций между характеристиками накопления надземной фитомассы по данным древесно-кольцевых хронологий и спутниковыми характеристиками поверхности. Для верхних профилей наиболее устойчивые положительные связи выявлены с каналом NIR и *NDVI*, *NBR*, *NBR2*, *NDMI*, *SLAVI* и *EVI*, тогда как с каналами видимого диапазона и, как правило, с каналом *SWIR2* связи отрицательные. Наиболее отчётливо эта закономерность выражена для верхнего восточного профиля, где получены максимальные коэффициенты корреляции с *NDVI*, *VARI*, *NBR2*, *SLAVI* и *EVI*. Это показывает, что в верхней части экотона межгодовая изменчивость накопления фитомассы статистически более согласована с изменениями спутниковых спектральных характеристик поверхности. Для нижних профилей корреляции

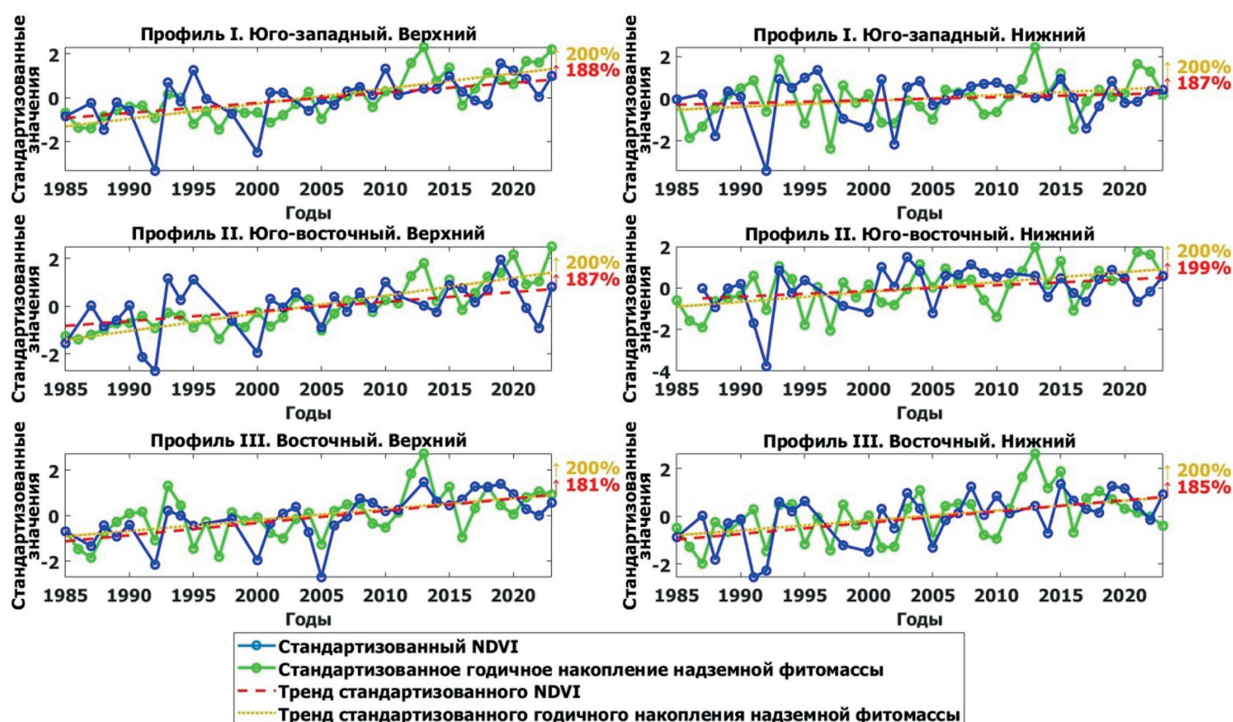


Рис. 10 / Fig. 10. Тренды нормализованных среднесезонных значений индекса *NDVI* и тренды годичного накопления фитомассы по данным древесно-кольцевых хронологий / Trends in normalized seasonal average values of the *NDVI* index and trends in annual accumulation of phytomass according to tree-ring chronologies

Источник: составлено по данным спутников *Landsat* 4...9, обработанным с использованием *Google Earth Engine*, и по данным древесно-кольцевых хронологий

