



DOI: 10.21178/2079–6080.2025.3.17
УДК 630*2 : 674.032.14 : 630*113

Влияние морфометрических показателей рельефа на размещение лиственничных формаций на западном склоне Беломорско-Кулойского плато

© А.П. Богданов¹, Е.Н. Наквасина², Н.А. Неверов³

Influence of morphometric terrain parameters on the distribution of larch stands on the western slope of the White Sea-Kuloi plateau

A.P. Bogdanov, E.N. Nakvasina, N.A. Neverov (Northern Research Institute of Forestry; Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU); N.P. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences)

This study examines the distribution of stands containing Russian larch (*Larix sukaczewii* Dyl.) in relation to terrain parameters (elevation, slope steepness, aspect, and topographic wetness index, TWI) in the northern Russian Plain, specifically on the western slope of the White Sea-Kuloi plateau (Arkhangelsk region). The analysis included 3655 forest compartments (based on forest inventory data from the Arkhangelsk forestry) covering 113.9 thousand hectares with larch presence. Geospatial analysis was conducted using open-source SAGA-GIS software and the Terrain Analysis module in the UTM coordinate system. Morphometric parameters for each compartment were assessed: elevation above sea level, slope steepness, aspect, and TWI – a proxy for potential moisture accumulation calculated using a standard equation.

Results indicate that larch stands predominantly occur at elevations of 80–160 m (92,4 %), primarily on south-facing slopes (69,6 %), followed by southwest (17,3 %) and southeast (11,5 %) aspects, with gentle to moderate slopes (5–15°, 98,2 %). Russian larch exhibits broad polymorphism in response to hydrothermic conditions, with a clear affinity for moderately dry, well-drained habitats (TWI = 6–8). The successful distribution of larch in the northern taiga subzone (Arkhangelsk region) is driven by the combined effects of elevation-dependent landscape differentiation. Optimal distribution arises from the interplay of microclimatic (slope aspect, elevation) and hydrological (slope steepness, moisture regime) factors. The exclusion of any key factor reduces the species' establishment success.

These findings support practical recommendations for identifying suitable reforestation sites, optimizing forest management, and conserving biodiversity in larch-dominated ecosystems.

Keywords: Russian larch, White Sea-Kuloi plateau, altitudinal differentiation, elevation, slope, steepness, aspect, topographic wetness index

Влияние морфометрических показателей рельефа на размещение лиственничных формаций на западном склоне Беломорско-Кулойского плато

А.П. Богданов, Е.Н. Наквасина, Н.А. Неверов

В статье приведены результаты исследований по распространению насаждений с участием лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.) в связи с рельефом (высота над уровнем моря, крутизна и экспозиция склона, топографический индекс влажности) на севере Русской равнины в пределах западного склона Беломорско-Кулойского плато (Архангельская область). Проанализировано 3655 выделов (материалы лесоустройства Архангельского лесничества) общей площадью 113,9 тыс. га с наличием в древостое лиственницы. Охарактеризованы при геоинформационном анализе с использованием открытого программного обеспечения SAGAGIS и модуля Terrain Analysis в прямоугольной системе координат UTM. Для каждого выдела представлены морфометрические показатели: абсолютные высотные отметки над уровнем моря (НУМ); крутизна склонов; экспозиция, а также топографический индекс влажности (TWI) – косвенный показатель для оценки потенциального накопления влаги, рассчитанный с помощью уравнения. Установлено, что лиственничные насаждения, как правило, расположены в диапазоне высот 80–160 м н. у. м. (92,4 %), преимущественно на южных (69,6 %), юго-западных и юго-восточных (17,3 % и 11,5 %, соответственно) склонах, на покатых и слабопокатых склонах в диапазоне от 5° до 15° (98,2 %). Выявлен широкий полиморфизм лиственницы Сукачева к условиям гидротермического режима (с четкой приуроченностью к умеренно-сухим, дренированным местообитаниям – $TWI = 6-8$). Показано, что успешность произрастания лиственницы Сукачева в условиях подзоны северной тайги (Архангельская область) обеспечивается комплексностью действия факторов, связанных с высотной дифференциацией ландшафтов. Оптимум распространения создается при наличии суммы оптимальных микроклиматических (экспозиция склона, высота НУМ) и гидрологических (крутизна склона и гидрологический режим) показателей. Их исключение из этого сочетания снижает успешность распространения породы.

Полученные результаты позволяют разработать конкретные рекомендации по выделению перспективных участков для лесовосстановления, оптимизации лесопользования, сохранения биоразнообразия лиственничных экосистем.

Ключевые слова: лиственница Сукачева, Беломорско-Кулойское плато, высотная дифференциация, высота над уровнем моря, склон, крутизна, экспозиция, топографический индекс влажности

Богданов Александр Петрович – старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела, кандидат с.-х. наук

E-mail: aleksandr_bogd@mail.ru

Наквасина Елена Николаевна – профессор кафедры лесоводства и лесоустройства, доктор с.-х. наук, профессор

Неверов Николай Александрович – старший научный сотрудник, кандидат с.-х. наук

¹ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства»

163062, Россия, г. Архангельск, ул. Никитова, д. 13

Телефон: 8(8182)61–79–55

²ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ)

163002, Россия, г. Архангельск, Набережная Северной Двины, д. 17

Телефон: 8(8182) 21–61–73

³ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лавёрова Уральского отделения Российской академии наук» (ФИЦКИА УрО РАН)

Россия, 163020, г. Архангельск, Никольский проспект, д. 20

Телефон: 8(8182) 28–76–36

Введение

Повышение продуктивности лесов является ключевой задачей современного лесного хозяйства, направленной на обеспечение устойчивого лесопользования и удовлетворение растущего спроса на древесное сырье. Одним из перспективных направлений интенсификации лесного хозяйства является внедрение быстрорастущих хозяйственно-ценных пород, среди которых особое место занимает лиственница (*Larix sp. Mill.*). Данная порода характеризуется быстрым ростом, кроме этого, отличается высоким качеством древесины и устойчивостью к гниению. На севере Русской равнины лиственница распространена достаточно широко, хотя условия произрастания для нее здесь не являются оптимальными [15]. В настоящее время она является регрессирующим видом, а на территории Архангельской области под воздействием антропогенного влияния и естественных причин становится реликтовой породой. Современное состояние лиственничных насаждений региона отражает комплексное воздействие как естественных сукцессионных процессов, так и многовекового антропогенного пресса. Анализ динамики ареала вида свидетельствует о выраженной тенденции сокращения площади лиственничников на Европейском Севере.

