

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный лесотехнический университет»

На правах рукописи

Агапитов Егор Михайлович

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА И ДЕПОНИРОВАНИЕ
УГЛЕРОДА ЛИСТВЕННИЦЕЙ СИБИРСКОЙ В ЭКОТОНЕ ВЕРХНЕЙ
ГРАНИЦЫ ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ПОЛЯРНОМ УРАЛЕ
В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ
КЛИМАТА**

4.1.6 – Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация,
озеленение, лесная пирология и таксация

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Научный руководитель:
доктор биологических наук,
доцент Фомин В. В.

Екатеринбург – 2026

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Современное состояние исследований в области климатогенной пространственно-временной динамики древесной растительности вблизи верхнего предела ее произрастания с использованием данных дистанционного зондирования	11
Глава 2. Программа, методика и объект исследования.....	34
2.1 Характеристика района исследований	34
2.2 Программа исследования и объем выполненных работ.....	40
2.3 Методика исследований.....	41
Глава 3. Реконструкция возрастных поколений популяции лиственницы сибирской	52
Глава 4. Количественная оценка депонирования углерода лиственницей сибирской в XX – начале XXI вв.	64
Заключение.....	74
Список сокращений и условных обозначений	76
Библиографический список.....	77
Приложение А.....	115

Введение

Актуальность темы. Исследование реакции биоты на современное изменение климата является одним из ключевых трендов современной науки. Это обусловлено необходимостью изучения процессов, происходящих в экосистемах в этих условиях, и прогнозирования возможных изменений них в будущем.

Древесная растительность вблизи верхнего предела ее произрастания является чувствительным индикатором, отражающим даже незначительные изменения в климатической системе. Поэтому участки горных массивов с лесными и лесотундровыми экосистемами в разных регионах Земли используются исследователями в качестве мониторинговых полигонов для изучения ранней реакции растительности на изменение климата (Горчаковский, Шиятов, 1977; Шиятов, 1986, 2006; Капралов, 2007; Мазепа, 2009; Григорьев и др., 2019; Тимофеев и др., 2021; Fomin et al., 2022; Громов и др., 2023; Савчук и др., 2023; Филимонова и др., 2023; Дзюба и др., 2024; Вьюхин и др., 2024; Нагимов и др., 2024).

Несмотря на большое количество публикаций в научной литературе, посвященных изучению климатогенной пространственно-временной динамики древесной растительности, остается еще недостаточно проработанным ряд методических, теоретических и прикладных аспектов исследований в данной области.

На методическом уровне необходимо решить задачи, связанные с переходом от выборочных оценок параметров древесных растений на пробных площадях к индивидуальной оценке параметров каждого из всех доступных для распознавания на современном уровне развития науки и техники экземпляра древесного растения на исследуемой территории. Это относится в том числе к возможности использования беспилотных авиационных систем для получения снимков сверхвысокого пространственного разрешения и программного обеспечения, позволяющего проводить обработку, анализ, интеграцию данных и моделирование.

Проработка методических аспектов открывает возможность получения на теоретическом уровне: количественных оценок параметров древесных растений в непрерывно меняющемся градиенте условий среды; новых данных и закономерностей о климатогенной динамике древесной растительности вблизи верхнего

предела ее произрастания.

Актуальность темы на прикладном уровне исследований обусловлена возможностью получения количественных данных по величине фитомассы и, соответственно, депонирования углерода для каждого древесного растения, а также для всей их совокупности на исследуемой территории.

Степень разработанности темы исследования. Диссертационная работа является продолжением исследований климатогенной пространственно-временной динамики древесной растительности вблизи верхнего предела ее произрастания на Полярном Урале, продолжающихся на протяжении нескольких десятилетий (Шиятов, 2006; Мазепа, Шиятов, 2014; Михайлович, Фомин, 2017; Ан-дреяшкина, Веселкин, 2019; Агапитов и др., 2022; Михайлович, 2022; Fomin et al., 2022; Фомин и др., 2023; Mikhailovich, Fomin, 2023; Балакин и др., 2024; Михайлович и др., 2025).

Несмотря на значительное количество отечественных и зарубежных научных публикаций в данной области остаются нерешенными вопросы, связанные с необходимостью определения возрастных поколений древесной растительности на основе индивидуальных параметров деревьев на исследуемой территории и получения количественных оценок фитомассы и величины депонирования углерода, в том числе по возрастным поколениям.

Диссертация является законченным научным исследованием.

Цель и задачи научного исследования

Цель диссертационной работы – анализ пространственно-временной динамики и величины депонирования углерода лиственницей сибирской вблизи верхнего предела ее произрастания в условиях современного изменения климата.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Разработать математико-статистические модели взаимосвязи биометрических характеристик лиственницы сибирской вблизи верхнего предела произрастания древесной растительности на Полярном Урале.