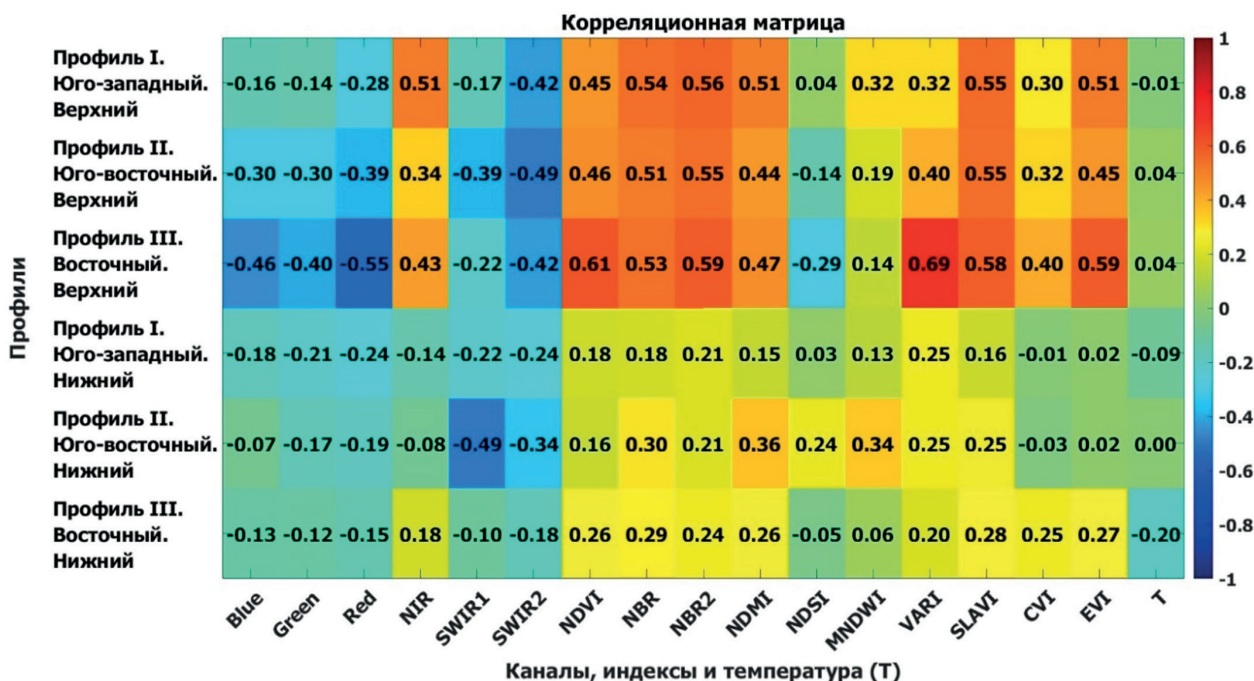


Рис. 11 / Fig. 11. Матрица корреляций между вегетативными индексами по данным ДЗЗ и динамикой годичного накопления фитомассы по данным древесно-кольцевых хронологий / Correlation matrix between vegetation indices based on remote sensing data and the dynamics of annual accumulation of phytomass based on tree-ring chronologies

Источник: составлено по данным спутников Landsat 4...9, обработанным с использованием Google Earth Engine, и по данным древесно-кольцевых хронологий

в целом слабее и менее однородны. Здесь выраженные связи наблюдаются лишь для отдельных участков и отдельных индексов. По-видимому, это связано с тем, что в верхней части экотона древесная растительность развита слабее, а потому изменения её состояния быстрее отражаются в спектральных характеристиках поверхности. На нижних профилях, где запасы фитомассы выше и растительный покров более сомкнутый, экосистема может характеризоваться большей инерционностью, вследствие чего связь между годичной динамикой радиального прироста и текущими спутниковыми характеристиками выражена слабее. Связь с температурой поверхности практически отсутствует, как и NDSI не показывает устойчивых отношений с накоплением фитомассы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты проведённого исследования демонстрируют убедительные доказатель-

ства того, что на западном макросклоне Приполярного Урала на фоне современных изменений климата происходила экспансия наиболее распространённого в районе исследований древесного вида *Larix sibirica* в сообщества горных тундр. Это подтверждается различиями в растительности на повторных ландшафтных фотоснимках, в распределении лесопокрытых площадей на разновременных аэроснимках и спутниковых изображениях, а также в возрастной структуре древостоев на исследованных высотных профилях.

Полученные данные количественного сдвига распространения верхней границы редколесий и повторные фотоснимки свидетельствуют, что в сравнении с другими горными провинциями Урала, где выполнялись подобные исследования, в районе Саблинского хребта изменения в распределении лесопокрытых площадей были менее значительными. Так, например, на Южном Урале на сравнительно небольшом массиве Иремель протяжённостью 6×6 км сдвиг верхней границы редколесий составил 6,97 км², скорость вертикального

сдвига сплошной границы редколесий – 5,5 м / 10 лет, Скорость положительного горизонтального сдвига сплошной границы – 21,6 м / 10 лет [9]. Подобные исследования были проведены на Северном Урале (Тылайско-Конжаковско-Серебрянский горный массив) [7]. Здесь величина вертикального и горизонтального смещения верхней границы редколесий во второй половине XX в. в целом по массиву составила 43 и 120 м соответственно, а скорость вертикального и горизонтального продвижения – примерно 9 и 24 м за десятилетие. Вертикальный сдвиг составил для редколесий 43 м, для сомкнутых лесов – 50 м, а горизонтальный для редколесий – 120 м, для сомкнутых лесов – 285 м.

На Полярном Урале (горный массив Рай-Из), по данным С. Г. Шиятова и др. [17], вертикальный сдвиг составил для редколесий 18 м, для сомкнутых лесов – 14 м, а горизонтальный для редколесий 175 м, для сомкнутых лесов – 180 м. За исследуемый период (1960–2000 гг.) ско-

рость вертикального сдвига границ составила примерно 5 и 3 м за десятилетие, а горизонтального – 44 и 45 м.

Ранее было установлено, что в центральной части Приполярного Урала в районе г. Неройка граница леса располагается в среднем на 50 м выше, а средний возраст древостоев лиственницы в нижней части экотона верхней границы леса не превышает 100 лет [6]. Периоды наиболее массового заселения участков склонов гор деревьями происходили здесь преимущественно в периоды с 1920 по 1965 г. и с 1965 по 2000 г. Таким образом, на хр. Сабля и г. Сундук темпы продвижения древесной растительности в сообщества горных тундр происходят заметно медленнее, в отличие как от других ранее исследованных горных провинций Урала, так и в сравнении с восточным макросклоном Приполярного Урала.

Помимо этого, исследованные древостои на горе Сундук характеризуются значительной старовозрастностью (рис. 12).