Антропогенная трансформация лиственничных экосистем имеет глубокие исторические корни. Особенно значительное воздействие оказала целенаправленная селективная рубка высококачественных деревьев в период интенсивного военного кораблестроения, охватывая период начиная с XVII столетия. Особенно важно отметить, что рубки проводились преимущественно в биотопах вдоль рек, что не только снижало репродуктивный потенциал популяций за счет удаления лучших экземпляров, но и нарушало естественные пути семенной миграции.

Современное распространение лиственницы на территории Архангельской области носит реликтовый характер и приурочено преимущественно к участкам с карбонатными

почвами, формирующимися на выходах карстовых пород [12]. Эти специфические эдафические условия создают уникальные биотопы, благоприятные для роста и развития насаждений. Полевые исследования участков с преобладанием лиственницы на Беломорско-Кулойском плато (БКП) показывают, что лиственница растет по III–IV классам бонитета, что совершенно не характерно для этой климатической зоны. Климатические изменения, в сочетании с последствиями исторических рубок и современными формами лесопользования создают неблагоприятные условия для естественного возобновления этого светолюбивого вида. Особую тревогу вызывает фрагментация ареала и снижение генетического разнообразия популяций, что требует разработки специальных мер по сохранению и восстановлению уникальных лиственничных экосистем Европейского Севера. В настоящее время искусственному разведению лиственницы в Архангельской области не уделяется должного внимания, что отражается в том, что она практически не встречается в проектах по искусственному лесовосстановлению, а меры по содействию естественному возобновлению носят фрагментарный характер.

Смещение ареала породы в сторону от оптимума свидетельствует о значительном влиянии абиотических и фитоценологических условий на ее распространение и приспособляемость [25]. Изучение неоднородности условий произрастания лиственничных лесов имеет большое значение для сохранения биологического разнообразия и управления лесами при климатических изменениях [28], тем более что они остаются плохо изученными типами экосистем [34]. В то же время именно на периферии ареала возможно проявление повышенной изменчивости породы [16].

На территории Беломорско-Кулойского плато представлена лиственница Сукачёва (*Larix sukaczewii* Dyl.), которая образует, как правило, смешанные древостои в местах карстовых проявлений. Распространение лиственницы здесь связано с литогенной основой,

которая включает комплекс тектонических, геоморфологических и геофизических критериев и совпадает с местами выхода на поверхность карстующихся пород [20]. Формирование высокопродуктивных лиственничных древостоев в условиях северной тайги на хорошо дренированных карбонатных почвах отмечено в ряде работ [10, 12, 23]. Однако в результате изменений характера климата, выщелачивания карбонатных почв [24], неудовлетворительного естественного возобновления и ряда других причин прослеживается динамика снижения площади лиственничников [6, 13].

На фенотипическую структуру популяций и пространственную организацию древостоев различных видов лиственницы большое влияние оказывает рельеф, который усиливает эволюционную пластичность и адаптационный потенциал породы, меняя гидротермический режим почв [3]. Так, на генетическую структуру вида и биоразнообразие лиственницы европейской во Французских Альпах большее значение оказали не климатические характеристики в высотном градиенте, а высота над уровнем моря [35]. Также возможно влияние градиента высоты на адаптацию потомства различных географических рас лиственницы [21]. Выявлена четкая зависимость продуктивности лиственницы от высоты над уровнем моря [1].

В процессе эволюции породы именно абиотические факторы, связанные с рельефом, обуславливали формирование разнообразия лиственницы, в частности образование ее географических рас, названных авторами климаорозофотипами [17]. Увеличение разнообразия лиственничных лесов в градиенте рельефа отмечено в ряде исследований [7, 19, 33]. Рост лиственницы ограничивается такими факторами, как влажность почв и температура, особенно в начале и в конце вегетационного периода [30, 31], что указывает на влияние крутизны склона и его экспозиции.

Изучение распространения лиственницы Сукачева на границе ее ареала в связи с вари-

ативностью абиотических факторов и прежде всего рельефа позволит выявить особенности приспособляемости породы в суровых условиях северной тайги, ее адаптационный потенциал и в дальнейшем – дифференциацию морфологических признаков и реализацию продуктивности. Широкие возможности работы в этом направлении открывают программы дистанционного зондирования земли и ГИС-технологий [8, 25, 32, 35], позволяющие получать информацию о морфометрических характеристиках рельефа, в том числе почвенных, для различных целей. Они будут полезны и при выявлении оптимальных параметров среды произрастания лиственницы Сукачева, имеют актуальность для разработки научно обоснованных мер, направленных на содействие ее естественному возобновлению, рациональному использованию сохранившихся древостоев, а также сохранению генетического потенциала вида на Европейском Севере России.

Цель исследования – выявить распространение насаждений с участием лиственницы Сукачева в связи с рельефом (высота над уровнем моря, крутизна и экспозиция склона, топографический индекс влажности) на севере Русской равнины в пределах западного склона Беломорско-Кулойского плато (Архангельская область).

Объекты и методы исследования

В качестве исходного материала использовали материалы лесоустройства Архангельского лесничества, площадь которого составляет 1,1 млн га. Для анализа пространственного распределения лиственничных насаждений использованы данные дистанционного зондирования Земли и фенологические особенности породы (осеннее окрашивание хвои), позволяющие визуально выделять участки с наличием лиственницы [5]. Рассмотрено 3655 выделов общей площадью 113,9 тыс. га с наличием в древостое лиственницы Сукачева. На обследованной территории БКП лиственница формирует разрежен-

ный верхний ярус, вторым ярусом густо растёт ель [23]. Высокий контраст пожелтевшей кроны в осенний период позволяет успешно выделять древостои с наличием лиственницы по космоснимкам. При этом в расчет принималось то, что наличие осины, доля которой в составе насаждений составляет менее 1 %, может вносить ошибки при дешифрировании, поэтому проводились выборочные полевые проверки.

В лесничестве преобладают спелые и перестойные насаждения, следующего состава: 75Е14С2Лц9Б+Ос. Основная порода в насаждениях – ель (*Picea abies* (L.) Karst. × *Picea obovata* (Ledeb.), доля лиственницы составляет 2 %. Она встречается повсеместно, однако древостои с преобладанием этой породы довольно редки. Древостои с наличием лиственницы на БКП занимают более 374 тыс. га, то есть треть от общего массива таких насаждений в области [26]. Архангельское лесничество находится в западной части Беломорско-Кулойского плато и занимает около 40 % его площади, поэтому по результатам исследования древостоев на выбранной нами части ключевого участка можно судить о состоянии лиственничников на всей территории.

Для комплексной характеристики рельефа выделов использована глобальная цифровая модель (ЦМР) ASTER GDEM (Global Digital Elevation Model) v3 [36]. Она представляет собой усовершенствованную версию предыдущей v.2 и характеризуется улучшенными метрическими параметрами. Согласно технической документации, вертикальная точность модели составляет: LE90 (Linear Error at 90 % confidence) – 12–30 метров, среднеквадратическая ошибка – 6–15 метров. Эти параметры обеспечивают достаточную детальность для анализа морфометрических характеристик рельефа на региональном уровне [18].