2. Разработать методику реконструкции возрастных поколений лиственницы сибирской на основе данных прямых наземных измерений биометрических харак-

теристик и возраста экземпляров лиственницы сибирской на пробных площадях.

3. Разработать картосхему возрастных поколений лиственницы сибирской по результатам дешифрирования данных дистанционного зондирования сверхвысокого пространственного разрешения, полученных при помощи беспилотного летательного аппарата, с использованием разработанной методики реконструкции возрастных поколений.

4. Провести количественную оценку величины депонирования углерода лиственницей сибирской, в том числе по возрастным поколениям, в экотоне верхней границы древесной растительности в районе исследований.

Научная новизна. Впервые разработана методика определения возрастных поколений лиственницы сибирской по величине радиуса горизонтальной проекции кроны. На ее основе с использованием данных, полученных в результате дешифрирования крон экземпляров лиственницы сибирской по аэроснимкам сверхвысокого пространственного разрешения, создана картосхема распределения лиственницы сибирской в экотоне верхней границы древесной растительности по возрастным поколениям до 10 лет включительно, от 11 до 40 включительно, и старше 40 лет. Проведена оценка величины фитомассы и депонирования углерода лиственницей сибирской в районе исследований, в том числе по возрастным поколениям.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость полученных результатов состоит: в разработке методики, позволяющей получить данные о пространственно-временной динамике лиственницы сибирской вблизи верхнего предела ее произрастания на основе оценки вероятности принадлежности конкретного экземпляра лиственницы сибирской к возрастному поколению; разработке модели взаимосвязи биометрических параметров лиственницы сибирской, открывающей возможности для оценки фитомассы и величины углерода в каждом экземпляре лиственницы на основе результатов дешифрирования данных сверхвысокого пространственного разрешения, полученных с использованием беспилотных авиационных систем; возможности использования разработанного методологического подхода к организации и

проведению исследований древесной растительности вблизи верхнего предела ее произрастания в других горных системах.

Практическая значимость полученных результатов состоит в возможности использования моделей и методик для целей экологического мониторинга и реализации лесоклиматических проектов на участках особо охраняемых природных территорий вблизи верхней границы древесной растительности на Полярном Урале.

Методология и методы исследования

В исследовании использован подход, позволяющий перейти от прямых измерений биометрических параметров лиственницы сибирской на пробных площадях, к индивидуальной количественной оценке ряда параметров каждого экземпляра лиственницы сибирской в районе исследований на основе результатов обработки данных дистанционного зондирования сверхвысокого пространственного разрешения. Также в работе предложен подход и разработана методика, позволяющая оценивать вероятность отнесения дерева к одному из трех возрастных интервалов по величине радиуса кроны лиственницы сибирской. Также в работе предложен подход и разработана методика, позволяющая оценивать вероятность отнесения дерева к одному из трех возрастных интервалов по величине радиуса кроны лиственницы сибирской.

Методологический подход к оценке фитомассы и величины депонирования углерода состоит в использовании уравнения расчета величины диаметра ствола у шейки корня (входного параметра в уравнениях расчета надземной и подземной фитомассы лиственницы) по величине радиуса максимальной горизонтальной проекции кроны дерева. Полученные значения диаметра использованы для оценки фитомассы всех экземпляров лиственницы на исследуемой территории, в том числе и по возрастным поколениям.

Положения, выносимые на защиту

1. Оценка значения диаметра ствола в коре у шейки корня лиственницы сибирской, произрастающей вблизи верхнего предела произрастания древесной растительности на Полярном Урале, возможна по величине радиуса максимальной

горизонтальной проекции кроны с использованием нелинейной регрессионной модели с высоким уровнем качественной и количественной адекватности.

2. Определение поколений лиственницы сибирской в возрастных интервалах 1 – 10, 11 – 40 и старше 40 лет возможна с использованием статистического анализа плотности вероятности распределения значений радиуса максимальной горизонтальной проекции крон лиственницы сибирской.

3. Картограмма пространственного распределения деревьев и подростов лиственницы сибирской в экотоне верхней границы древесной растительности в районе исследований на Полярном Урале на основе дешифрирования их крон обеспечивает наглядное представление о горизонтальной пространственной структуре популяции лиственницы, позволяет выявить закономерности современной динамики лесообразовательного процесса и провести анализ запаса углерода в лиственничных древостоях.

4. Оценка величины депонирования углерода лиственницей сибирской в экотоне верхней границы древесной растительности на Полярном Урале возможна на основе разработанной методики количественной оценки фитомассы и запаса углерода для отдельных экземпляров лиственницы и всех их совокупности, основанной на комбинации нелинейной регрессионной модели зависимости диаметра ствола у шейки корня от радиуса кроны, аллометрических моделей количественной оценки надземной и подземной фитомассы по величине диаметра ствола у шейки корня и результатов дешифрирования крон лиственницы сибирской на снимках сверхвысокого пространственного разрешения.