Рис. 12 / Fig. 12. Одна из пробных площадей на нижнем уровне профиля юго-западной экспозиции. Средний возраст древостоя 286 лет, максимальный – 348 лет / One of the sample plots at the lower level of the southwestern-facing transect. The average age of the stand is 286 years, with a maximum of 348 years

Источник: фото Ю. С. Трубникова

Древостои такого возраста, формирующие экотон верхней границы леса, ранее на Урале не обнаруживались как в ходе полевых исследований, так и по литературным данным. Деревья такого возраста в массовом количестве встречаются в более северных регионах с более континентальным климатом, например, на плато Путорана [45] и близлежащих территориях Анабарского плато [31], однако здесь произрастают другие виды представителей рода *Larix*. Несмотря на то, что средние уровни на профилях юго-восточной и восточной экспозиции отсутствуют, произрастающие здесь на нижних уровнях древостои представляют собой крайне разновозрастные группировки, близкие по значениям возраста к нижнему уровню профиля юго-западной экспозиции. Таким образом, деревья, произрастающие на склонах г. Сундук, появившись ещё до периода завершения Малого ледникового периода и долгое время массово не продвигались выше по склонам.

Ещё одним отличием района исследования является отсутствие кедров сибирского *Pinus sibirica* — ни у подножия вершин, ни на границе леса, как самих деревьев, так и подраста или всходов, которые на Приполярном Урале и Северном Урале активно разносит кедровка [6; 7].

Установленные различия в древостоях, произрастающих на западном и восточном макросклонах Урала, могут быть объяснены контрастностью отдельных элементов климата в районе исследования. Для оценки продолжительности залегания снежного покрова использовали данные спутников Landsat. NDSI [51] применялся как основной индикатор снежного покрова, тогда как ST использовался как дополнительный показатель для уточнения сроков его устойчивого залегания и таяния. Значения NDSI и ST усредняли по выделенным областям анализа, а полученные временные ряды аппроксимировали гармонической моделью. Период, в течение которого кривая NDSI превышала порог 0,4, а кривая ST оставалась ниже 0°C, рассматривали как период снежного покрова.

Результаты соответствующего анализа по многолетним данным показали, что устойчивый снежный покров на исследу-

емых территориях в экотоне верхней границы леса ложится примерно в одни и те же даты — 17–22 октября. Однако сходение снежного покрова имеет существенные различия. Так, средняя многолетняя дата схода снежного покрова на границе леса г. Сундук — 4 июня, а в районе г. Неройка — 20 мая. Таким образом, задержка схода снежного покрова на западном макросклоне Приполярного Урала на границе леса примерно на той же абсолютной высоте составляет около 2 недель.

Данные метаанализа [20] на основе анализа 166 публикаций, посвящённых динамике верхней границы леса в мире, показали, что наибольшие сдвиги ВГЛ в мире происходили там, где происходило увеличение количества зимних осадков. Результаты настоящего исследования демонстрируют, что в районе, где позднее сходит снежный покров, древесная растительность (вероятно, из-за его экстремально большого количества) продвигается более медленными темпами по сравнению с более восточными районами. В местах наибольшего скопления снежных масс таяние снега сильно задерживается, что приводит к сокращению вегетационного периода и большему увлажнению почвы. Соответственно, позднее наступают начальные фазы растений, с некоторым ускорением прохождения фаз в случае более позднего схода снега [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На западном макросклоне Приполярного Урала, на хребте Сабля и г. Сундук, установлены сдвиги верхнего предела произрастания древостоев лиственницы в сообществе горных тундр в последнем столетии. Установлено, что темпы накопления наземной фитомассы и роста деревьев в радиальном направлении приобретают ускоряющийся характер, особенно в XXI в. Продвижение верхней границы редколесий на западном макросклоне Приполярного Урала происходит более медленными темпами в сравнении как с восточным макросклоном, так и с другими горными провинциями Урала. Наиболее вероятным объяснением трансформа-

ции древесной растительности может быть общее изменение климатических условий в районе исследования.