Геоинформационный анализ проводился с использованием открытого программного обеспечения SAGA GIS (System for Automated Geoscientific Analyses), которое обладает ши-

роким набором инструментов для пространственного анализа. В рамках исследования был задействован специализированный модуль Terrain Analysis, функционирующий в прямоугольной системе координат UTM (Universal Transverse Mercator) [22], в которой рассчитаны морфометрические показатели: абсолютные высотные отметки над уровнем моря; крутизна склонов (slope); экспозиция (aspect), а также топографический индекс влажности (TWI) – косвенный показатель для оценки потенциального накопления влаги [37], рассчитанный с помощью уравнения (1):

$$TWI = \ln \left(\frac{A}{\tan(\beta)} \right) (1),$$

где A – это значение удельной водосборной площади в конкретной ячейке раstra;

β – это локальный уклон (угол наклона). Он рассчитывается на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) и учитывает площадь водосбора и крутизну склона.

Методика расчета TWI учитывает два ключевых параметра рельефа: площадь водосбора, определяющую объем поступающей воды, и крутизну склона, влияющую на скорость ее стока. Полученные значения индекса позволяют количественно оценить пространственное распределение зон повышенного и пониженного увлажнения в исследуемом районе. Для корректного расчета всех параметров использовалась оригинальная цифровая модель рельефа, предварительно обработанная с применением фильтров для устранения артефактов и шумов [9].

Для пространственного анализа взаимосвязи между распространением лиственницы и характеристиками рельефа была реализована следующая методика обработки данных. На первом этапе проведено совмещение растровых слоев морфометрических показателей с векторным слоем границ лесных выделов, содержащих лиственницу. Интеграция данных осуществлялась в геоинформационной системе QGIS (версия 3.16) в единой системе координат.

Расчет средних значений морфометрических параметров для каждого выдела выполнялся с применением инструмента «Зональная статистика», который позволяет агрегировать растровые данные внутри векторных полигонов. Рассчитаны также средние значения высоты НУМ, крутизны, экспозиции склона и TWI с помощью инструмента «Зональная статистика» в QGIS.

Для последующей обработки атрибутивную таблицу сохранили в формате Excel, где проведена первичная проверка на наличие выбросов и артефактов. Статистическую обработку численных данных выполняли в программе Statistica.

Статистическая обработка числовых данных выполнялась в специализированном пакете Statistica. Анализ включал: описательную статистику (средние значения, стандартные отклонения, минимум/максимум); корреляционный анализ между параметрами рельефа; кластерный анализ для выявления групп выделов со схожими характеристиками.

Для детального анализа влияния рельефа на распространение лиственницы Сукачева была проведена классификация территории по двум ключевым морфометрическим показателям: крутизне и экспозиции склонов.

По крутизне склонов согласно общепринятой методике использовали семь градаций: 1–3° – слабонаклонные равнины (очень пологие склоны); 3–5° – склоны пологие (наклонные равнины); 5–7° – слабопокатые; 7–10° – покатые; 10–15° – сильнопокатые; 15–20° – крутые; 20–40° – очень крутые [11]. По экспозиции склонов выделялось 8 групп на основе румбов: восточные, западные, северные, северо-восточные, северо-западные, южные, юго-восточные и юго-западные [14].

Такая классификация позволяет выявить закономерности распределения лиственницы в зависимости от инсоляционного режима и условий увлажнения, связанных с экспозицией склонов. Особое значение имеет анализ микроклиматических различий между склонами северной и южной экспозиции, которые

могут варьировать по освещенности и значительно различаться по тепловому режиму [14]. Полученные данные о пространственном распределении лиственницы по различным типам склонов позволяют сделать выводы об экологических предпочтениях вида в районе исследования.

Результаты и их обсуждение

В западной части Беломорско-Кулойского плато четко выделяется компактная центральная часть с произрастанием лиственницы: бассейн рек Кепина, Пачуга и Падун (рис. 1). Данная территория характеризуется специфическими геоморфологическими условиями: сочетанием повышений мезорельефа (относительные превышения 20–50 м) с широким развитием карстовых форм рельефа и карстующимися породами, представленным известняками и доломитами среднего и верхнего карбона [27]. Именно по выделам лиственничных насаждений этого лесного массива и проводили анализ рельефоидности местообитаний.

Вариационный ряд выделов с участием лиственницы по высоте над уровнем моря приведен на рисунке 2.

Пространственное распределение лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.) на БКП демонстрирует выраженную высотную дифференциацию. Лиственничные насаждения, как правило, расположены выше 80 м н. у. м. В диапазоне высот 80–160 м доля участков с наличием лиственницы составляет 92,4 %, на высотах выше 160 метров она снижается до 3,3 %, что может быть связано с менее благоприятными условиями для роста. Таким образом, в условиях БКП оптимальные высоты над уровнем моря для распространения лиственницы Сукачева находится в весьма узком диапазоне (80–160 м), ограниченном орографией региона. Для других районов распространения (Сибирь, Дальний Восток) лиственница демонстрирует широкую экологическую амплитуду, занимая различные высотные поя-

са в зависимости географических условий [4]. Считается, что оптимальными экотопами для лиственницы сибирской в пределах естественного ареала являются пологие склоны гор и предгорий в пределах высот 1000 м н. у. м. с глубокими, хорошо дренированными, равномерно увлажненными,

слабокислыми и нейтральными почвами типа дерново-слабоподзолистых или перегнойно-карбонатных [10].

Дифференциация местообитаний с участием лиственницы Сукачева в насаждении по экспозиции и крутизне склонов приведена на рисунке 3.

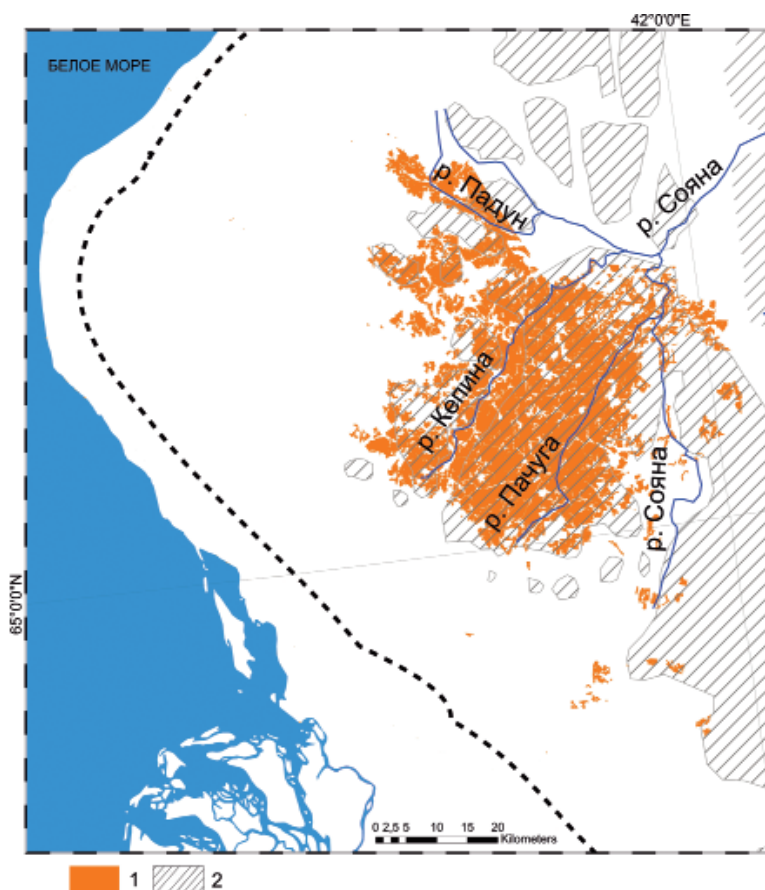


Рис. 1. Распространение и приуроченность лиственницы к карстующимся горным породам в западной части БКП (1 – древостой с участием лиственницы; 2 – карстующиеся горные породы [27])

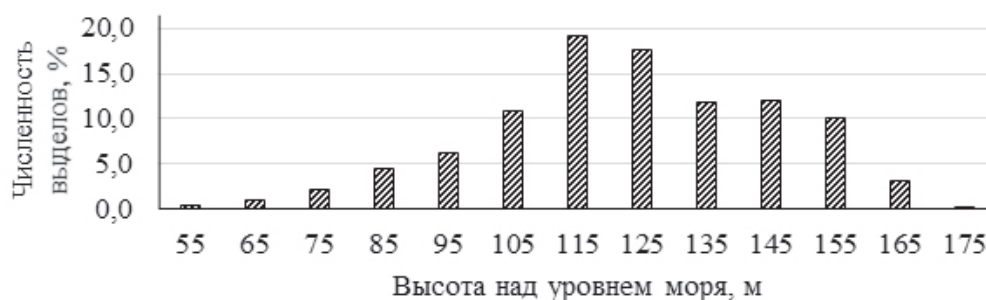


Рис. 2. Распределение выделов лиственничных насаждений по высоте над уровнем моря

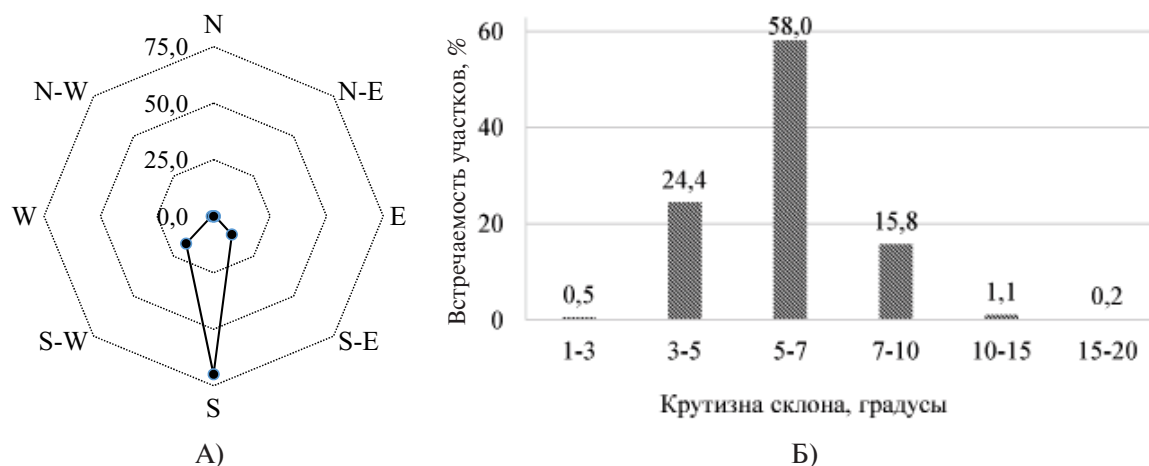


Рис. 3. Дифференциация участков с наличием лиственницы по экспозиции (А) и крутизне склонов (Б)

Древостой с участием лиственницы в составе размещаются преимущественно на южных (69,6 %), юго-западных (17,3 %) и юго-восточных (11,5 %) склонах, что может быть связано с микроклиматическими условиями: влажностью, температурой и в большей степени — освещённостью. Такие склоны получают больше солнечной радиации по сравнению с северными. Кроме того, лиственница очень светолюбива, причем на севере ее потребность в свете выше, чем в южных широтах [23]. Это выражается в существенных различиях в динамике радиального роста деревьев лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) в условиях склонов северной и южной экспозиции [2].

Рассматриваемые выдела с наличием лиственницы охватывают широкий диапазон крутизны склонов: от 2,1° до 25,9°. Чаще лиственничники встречаются на покатых (58,0 %) и на слабопокатых склонах (24,4 %). Большинство насаждений приурочено к склонам в диапазоне от 5° до 15° (98,2 %). Подобные закономерности распространения лиственничников по крутизне склонов получены также для восточной части Беломорско-Кулойского плато [19].

Четко выраженный оптимум крутизны склонов в диапазоне 7–10°, возможно, является зоной, где в условиях северной тайги соблюдается баланс почвенной влажности. Резкий спад количества участков, расположенных на уклонах <5° и >15°, может говорить о неблагоприят-

ных условиях для произрастания там лиственницы, которая чувствительна как к застою влаги в почвах, так и к водному дефициту. Крутизна склона обеспечивает не только гидрологический режим почвы, но и старт вегетации в начале сезона, связанный с ее прогреванием [3, 33].

Расчет топографического индекса влажности в определенной мере позволяет отразить гидротермический режим почв анализируемых насаждений с участием лиственницы Сукачева. Распределение участков по диапазонам значений TWI приведено на рисунке 4.