Полученные данные о пространственном положении верхней границы распространения редколесий, ландшафтные фотоснимки, данные о структуре древостоев на постоянных пробных площадях могут быть использованы в будущем для мониторинга высокогорных экосистем Приполярного Урала при различных сценариях изменения климата, а также при создании моделей климатогенной трансформации высокогорных лесных экосистем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Высоцкая А. А., Медведков А. А. Информационные ресурсы для оценки экологического потенциала геосистем (на примере территории Енисейского Севера) // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2023. Т. 29. № 1. С. 20–33. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-20-33
2. 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. С. 17–29. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.2
3. Горчаковский П. Л. Растительность хребта Сабля на Приполярном Урале // Растительность Крайнего Севера СССР и её освоение. М: АН СССР, 1958. С. 95–127.
4. Горчаковский П. Л., Шиятов С. Г. Фитоиндикация условий среды и природных процессов в высокогорьях. М.: Наука, 1985. 208 с.
5. Гофман Э. Северный Урал и береговой хребет Пай-Хой. Т. 2. СПб.: Тип. Имп. Акад. наук, 1856. 52 с.
6. Григорьев А. А., Моисеев П. А., Нагимов З. Я. Динамика верхней границы древесной растительности в высокогорьях Приполярного Урала под влиянием современного изменения климата // Экология. 2013. № 4. С. 284–295.
7. Капралов Д. С., Шиятов С. Г., Моисеев П. А. и др. Изменения в составе, структуре и высотном положении мелколесий на верхнем пределе их произрастания в горах Северного Урала // Экология. 2006. № 6. С. 403–410.
8. Климатический атлас СССР. В 2 т. / под ред. Ф. Ф. Давитая. М.: ГУГМС СССР, 1960. 164 с.
9. Комплексная оценка климатогенной трансформации высокогорных лесных экосистем Южного Урала (на примере массива Ирмель) / А. А. Григорьев, Ю. В. Шалаумова, Е. В. Болотник, Д. С. Балакин, П. А. Моисеев // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. 2022. Т. 15. № 2. С. 148–166.
10. Матвеев А. К. Вершины Каменного Пояса: Названия гор Урала. Челябинск: Юж.-Урал. кн. изд-во, 1990. 288 с.
11. Изменение климата, 2021 год: Физическая научная основа / рук. научн. группы: С. Л. Коннорс [Электронный ресурс]. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Russian.pdf (дата обращения: 25.10.2025).
12. Методы дендрохронологии Ч. I: Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации / С. Г. Шиятов, Е. А. Ваганов, А. В. Кирдянов, В. Б. Круглов и др. Красноярск: КрасГУ, 2000. 80 с.
13. Непараметрические байесовские сети как инструмент комплексирования данных мультимасштабного анализа временных рядов и дистанционного зондирования / Н. С. Пыко, Д. В. Тишин, П. Ю. Искандиров, А. М. Гафуров и др. // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26. № 3. С. 32–47.
14. Моисеев П. А. Структура и динамика древесной растительности на верхнем пределе её произрастания на Урале: автореф. дис. док. биол. наук. Екатеринбург, 2011. 43 с.
15. Обручев В. А. Открытие ледников на Северном Урале // Природа. 1930. № 1. С. 84–89.
16. Шиятов С. Г. Дендрохронологические исследования // Уральская экологическая школа: вехи становления и развития / отв. ред. Н. Г. Смирнов. Екатеринбург: Голицкий, 2005. С. 134–174.
17. Шиятов С. Г., Терентьев М. М., Фомин В. В. и др. Вертикальный и горизонтальный сдвиги верхней границы редколесий и сомкнутых лесов в XX столетии на Полярном Урале // Экология. 2007. № 4. С. 243–248.
18. Шиятов С. Г. Динамика древесной и кустарниковой растительности в горах Полярного Урала под влиянием современных изменений климата. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 216 с.
19. Шиятов С. Г., Моисеев П. А., Григорьев А. А. Фотомониторинг древесной и кустарниковой растительности в высокогорьях Южного Урала за последние 100 лет. Екатеринбург: УМЦ УПИ, 2020. 191 с.

20. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming / M. A. Harsch, P. E. Hulme, M. S. McGlone et al. // *Ecology Letters*. 2009. Vol. 12. P. 1040–1049. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2009.01355.x
21. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures / A. Kashif, M. Z. Qasim, H. Song, et al. // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. P. 42539–42559. DOI: 10.1007/s11356-022-19718-6
22. A review of factors controlling Southern Hemisphere treelines and the implications of climate change on future treeline dynamics / A. Hansson, J. Shulmeister, P. Dargusch, G. Hill // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2023. Vol. 332. P. 1–19. DOI: 10.1016/j.agrformet.2023.109375
23. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery / G. L. Feyisa, H. Meilby, R. Fensholt, et al. // *Remote Sensing of Environment*. 2014. Vol. 140. P. 23–35. DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.029
24. BANSHEE—A MATLAB toolbox for non-parametric Bayesian networks / D. Paprotny, O. Morales-Nápoles, D. T. Worm, E. Ragno // *SoftwareX*. 2020. Vol. 12. DOI: 10.1016/j.softx.2020.100588
25. Bogachev M. I., Yuan N., Bunde A. Fractals and multifractals in geophysical time series // *Fractals* / eds. B. Ghanbarian, A. G. Hunt. Florida: CRC Press, 2017. P. 231–271. DOI: 10.1201/9781315152264-9
26. Cannone N., Malfasi F. Climate change triggered synchronous woody plants recruitment in the treeline ecotone of the Northern Hemisphere // *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 921. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170953
27. Climate change evidence in tree growth and stand productivity at the upper treeline ecotone in the Polar Ural Mountains / N. M. Devi, V. V. Kukarskih, A. A. Galimova, et al. // *Forest Ecosystems*. 2020. Vol. 7. P. 1–16. DOI: 10.1186/s40663-020-0216-9
28. Climate change impacts on cultural heritage: A literature review / E. Sesana, A. S. Gagnon, C. Ciantelli, et al. // *Advanced review. WIREs Clim Change*. 2021. Vol. 12. DOI: 10.1002/wcc.710
29. Detection and evaluation of anthropogenic impacts on natural forest ecosystems from long-term tree-ring observations / M. I. Bogachev, A. A. Grigoriev, N. S. Pyko, et al. // *Forest Ecology and Management*. 2024. Vol. 558. DOI: 10.1016/j.foreco.2024.121784
30. Evidence for 40 Years of Treeline Shift in a Central Alpine Valley / E. R. Frei, I. Barbeito, L. M. Erdle, et al. // *Forests*. 2023. Vol. 14. P. 412. DOI: 10.3390/f14020412
31. Forest-tundra ecotone response to climate change / V. I. Kharuk, S. G. Shiyatov, E. Kasischke, E. V. Fedotova, M. M. Naurzbaev // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 2002. Т. 18. С. 234–260.
32. Gitelson A. A., Kaufman Y. J., Stark R., et al. Novel Algorithms for Remote Estimation of Vegetation Fraction // *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 80. № 1. P. 76–87. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00289-9
33. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone / N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, et al. // *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031
34. Keyserling A., Krusenstern P. Wissenschaftliche Beobachtungen auf einer Reise in das Petschora-Land im Jahre 1843. St.-Pb., Gedr. u. zu haben bei C. Kray. 1846. 465 p.
35. Latitudinal decline in stand biomass and productivity at the elevational treeline in the Ural mountains despite a common thermal growth limit / H. Frank, M. A. Dawes, M. O. Bubnov, et al. // *Journal of Biogeography*. 2020. Vol. 47. P. 1827–1842. DOI: 10.1111/jbi.13867
36. Lymburner L., Beggs P. J., Jacobson C. R. Estimation of canopy-average surface-specific leaf area using Landsat TM data // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2000. Vol. 66. № 2. P. 183–191.
37. MODIS snow-cover products / D. K. Hall, G. A. Riggs, V. V. Salomonson, et al. // *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 83. P. 181–194.
38. No treeline shift despite climate change over the last 70 years / M. Beloiu, D. Poursanidis, A. Tsakirakis, et al. // *Forest Ecosystems*. 2022. Vol. 9. P. 100002. DOI: 10.1016/j.fecs.2022.100002
39. Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon / T. A. Schroeder, W. B. Cohen, C. Song, M. J. Canty, Z. Yang // *Remote sensing of environment*. 2006. Vol. 103. P. 16–26. DOI: 10.1016/j.rse.2006.03.008
40. Radiometric normalization of temporal images combining automatic detection of pseudo-invariant features from the distance and similarity spectral measures, density scatterplot analysis, and robust regression / O. A. de Carvalho Júnior, R. F. Guimarães, N. S. Silva,