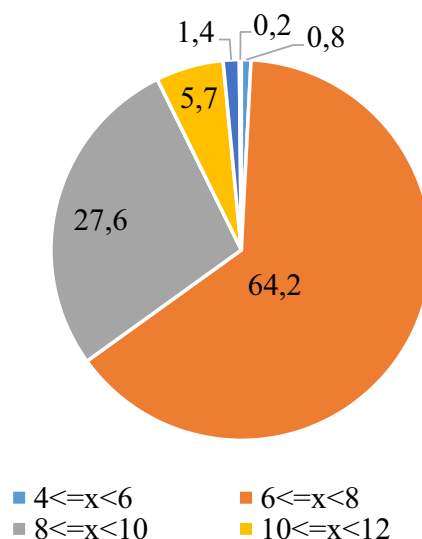


Рис. 4. Дифференциация участков с наличием лиственницы по топографическому индексу влажности

Участки с низким значением TWI представляют области с самыми крутыми уклонами, где возможно иссушение почвы, а его высокие значения – места с повышенным накоплением влаги в почве [8]. Диапазон индекса TWI говорит о том, что лиственница демонстрирует широкий полиморфизм относительно условий гидротермического режима, но все же имеет четкую приуроченность к умеренно-сухим, дренированным условиям, что отмечалось учеными ранее [12]. Такие местообитания связывают с карстовыми породами [20].

Установлены факторы рельефа, позволяющие выявить ограничения в распространении лиственницы Сукачева в пределах западной части БКП. На участках с крутизной склона 5–15° и высотой 80–160 м н. у. м. распространение лиственницы сочетается с TWI, равным 6–8. Это указывает на достаточное увлажнение без заболачивания. Однако на северных склонах (даже при подходящем укло-

не) распространение лиственницы ограничено, вероятно, из-за недостатка тепла. Кроме того, при TWI > 10 (переувлажненные участки) лиственница в составе насаждений не встречается, даже при благоприятной (южной) экспозиции склона.

Кластерный анализ (рис. 5) показал, что распространение лиственницы Сукачева в пределах западной части БКП (подзона северной тайги) зависит от двух независимых групп факторов. Первая группа включает факторы микроклимата (экспозиция склона + высота над уровнем моря) и отражает предпочтения лиственницы, связанные с балансом тепла и света. Вторая группа отражает факторы, связанные с гидрологией (крутизна склона + TWI). Она отражает гидрологические и, косвенно, почвенные предпочтения лиственницы Сукачева, которая для произрастания выбирает места с умеренным стоком, но с достаточным обеспечением влагой.

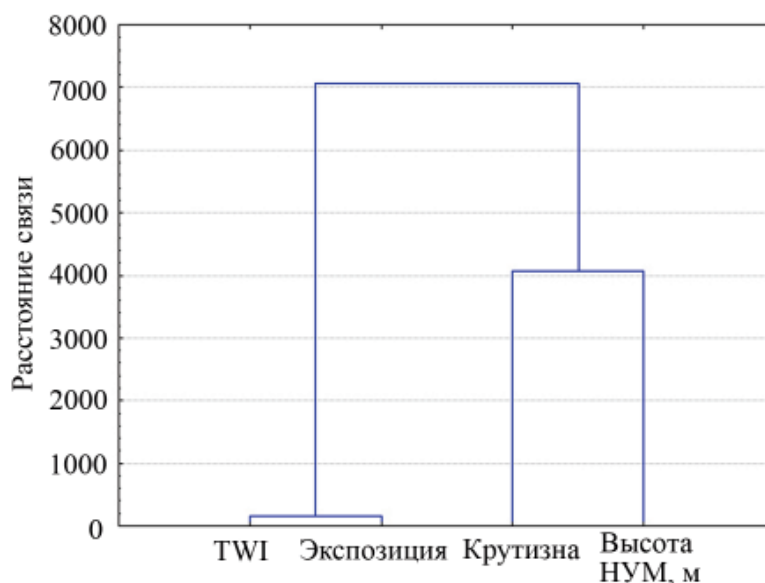


Рис. 5. Кластерный анализ распределения участков с наличием лиственницы

Таким образом, для успешного произрастания лиственницы Сукачева требуется совпадение по меньшей мере 4-х параметров абиотической среды, включая тепло- и светообеспеченность, а также факторы гидрологического режима почв, во многом зависящие от крутизны склона и стока

влаги, – что согласуется с результатами других исследований [29]. В то же время отсутствие комплекса факторов (один-два действующих) создает неоднородности ландшафта, снижает распространение лиственницы, но может способствовать повышению биоразнообразия [28].

Заключение

Проведенный комплексный анализ пространственного распределения лиственницы Сукачева в западной части Беломорско-Кулойского плато позволил выявить ряд важных закономерностей, определяющих экологические предпочтения данного вида в условиях северной тайги. Исследование взаимосвязей между параметрами рельефа (высотой над уровнем моря, экспозицией и крутизной склонов, топографическим индексом влажности) и встречаемостью лиственницы показало существование четко выраженного экологического оптимума, характерного для этого региона. На основе анализа распределения лиственницы по высоте над уровнем моря, экспозиции склонов, уклону и топографическому индексу влажности можно сделать следующие выводы о значимых факторах и их взаимосвязях. Произрастание лиственницы Сукачева в регионе исследований (подзона северной тайги) имеет достаточно высокий полиморфизм в высотной дифференциации участков местопроизрастания (в пределах орографии территории). Наибольшее число насаждений с участием лиственницы в составе приурочено к высоте над уровнем моря 80–160 м. Она предпочитает хорошо прогреваемые и освещенные, достаточно пологие (7–10°) склоны южной, юго-западной и юго-восточной экспозиций. Эти склоны обеспечивают повышенную требовательность лиственницы к гидрологическому режиму.

Полученные данные позволяют говорить о комплексности действия факторов, связанных с высотной дифференциацией ландшафтов, обеспечивающих успешность распространения лиственницы (частоту встречаемости насаждений с ее участием). Оптимум условий распространения лиственницы в условиях Севера создается при обеспечении комплекса факторов как микроклиматических (экспозиция склона, высота над уровнем моря), так и гидрологических (крутизна склона и гидрологический режим). Исключение ряда факторов из этого сочетания снижает успешность распространения породы.

Практическая значимость исследования заключается в возможности разработки научно обоснованных рекомендаций по оптимизации лесопользования и сохранения биоразнообразия лиственничных экосистем. Особое внимание следует уделять территориям, сочетающим пологие склоны южной экспозиции с оптимальными показателями увлажнения. Перспективы дальнейших исследований связаны с углубленным изучением влияния почвенных условий, литологической основы и антропогенных факторов на продуктивность и устойчивость лиственничных насаждений в условиях меняющегося климата. Полученные результаты позволяют разработать конкретные рекомендации по выделению перспективных участков для лесовосстановления (пологие склоны южной экспозиции).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алипов, Б.А. Влияние высоты над уровнем моря на продуктивность лиственничников Рудного Алтая / Б.А. Алипов, А.А. Калачев, С.В. Залесов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 6–5 (120). – С. 20–25. – DOI: 10.23670/IRJ.2022.120.6.097.
2. Бенькова, А.В. Значение экспозиции склонов для роста лиственницы Гмелина в мерзлотных условиях Средней Сибири и различия в динамике радиального прироста деревьев на склонах северной и южной экспозиции / А.В. Бенькова, Д.А. Машуков, В.Е. Бенькова [и др.] // Сибирский лесной журнал. – 2015. – № 4. – С. 18–29. – DOI: 10.15372/SJFS20150402.
3. Бенькова, В.Е. Значение микроэкологических условий для роста лиственницы Гмелина в экотоне верхней границы леса на полуострове Таймыр / В.Е. Бенькова, А.В. Шашкин, М.М. Наурзбаев, А.С. Прокушкин, В.В. Симанько // Лесоведение. – 2012. – № 5. – С. 59–70.

4. Биоразнообразие лиственниц Азиатской России / отв. ред. С.П. Ефремов, Л.И. Милютин; Рос. акад. наук, Сибирское отделение, Институт леса им. В.Н. Сукачева. – Новосибирск : Академическое изд-во «Гео», 2010. – 159 с.
5. Богданов, А.П. Особенности спектрального отображения лиственницы в осенний период на материалах съемки Sentinel-2 / А.П. Богданов, А.С. Ильинцев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2025. – Вып. 253. – С. 6–21. – DOI: 10.21266/2079–4304.2025.253.6–21.
6. Богданов, А.П. Закономерности строения и динамика старовозрастных лиственнично-сосновых древостоев по результатам стационарных исследований в Архангельской области / А.П. Богданов, С.В. Третьяков, С.В. Коптев [и др.] // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2024. – № 3. – С. 20–29. – DOI: 10.17076/eco1751.
7. Волокитина, А.В. Пространственное варьирование вида и запаса мохово-лишайникового покрова и подстилки в северных лиственничниках / А.В. Волокитина, М.А. Софронов // Хвойные бореальной зоны. – 2008. – Т. XXV, № 3–4. – С. 209–212.
8. Гопп, Н.В. Использование почвенно-геоморфологической базы данных для изучения пространственной изменчивости содержания гумуса, физической глины и ила в почвах Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции / Н.В. Гопп // Почвоведение. – 2021. – № 7. – С. 783–796. – DOI: 10.31857/S0032180X21070054.
9. Дуброва, Ю.Н. Геоморфометрический анализ рельефа территории Горецкого района с использованием данных дистанционного зондирования / Ю.Н. Дуброва, Т.Н. Мыслыва, Т.Н. Ткачева // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 1. – С. 209–216.
10. Дылис, Н.В. Лиственница / Н.В. Дылис. – М. : Лесная промышленность, 1981. – 96 с.
11. Жучкова, В.К. Методы комплексных физико-географических исследований / В.К. Жучкова, Э.М. Раковская. – М. : Издательский центр «Академия», 2004. – 368 с.
12. Кашин, В.И. Лиственничные леса Европейского севера России / В.И. Кашин, А.С. Козобродов. – Архангельск: Архангельский филиал Русского географического общества РАН, 1994. – 213 с.
13. Козыкин, А.В. Старожилы леса / А.В. Козыкин // Информационный бюллетень заповедника «Пинежский». – 2016. – № 64 (4). – С. 1–2. – URL: <https://www.zapovednik-pinega.ru/upload/medialibrary/a5e/a5efaf2f610fbe2b97096193aa1547b1.pdf> (дата обращения: 22.03.2025).
14. Коновалова, М.Е. Сопряженность признаков рельефа и типов леса в горных условиях / М.Е. Коновалова, Г.Б. Кофман, А.Е. Коновалова // География и природные ресурсы. – 2015. – № 2. – С. 177–182.
15. Корешков, Н.В. Географические культуры лиственницы / Н.В. Корешков, Е.А. Царева. – СПб. : Наукоемкие технологии, 2021. – 414 с.
16. Коропачинский, И.Ю. Ботаникогеографические и лесоводственные аспекты интрогрессивной гибридизации лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) и лиственницы Каяндера (*L. cajanderi* Mair) / И.Ю. Коропачинский, Л.И. Милютин // Сибирский экологический журнал. – 2011. – № 2. – С. 225–238.
17. Мерзленко, М.Д. Результаты выращивания климатипов лиственницы в географических культурах Западного Подмосковья / М.Д. Мерзленко, П.Г. Мельник, А.А. Коженкова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 1. – С. 72–77.
18. Минеев, А.Л. Подготовка цифровой модели рельефа для исследования экзогенных процессов северных территорий Российской Федерации / А.Л. Минеев, Ю.Г. Кутинов, З.Б. Чистова, Е.В. Полякова // Пространство и Время. – 2015. – № 3 (21). – С. 270–277.
19. Неверов, Н.А. Влияние мезорельефа и подстилающих горных пород на распространение и продуктивность притундровых лиственничников (Архангельская область) / Н.А. Неверов, А.Л. Минеев // Вест-