- A. R. Gillespie, et al. // *Remote Sensing*. 2013. Vol. 5. P. 2763–2794. DOI: 10.3390/rs5062763
41. Reversal in the drought stress response of the Scots pine forest ecosystem: Local soil water regime as a key to improving climate change resilience / M. I. Bogachev, A. M. Gafurov, P. Y. Iskandirov, D. I. Kaplun, et al. // *Heliyon*. 2023. Vol. 9. № 11. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e21574
 42. Setting the tree-ring record straight / J. Ludescher, A. Bunde, U. Büntgen, H. J. Schellnhuber // *Climate Dynamics*. 2020. Vol. 55. P. 3017–3024. DOI: 10.1007/s00382-020-05433-w
 43. Shiyatov S. G., Mazepa V. S. Climate-driven dynamics of the forest-tundra vegetation in the Polar Ural Mountains // *Contemporary Problems of Ecology*. 2011. Vol. 4. № 7. P. 758–768. DOI: 10.1134/S1995425511070071
 44. Shrub facilitation promotes advancing of the *Fagus sylvatica* treeline across the Apennines (Italy) / G. Bonanomi, V. Mogavero, A. Rita, M. Zotti, et al. // *Alleato Journal of Vegetation Science*. 2021. Vol. 32. № 4. DOI: 10.1111/jvs.13054
 45. Stand Biomass at Treeline Ecotone in Russian Subarctic Mountains Is Primarily Related to Species Composition but Its Dynamics Driven by Improvement of Climatic Conditions / P. A. Moiseev, F. Hagedorn, D. S. Balakin, M. O. Bubnov, et al. // *Forests*. 2022. Vol. 13. P. 254. DOI: 10.3390/f13020254
 46. The influence of decision-making in tree ring-based climate reconstructions / U. Büntgen, K. Allen, K. J. Anchukaitis, D. Arseneault, et al. // *Nature communications*. 2021. Vol. 12. DOI: 10.1038/s41467-021-23627-6
 47. The 50-Year Landsat Collection 2 Archive / C. J. Crawford, D. P. Roy, S. Arab, C. Barnes, et al. // *Science of Remote Sensing*. 2023. Vol. 8. DOI: 10.1016/j.srs.2023.100103
 48. The impact of Grey Heron (*Ardea cinerea* L.) colony on soil biogeochemistry and vegetation: a natural long-term in situ experiment in a planted pine forest / M. I. Bogachev, D. V. Tishin, A. M. Gafurov, B. I. Gareev, et al. // *Frontiers in Environmental Science*. 2023. Vol. 11. DOI: 10.3389/fenvs.2023.1197657
 49. Treeline advances along the Urals mountain range – driven by improved winter conditions? / F. Hagedorn, S. G. Shiyatov, V. S. Mazepa, N. M. Devi, et al. // *Global Change Biology*. 2014. Vol. 20. № 11. P. 3530–3543.
 50. Using Landsat Spectral Indices in Time-Series to Assess Wildfire Disturbance and Recovery / S. Hislop, S. Jones, M. Soto-Berelov, A. Skidmore, et al. // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10. № 3. DOI: 10.3390/rs10030460
 51. VIIRS Snow Cover Algorithm Theoretical Basis Document / G. A. Riggs, D. K. Hall, M. O. Román. NASA Goddard Space Flight Center Greenbelt: Maryland. 2015. 34 p.
 52. Vincini M., Frazzi E., D'Alessio P. A broadband leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale // *Precision Agriculture*. 2008. Vol. 9. № 5. P. 303–319. DOI: 10.1007/s11119-008-9075-z
 53. Xu H. Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery // *International Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 27. № 14. P. 3025–3033. DOI: 10.1080/01431160600589179
 54. Zhou M, Li D, Liao K, Lu D. Integration of Landsat time-series vegetation indices improves consistency of change detection // *International Journal of Digital Earth*. 2023. Vol. 16. № 1. P. 1276–1299. DOI: 10.1080/17538947.2023.2200040