- ник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. – 2024. – № 4 (77). – С. 123–130. – DOI: 10.34655/bgsha.2024.77.4.016.
20. Неверов, Н.А. Динамика радиального роста лиственницы (*Larix sibirica* L.) в притундровых лесах Архангельской области / Н.А. Неверов, Е.В. Полякова // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 12. – С. 9–14. – DOI: 10.17513/use.37943.
 21. Николаева, М.А. Оценка развития лиственницы в географических культурах Ленинградской области / М.А. Николаева, Л.В. Орлова, А.В. Жигунов [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2024. – Вып. 249. – С. 103–124. – DOI: 10.21266/2079–4304.2024.249.103–126.
 22. Рахматуллина, И.Р. Влияние морфометрических показателей рельефа на размещение лесообразующих древесных видов Бугульминско-Белебеевской возвышенности (в пределах Республики Башкортостан) / И.Р. Рахматуллина, З.З. Рахматуллин, А.К. Габделхаков // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг. – 2016. – № 2. – С. 84–92.
 23. Рысин, Л.П. Лиственничные леса России / Л.П. Рысин. – М. : ООО «Товарищество научных изданий КМК», 2010. – 343 с.
 24. Сурсо, М.В. Лесообразующие хвойные Европейского Севера России: репродуктивная биология, внутривидовая дифференциация, генетический полиморфизм / М.В. Сурсо. – Екатеринбург : ИЭПС УрО РАН, 2007. – 252 с.
 25. Тихонова, И.В. Потенциальные почвенно-климатические ареалы сосны и лиственницы в Средней Сибири / И.В. Тихонова, М.А. Корец, Л.В. Мухортова // Лесоведение. – 2014. – № 2. – С. 3–10.
 26. Торхов, С.В. Лиственница в лесах Архангельской области: состояние, динамика, использование / С.В. Торхов, Д.В. Трубин // Материалы регионального рабочего совещания «Лиственничные леса Архангельской области, их использование и воспроизводство». – Архангельск : Пресс-Принт, 2002. – С. 5–22.
 27. Шаврина, Е.В. Особенности развития и распространения карста Архангельской области / Е.В. Шаврина, В.Н. Малков, Е.И. Гуркало // Геоморфология. – 2007. – № 2. – С. 90–101. – DOI: 10.15356/0435–4281–2007–2–90–101.
 28. Crotteau, J.S. Initiating Climate Adaptation in a Western Larch Forest / J.S. Crotteau, E.K. Sutherland, T.B. Jain [et al.] // Forest Science. – 2019. – Vol. 65, issue 4. – P. 528–536. – DOI: 10.1093/forsci/fxz024.
 29. Duan, G. Site Index Modeling of Larch Using a Mixed-Effects Model across Regional Site Types in Northern China / G. Duan, X. Lei, X. Zhang, X. Liu // Forests. – 2022. – Vol. 13 (5). – P. 815. – DOI: 10.3390/f13050815.
 30. Kharuk, V.I. Climate-induced larch growth response within the central Siberian permafrost zone / V.I. Kharuk, S.T. Im, I.A. Petrov, K.J. Ranson // Environmental Research Letters. – 2015. – Vol. 10. – No. 12. – P. 125009. – DOI: 10.1088/1748–9326/10/12/125009.
 31. Kharuk, V.I. Larch response to warming in northern Siberia / V.I. Kharuk, I.A. Petrov, L.V. Krivobokov [et al.] // Regional Environmental Change. – 2023. – Vol. 17. – DOI: 10.1007/s10113–022–02016–9.
 32. Krivobokov, L.V. Floristic characteristics, types and ecology of larch forests of the Middle Siberia of northern boreal subzone / L.V. Krivobokov, A.A. Zverev, L.V. Mukhortova // Journal of International Scientific Publications. Ecology & Safety. – 2015. – Vol. 9. – P. 190–198.
 33. Liang, M. Importance of soil moisture and N availability to larch growth and distribution in the Arctic taiga-tundra boundary ecosystem, northeastern Siberia / M. Liang, A. Sugimoto, S. Tei [et al.] // Polar Science. – 2014. – Vol. 8 (4). – P. 327–341. – DOI: 10.1016/j.polar.2014.07.008.
 34. Liu, Z. Effects of climate and fire on short-term vegetation recovery in the boreal larch forests of Northeastern China / Z. Liu // Scientific Reports. – 2016. – No. 6 (37572). – DOI: 10.1038/srep37572.

35. Nardin, M. Genetic differentiation of European larch along an altitudinal gradient in the French Alps / M. Nardin, B. Musch, Y. Rousselle [et al.] // *Annals of Forest Science*. – 2015. – Vol. 13. – P. 517–527. – DOI: 10.1007/s13595–015–0483–8.
36. NASA Earth science data [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.earthdata.nasa.gov> (дата обращения: 22.03.2025).
37. Wilson, J.P. *Terrain Analysis: Principles and Applications* / J.P. Wilson, J.C. Gallant / John Wiley & Sons, 2000. – 520 p.

REFERENCES

1. Alipov B.A., Kalachev A.A., Zalesov S.V. Influence of altitude above sea level on the productivity of larch forests of the Rudny Altai. *International Research Journal [Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal]*, 2022, no. 6–5 (120), pp. 20–25. DOI: 10.23670/IRJ.2022.120.6.097. (In Russian).
2. Benkova A.V., Mashukov D.A., Benkova V.E., Prokushkin A.S., Shashkin A.V. The effect of slope exposition on the growth dynamics of *Larix gmelinii* in permafrost conditions of central Siberia and differences in tree radial dynamics growth in the northward south-facing slope. *Siberian Journal of Forest Science [Sibirskiy lesnoy zhurnal]*, 2015, no. 4, pp. 18–29. DOI: 10.15372/SJFS20150402. (In Russian).
3. Benkova V.E., Shashkin A.V., Naurzbaev M.M., Prokushkin A.S., Simanko V.V. The importance of microecological conditions for growth of *Larix gmelinii* at the timberline on Taimyr peninsula. *Russian Journal of Forest Science [Lesovedenie]*, 2012, no. 5, pp. 59–70. (In Russian).
4. Efremov S.P., Milyutin L.I. *Larch biodiversity of Asian Russia*. Novosibirsk, Geo, 2010. 159 p. (In Russian).
5. Bogdanov A.P., Ilyintsev A.S. Features of the spectral display of larch in the autumn period on the materials of the Sentinel-2 survey. *Bulletin of the St. Petersburg Forest Technical Academy [Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii]*, 2025, iss. 253, pp. 6–21. (In Russian).
6. Bogdanov A.P., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Yaroslavtsev S.V., Davydov A.V. Patterns of the structure and dynamics of old-growth larch-pine: results of stationary research in the Arkhangelsk region. *Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences [Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk]*, 2024, no. 3, pp. 20–29. DOI: 10.17076/eco1751. (In Russian).
7. Volokitina A.V., Sofronov M.A. Spatial variation of species and stock of moss-lichen cover and litter in the northern larch forests. *Conifers of the boreal area [Khvoynye boreal'noi zony]*, 2008, vol. XXV, no. 3–4, pp. 209–212. (In Russian).
8. Gopp N.V. The use of the soil-geomorphological database for studying the spatial variability of the humus content, physical clay, and clay in the soils of the Kuznetsk-Salair geomorphological province. *Soil Science [Pochvovedenie]*, 2021, no. 7, pp. 783–796. DOI: 10.31857/S0032180X21070054. (In Russian).
9. Dubrova Yu.N., Myslyva T.N., Tkacheva T.N. Geomorphometric analysis of the relief of the Goretzky district using remote sensing data. *Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy [Vestnik Belorusskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii]*, 2021, no. 1, pp. 209–216. (In Russian).
10. Dylis N.V. *Larch*. Moscow, Forestry industry, 1981, 96 p. (In Russian).
11. Zhuchkova V.K., Rakovskaya E.M. *Methods of complex physical and geographical research*. Moscow, Publishing center «Academy», 2004, 368 p. (In Russian).
12. Kashin V.I., Kozobrodov A.S. *Larch forests of the European North of Russia*. Arkhangelsk, The Arkhangelsk regional branch of the Russian Geographical Society, 1994, 213 p.

13. Kozykin A.V. Old-timers of the forest. *Information Bulletin of the Pinezhsky Reserve [Informatsionnyi byulleten' zapovednika «Pinezhsii»]*, 2016, no. 64 (4), pp. 1–2. URL: <https://www.zapovednik-pinega.ru/upload/medialibrary/a5e/a5efaf2f610fbe2b97096193aa1547b1.pdf> (date of access: 22.03.2025). (In Russian).
14. Konovalova M.E., Kofman G.B., Konovalova A.E. Correlation between relief features and forest types in mountainous conditions. *Geography and Natural Resources [Geografiya i prirodnye resursy]*, 2015, no. 2, pp. 177–182. (In Russian).
15. Koreshkov N.V., Tsareva E.A. Geographical cultures of larch. Monograph. Saint Petersburg, High-tech, 2021, 414 p. (In Russian).
16. Koropachinskii I.Yu., Milyutin L.I. Botanical-geographical and forestry aspects of introgressive hybridization of the Gmelin's larch (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) and cajander larch (*L. cajanderi* Mayr). *Siberian Ecological Journal [Sibirskii ekologicheskii zhurnal]*, 2011, no. 2, pp. 225–238. (In Russian).
17. Merzlenko M.D., Melnik P.G., Kozhenkova A.A. Growth results of larch climotypes in geographical plantations of the western part of the Moscow region. *Bulletin of the Altai State Agrarian University [Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta]*, 2018, no. 1, pp. 72–77. (In Russian).
18. Mineev A.L., Kutinov Yu.G., Chistova Z.B., Polyakova E.V. Building the digital elevation model for studying exogenous processes across northern territories of Russian Federation. *Space and Time [Prostranstvo i Vremya]*, 2015, no. 3 (21), pp. 270–277. (In Russian).
19. Neverov N.A., Mineev A.L. Influence of mesorelief and underlying rocks on the distribution and productivity of pre-tundra larch forests (Arkhangelsk region). *Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy [Vestnik Buryatskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii im. V.R. Filippova]*, 2024, no. 4 (77), pp. 123–130. DOI: 10.34655/bgsha.2024.77.4.016. (In Russian).
20. Neverov N.A., Polyakova E.V. Dynamics of radial growth of larch (*Larix sibirica* L.) in the tundra forests of the Arkhangelsk region. *Advances in current natural sciences [Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya]*, 2022, no. 12, pp. 9–14. DOI: 10.17513/use.37943. (In Russian).
21. Nikolaeva M.A., Orlova L.V., Zhigunov A.V., Nikolaev S.A., Begletsov M.S. Assessment of larch development in geographical cultures of the Leningrad region. *Bulletin of St. Petersburg Forest Technical Academy [Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii]*, 2024, iss. 249, pp. 103–124. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.103-126. (In Russian).
22. Rakhmatullina I.R., Rakhmatullin Z.Z., Gabdelkhakov A.K. Influence of morphometric indexes of the relief on placement of wood views of Bugulma-Belebey upland (within the Republic of Bashkortostan). *Forest ecosystems under climate change: biological productivity and remote monitoring [Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyi monitoring]*, 2016, no. 2, pp. 84–92. (In Russian).
23. Rysin L.P. Larch forests of Russia. Moscow, LLC “KMK Scientific Publications Partnership”, 2010, 343 p. (In Russian).
24. Surso M.V. Forest-Forming Coniferous Plants of the European North of Russia: Reproductive Biology, Intraspecific Differentiation, Genetic Polymorphism. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2007, 252 p. (In Russian).
25. Tikhonova I.V., Korets M.A., Mukhortova L.V. Potential soil and climatic ranges of pine and larch in Central Siberia. *Russian Journal of Forest Science [Lesovedenie]*, 2014, no. 2, pp. 3–10. (In Russian).
26. Torkhov S.V., Trubin D.V. Larch in the forests of the Arkhangelsk region: state, dynamics, use. *Materials of the regional workshop “Larch forests of the Arkhangelsk region, their use and reproduction” [Materialy regional'nogo rabocheho soveshchaniya «Listvennichnye lesa Arkhangel'skoi oblasti, ikh ispol'zovanie i vosпроизvodstvo»]*, Arkhangelsk, Press-Print, 2002, pp. 5–22. (In Russian).

27. Shavrina E.V., Malkov V.N., Gurkalo E.I. Karst development and distribution in the Arkhangelsk region. *Geomorphology [Geomorfologiya]*, 2007, no. 2, pp. 90–101. DOI: 10.15356/0435-4281-2007-2-90-101. (In Russian).
28. Crotteau J.S., Sutherland E.K., Jain T.B., Wright D.K., Jenkins M.M., Keyes C.R., Nagel L.M. Initiating Climate Adaptation in a Western Larch Forest. *Forest Science*, vol. 65 (4), 2019, pp. 528–536. DOI:10.1093/forsci/fxz024.
29. Duan G., Lei X., Zhang X., Liu X. Site index modeling of larch using a mixed-effects model across regional site types in Northern China. *Forests*, 2022, vol. 13, no. 5, p. 815. DOI: 10.3390/f13050815.
30. Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Ranson K.J. Climate-induced larch growth response within the central Siberian permafrost zone. *Environmental Research Letters*, 2015, vol. 10, no. 12, p. 125009. DOI: 10.1088/1748-9326/10/12/125009.
31. Kharuk V.I., Petrov I.A., Krivobokov L.V., Golyukov A.S., Dvinskaya M.L., Im S.T., Shushpanov A.S., Smith K.T. Larch response to warming in northern Siberia. *Regional Environmental Change*, 2023, 17. DOI: 10.1007/s10113-022-02016-9.
32. Krivobokov L.V., Zverev A.A., Mukhortova L.V. Floristic characteristics, types and ecology of larch forests of the Middle Siberia of northern boreal subzone. *Journal of International Scientific Publications. Ecology & Safety*, 2015, vol. 9, pp. 190–198.
33. Liang M., Sugimoto A., Tei S., Bragin I.V., Takano S., Morozumi T., Shingubara R., Maximov T.C., Kiyashko S.I., Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V. Importance of soil moisture and N availability to larch growth and distribution in the Arctic taiga-tundra boundary ecosystem, northeastern Siberia. *Polar Science*, 2014, vol. 8 (4), pp. 327–341. DOI: 10.1016/j.polar.2014.07.008.
34. Liu Z. Effects of climate and fire on short-term vegetation recovery in the boreal larch forests of Northeastern China. *Scientific Reports*, 2016, no. 6 (37572). DOI: 10.1038/srep37572.
35. Nardin M., Musch B., Rousselle Y, Guérin V., Sanchez L., Rossi J.-P., Gerber S., Marin S., Pâques L., Pâques E. Rozenberg P. Genetic differentiation of European larch along an altitudinal gradient in the French Alps. *Annals of Forest Science*, 2015, vol. 13, pp. 517–527. DOI: 10.1007/s13595-015-0483-8.
36. NASA Earth science data. Available at: <https://www.earthdata.nasa.gov> (accessed: 22.03.2025).
37. Wilson J.P., Gallant J.C. *Terrain Analysis: Principles and Applications* / John Wiley & Sons, 2000, 520 p.

Статья поступила в редакцию 27.06.2025