REFERENCES

1. Vysotskaya A. A., Medvedkov A. A. [Information resource for assessing the ecological potential of a geosystem (in the Yenisei North)]. In: *InterKarto. InterGIS* [InterCarto. InterGIS], 2023, vol. 29, no. 1, pp. 20–33. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-20-33
2. Vysotskaya A. A., Medvedkov A. A. [Climatogenic changes in kurum landscapes in the west of the Central Siberian Plateau under zonal conditions of the middle taiga]. 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
3. Gorchakovskiy P. L. [Vegetation of the Sabre Ridge in the Subpolar Urals]. In: *Rastitelnost Kraynego Severa SSSR i yeye osvoyoyniye* [Vegetation of the USSR Far North and its Development]. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1958, pp. 95–127.
4. Gorchakovskiy P. L., Shiyatov S. G. *Fitoindikatsiya sostoyaniya okruzhayushchey sredy i razvitiye protsessov v usloviyakh krizisa* [Phytoindication of Environmental Conditions and Process Development under Crisis Conditions]. Moscow: Nauka Publ., 1985. 208 p.
5. Goffman E. *Severnnyy Ural i Pay-Khoyskaya pribrezhnaya set'. T. 2* [Northern Urals and the Pai-Khoi Coastal Network. Vol. 2]. St. Petersburg: Type. Imp. Acad. of Sciences, 1856. 52 p.
6. Grigoriev A. A., Moiseev P. A., Nagimov Z. Ya. [Dynamics of the upper boundary

- of tree vegetation in highlands of the Subpolar Urals under the influence of modern climate change]. In: *Ekologiya* [Ecology], 2013, no. 4, pp. 284–295.
7. Kapralov D. S., Shiyatov S. G., Moiseev P. A., et al. [Changes in the composition, relief, and altitudinal position of small forests at the top of their growth in the mountains of the Northern Urals]. In: *Ekologiya* [Ecology], 2006, no. 6, pp. 403–410.
 8. Davitaya F. F., ed. *Klimaticheskiy atlas SSSR* [Climatic atlas of the USSR]. Moscow: GUGMS USSR, 1960. 164 p.
 9. Grigoriev A. A., Shalaumova Yu. V., Bolotnik E. V., Balakin D. S., Moiseev P. A. Comprehensive assessment of climatogenic transformation of high forest ecosystems of the Southern Urals (using the Iremel massif as an example). In: *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Biologiya* [Journal of the Siberian Federal University. Biology], 2022, vol. 15, no. 2, pp. 148–166.
 10. Matveev A. K. *Vershiny Kamennogo poyasa: Nazvaniya Uralskikh gor* [Peaks of the Stone Belt: Names of the Ural Mountains]. Chelyabinsk: South-Ural Book Publishing House, 1990. 288 p.
 11. Connors S. L., ed. *Izmeneniye klimata, 2021: Fizicheskiye nauchnyye osnovy* [Climate Change, 2021: Physical Scientific Basis]. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_russian.pdf (date accessed: 25.10.2025).
 12. Shiyatov S. G., Vaganov E. A., Kirdyanov A. V., Kruglov V. B., et al. *Metody dendrokronologii. I: Osnovy dendrokronologii. Sbor i polucheniye informatsii o godichnykh kolt-sakh derevyev* [Methods of dendrochronology. Ch. I: Fundamentals of dendrochronology. Collection and obtaining tree-ring information]. Krasnoyarsk: KrasSU, 2000. 80 p.
 13. Pyko N. S., Tishin D. V., Iskandirov P. Yu., Gafurov A. M., et al. [Nonparametric Bayesian networks as a tool for integrating multiscale time series analysis and remote sensing data]. In: *Neparametricheskiye bayyesovskiyete seti kak instrument integratsii mnogomasshtabnogo analiza vremennykh ryadov i dannykh distantsionnogo zondirovaniya* [Bulletin of higher educational institutions of Russia. Radioelectronics], 2023, vol. 26, no. 3, pp. 32–47.
 14. Moiseev P. A. *Struktura i dinamika drevesnoy rastitel'nosti na verkhnem predele yeye rosta na Urale: avtoref. dok. biol. nauk.* [Structure and Dynamics of Woody Vegetation at the Upper Limit of Its Growth in the Urals: abstract of Dr. Sci. thesis in Political sciences]. Ekaterinburg, 2011. 43 p.
 15. Obruchev V. A. [Discovery of Glaciers in the Northern Urals]. In: *Priroda* [Nature], 1930, no. 1, pp. 84–89.
 16. Shiyatov S. G. [Dendrochronological Studies]. In: Smirnov N. G., ed. *Uralskaya ekologicheskaya shkola: vekhi formirovaniya i razvitiya* [Ural Ecological School: Milestones in Formation and Development]. Ekaterinburg: Goshchitsky, 2005, pp. 134–174.
 17. Shiyatov S. G., Terentyev M. M., Fomin V. V., et al. [Vertical and horizontal shifts of the upper boundary of sparse and closed forests in the 20th century in the Polar Urals]. In: *Ekologiya* [Ecology], 2007, no. 4, pp. 243–248.
 18. Shiyatov S. G. *Dinamika drevesno-kustarnikovyoy rastitel'nosti Polyarnogo Urala pod vliyaniyem sovremennykh klimaticheskikh izmeneniy* [Dynamics of tree and shrub vegetation in the Polar Ural Mountains under the influence of modern climate change]. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2009. 216 p.
 19. Shiyatov S. G., Moiseyev P. A., Grigoriev A. A. *Fotomonitoring drevesno-kustarnikovyoy rastitel'nosti na vysokogoryakh Yuzhnogo Urala za posledniye 100 let* [Photomonitoring of tree and shrub vegetation in the highlands of the Southern Urals over the past 100 years]. Yekaterinburg: UMC UPI, 2020. 191 p.
 20. Harsch M. A., Hulme P. E., McGlone M. S. et al. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. In: *Ecology Letters*, 2009, vol. 12, pp. 1040–1049. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2009.01355.x
 21. Kashif A., Qasim M. Z., Song H., et al. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. In: *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, vol. 29, pp. 42539–42559. DOI: 10.1007/s11356-022-19718-6
 22. Hansson A., Shulmeister J., Dargusch P., Hill G. A review of factors controlling Southern Hemisphere treelines and the implications of climate change on future treeline dynamics. In: *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, vol. 332, pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.agrformet.2023.109375
 23. Feyisa G. L., Meilby H., Fensholt R., et al. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. In: *Remote Sensing of Environment*, 2014, vol. 140, pp. 23–35. DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.029
 24. Paprotny D., Morales-Nápoles O., Worm D. T., E. Ragno BANSHEE—A MATLAB toolbox for non-parametric Bayesian networks. In: *SoftwareX*, 2020, vol. 12. DOI: 10.1016/j.softx.2020.100588

25. Bogachev M. I., Yuan N., Bunde A. Fractals and multifractals in geophysical time series. In: Ghanbarian B., Hunt A. G., eds. *Fractals*. Florida: CRC Press, 2017, pp. 231–271. DOI: 10.1201/9781315152264-9
26. Cannone N., Malfasi F. Climate change triggered synchronous woody plants recruitment in the treeline ecotone of the Northern Hemisphere. In: *Science of The Total Environment*, 2024, vol. 921. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170953
27. Devi N. M., Kukarskih V. V., Galimova A. A., et al. Climate change evidence in tree growth and stand productivity at the upper treeline ecotone in the Polar Ural Mountains. In: *Forest Ecosystems*, 2020, vol. 7, pp. 1–16. DOI: 10.1186/s40663-020-0216-9
28. Sesana E., Gagnon A. S., Ciantelli C., et al. Climate change impacts on cultural heritage: A literature review. In: *Advanced review. WIREs Clim Change*, 2021, vol. 12. DOI: 10.1002/wcc.710
29. Bogachev M. I., Grigoriev A. A., Pyko N. S., et al. Detection and evaluation of anthropogenic impacts on natural forest ecosystems from long-term tree-ring observations. In: *Forest Ecology and Management*, 2024, vol. 558. DOI: 10.1016/j.foreco.2024.121784
30. Frei E. R., Barbeito I., Erdle L. M., et al. Evidence for 40 Years of Treeline Shift in a Central Alpine Valley. In: *Forests*, 2023, vol. 14, pp. 412. DOI: 10.3390/f14020412
31. V. I. Kharuk, S. G. Shiyatov, E. Kasischke, E. V. Fedotova, M. M. Naurzbaev. Forest-tundra ecotone response to climate change. In: *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem* [Environmental Monitoring and Ecosystem Modeling Challenges], 2002, vol. 18, pp. 234–260.
32. Gitelson A. A., Kaufman Y. J., Stark R., et al. Novel Algorithms for Remote Estimation of Vegetation Fraction. In: *Remote Sensing of Environment*, 2002, vol. 80, no. 1, pp. 76–87. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00289-9
33. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. In: *Remote Sensing of Environment*, 2017, vol. 202, pp. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031
34. Keyserling A., Krusenstern P. *Wissenschaftliche Beobachtungen auf einer Reise in das Petschora-Land im Jahre 1843*. St.-Pb., Gedr. u. zu haben bei C. Kray. 1846. 465 p.
35. Frank H., Dawes M. A., Bubnov M. O., 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. 47, pp. 1827–1842. DOI: 10.1111/jbi.13867
36. Lymburner L., Beggs P. J., Jacobson C. R. Estimation of canopy-average surface-specific leaf area using Landsat TM data. In: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2000, vol. 66, no. 2, pp. 183–191.
37. Hall D. K., Riggs G. A., Salomonson V. V., et al. MODIS snow-cover products. In: *Remote Sensing of Environment*, 2002, vol. 83, pp. 181–194.
38. Beloiu M., Poursanidis D., Tsakirakis A., et al. No treeline shift despite climate change over the last 70 years. In: *Forest Ecosystems*, 2022, vol. 9, pp. 100002. DOI: 10.1016/j.fecs.2022.100002
39. Schroeder T. A., Cohen W. B., Song C., Canty M. J., Yang Z. Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon. In: *Remote sensing of environment*, 2006, vol. 103, pp. 16–26. DOI: 10.1016/j.rse.2006.03.008
40. Carvalho Júnior de O. A., Guimarães R. F., Silva N. S., Gillespie A. R., et al. Radiometric normalization of temporal images combining automatic detection of pseudo-invariant features from the distance and similarity spectral measures, density scatterplot analysis, and robust regression. In: *Remote Sensing*, 2013, vol. 5, pp. 2763–2794. DOI: 10.3390/rs5062763
41. Bogachev M. I., Gafurov A. M., Iskandirov P. Y., Kaplun D. I., et al. Reversal in the drought stress response of the Scots pine forest ecosystem: Local soil water regime as a key to improving climate change resilience. In: *Helicon*, 2023, vol. 9, no. 11. DOI: 10.1016/j.helicon.2023.e21574
42. Ludescher J., Bunde A., Büntgen U., Schellhuber H. J. Setting the tree-ring record straight. In: *Climate Dynamics*, 2020, vol. 55, pp. 3017–3024. DOI: 10.1007/s00382-020-05433-w
43. Shiyatov S. G., Mazepa V. S. Climate-driven dynamics of the forest-tundra vegetation in the Polar Ural Mountains. In: *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, vol. 4, no. 7, pp. 758–768. DOI: 10.1134/S1995425511070071
44. Bonanomi G., Mogavero V., Rita A., Zotti M., et al. Shrub facilitation promotes advancing of the *Fagus sylvatica* treeline across the Apennines (Italy). In: *Allevato Journal of Vegetation Science*, 2021, vol. 32, no. 4. DOI: 10.1111/jvs.13054
45. Moiseev P. A., Hagedorn F., Balakin D. S., Bubnov M. O., et al. Stand Biomass at Tree-line Ecotone in Russian Subarctic Mountains Is Primarily Related to Species Composition but Its Dynamics Driven by Improvement of

- Climatic Conditions. In: *Forests*, 2022, vol. 13, pp. 254. DOI: 10.3390/f13020254
46. Büntgen U., Allen K., Anchukaitis K. J., Arseneault D., et al. The influence of decision-making in tree ring-based climate reconstructions. In: *Nature communications*, 2021, vol. 12. DOI: 10.1038/s41467-021-23627-6
47. Crawford C. J., Roy D. P., Arab S., Barnes C., et al. The 50-Year Landsat Collection 2 Archive. In: *Science of Remote Sensing*, 2023, vol. 8 DOI: 10.1016/j.srs.2023.100103
48. Bogachev M. I., Tishin D. V., Gafurov A. M., Gareev B. I., et al. The impact of Grey Heron (*Ardea cinerea* L.) colony on soil biogeochemistry and vegetation: a natural long-term in situ experiment in a planted pine forest. In: *Frontiers in Environmental Science*, 2023, vol. 11. DOI:10.3389/fenvs.2023.1197657
49. Hagedorn F., Shiyatov S. G., Mazepa V. S., Devi N. M., et al. Treeline advances along the Urals mountain range – driven by improved winter conditions? In: *Global Change Biology*, 2014, vol. 20, no. 11, pp. 3530–3543.
50. Hislop S., Jones S., Soto-Berelov M., Skidmore A., et al. Using Landsat Spectral Indices in Time-Series to Assess Wildfire Disturbance and Recovery. In: *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, no 3. DOI: 10.3390/rs10030460
51. Riggs G. A., Hall D. K., Román M. O. *VIIRS Snow Cover Algorithm Theoretical Basis Document*. NASA Goddard Space Flight Center Greenbelt: Maryland. 2015. 34 p.
52. Vincini M., Frazzi E., D'Alessio P. A broadband leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale. In: *Precision Agriculture*, 2008, vol. 9, no. 5, pp. 303–319. DOI: 10.1007/s11119-008-9075-z
53. Xu H. Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. In: *International Journal of Remote Sensing*, 2006, vol. 27, no. 14, pp. 3025–3033. DOI: 10.1080/01431160600589179
54. Zhou M, Li D, Liao K, Lu D. Integration of Landsat time-series vegetation indices improves consistency of change detection. In: *International Journal of Digital Earth*, 2023, vol. 16, no 1, pp. 1276–1299. DOI: 10.1080/17538947.2023.2200040

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

Вьюхин Сергей Олегович (г. Вуктыл) – 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

Шубницина Елена Игоревна (г. Екатеринбург) – кандидат технических наук, заместитель директора Национальный парк «Югыд ва»; e-mail: shub07@yandex.ru; ORCID: 0000-0001-6198-7281

Шалаумова Юлия Валерьевна (г. Екатеринбург) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоинформационных технологий Института экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук; e-mail: jvshalaumova@gmail.com; ORCID: 0000-0002-0173-6293

Басманов Александр Андреевич (г. Санкт-Петербург) – инженер кафедры радиотехнических систем факультета радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ»; e-mail: alex.basmanov00@gmail.com; ORCID: 0009-0009-8063-7987

Богачёв Михаил Игоревич (г. Санкт-Петербург) – доктор технических наук, главный научный сотрудник кафедры радиотехнических систем факультета радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ»; e-mail: mibogachev@etu.ru; ORCID: 0000-0002-0356-5651

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey A. Grigoriev (Yekaterinburg) – PhD (Agricultura), Senior Researcher, Laboratory of Geographic Information 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

Elena I. Shubnitsina (Yekaterinburg) – PhD (Technical Sciences), Deputy Director, "Yugyd va" National Park;

e-mail: shub07@yandex.ru; ORCID: 0000-0001-6198-7281

Sergey O. Vyukhin (Vuktyl) – Junior Researcher, Laboratory of Geographic Information 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

Yulia V. Shalaumova (Yekaterinburg) – PhD (Technical Sciences), Senior Researcher, Laboratory of Geographic Information Technologies, Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences;

e-mail: jvshalaumova@gmail.com; ORCID: 0000-0002-0173-6293

Alexander A. Basmanov (St. Petersburg) – Engineer, Department of Radio Engineering Systems, Faculty of Radio Engineering and Telecommunications, St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI";

e-mail: alex.basmanov00@gmail.com; ORCID: 0009-0009-8063-7987

Mikhail I. Bogachev (St. Petersburg) – Dr. Sci. (Technical Sciences), Chief Researcher, Department of Radio Engineering Systems, Faculty of Radio Engineering and Telecommunications, St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI";

e-mail: mibogachev@etu.ru; ORCID: 0000-0002-0356-5651