5. Количественная оценка вклада возрастных поколений лиственницы сибирской в общий запас углерода позволяет установить вклад каждой возрастной группы в общий запас углерода лиственничных древостоев вблизи верхнего предела произрастания древесной растительности.

Содержание диссертации соответствует пунктам паспорта научной специальности 4.1.6 «Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация»:

42. Моделирование и прогноз динамики лесного фонда.

43. Моделирование поглощения, накопления, запаса и бюджета углерода в лесных экосистемах разного иерархического уровня.

44. Теория и методы мониторинга и выявления таксационных характеристик насаждений средствами дистанционного зондирования Земли с применением ГИС-технологий.

Апробация результатов работы

Основные положения диссертации выносились на обсуждение и докладывались на VIII Всероссийской конференции с международным участием «Экобиотех-2025» (Уфа, 2025); International Conference «Renewable resources: forest biomass processing technologies, chemistry, medicine» (St. Petersburg, 2025); Всероссийской научной конференции (с международным участием) аспирантов и обучающихся «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» (Донецк, 2024); Всероссийской научно-методической конференции «Стратегия методологического обеспечения коренного улучшения качества подготовки и использования специалистов лесного профиля» (Йошкар-Ола, 2024); Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием, посвященной 70-летию Почетного работника высшего образования, Заслуженного лесоведа России Залесова Сергея Вениаминовича «Оптимизация лесопользования» (Екатеринбург, 2023); Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) «Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) AS'2022» (Новокузнецк, 2022); XVIII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России» (Екатеринбург, 2022); XII Международной научно-технической конференции «Лесная наука в реализации концепции уральской инженерной школы: социально-экономические и экологические проблемы лесного сектора экономики» (Екатеринбург, 2019).

Личный вклад автора

Автор осуществлял непосредственное участие в постановке цели и задач научного исследования, разработке методологического подхода и методик, в соответствии с которыми проведено исследование, проведении наземных измерений

биометрических характеристик экземпляров лиственницы сибирской на пробных площадях, проведении аэрофотосъемки района исследований при помощи беспилотного летательного аппарата и дешифрировании крон всех экземпляров лиственницы сибирской в районе исследований. На основе полученных материалов были подготовлены научные публикации. Автором лично написана диссертация и автореферат.

Публикации по теме научного исследования

Основные материалы по теме научного исследования опубликованы в 14 печатных изданиях, в том числе 3 работы в журналах, рекомендуемых ВАК РФ и журналах, входящих в международные базы данных Web of Science и (или) Scopus.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на страницах машинописного текста и включает в себя введение, четыре главы, заключение, список сокращений и условных обозначений, библиографический список и одно приложение. Библиографическое описание включает в себя 294 источника, в том числе 41 на иностранных языках. Текст диссертации изложен на 123 страницах, включает 14 рисунков и 3 таблицы.

Работа выполнена на кафедре экологии и природопользования Уральского государственного лесотехнического университета в ходе выполнения следующих научно-исследовательских проектов: FUEG-2023-0002 «Естественно-научные и технологические аспекты рационального использования, прогнозирования и управления лесными ресурсами на основе генетического подхода к классификации типов леса в условиях современного изменения климата и антропогенных воздействий»; РНФ 24-24-00235 «Пространственно-временная динамика популяции лиственницы сибирской в экотоне верхней границы древесной растительности на Полярном Урале в условиях изменения климата».

Благодарности. Автор выражает благодарность Михайлович Анне Павловне за помощь в закладке пробных площадей и проведении наземных измерений биометрических характеристик экземпляров лиственницы, консультации, а также советы по методологическим и методическим аспектам работы; Голикову

Дмитрию Юрьевичу и Рогачеву Владимиру Евгеньевичу – за помощь в закладке пробных площадей и сборе данных.

Глава 1. Современное состояние исследований в области климатогенной пространственно-временной динамики древесной растительности вблизи верхнего предела ее произрастания с использованием данных дистанционного зондирования

Исследование климата и прогнозирование изменений в климатической системе Земли, изучение реакции биоты на эти изменения, оценка возможных позитивных и негативных последствий для природы и человека – актуальные вопросы, стоящие перед современной наукой. Прямые инструментальные измерения климатических параметров позволяют получить общее представление о происходящих изменениях климата на территории России на протяжении последних 300 лет (Не требовать от Бога ..., 2026), для оценки изменения климата ранее 1722 г. используются другие подходы и методы. Они связаны с анализом древесно-кольцевых хронологий, кернов льда, кораллов и донных отложений (re3data.org, 2026).

Лесные экосистемы являются одним из ключевых элементов биосферы, которые играют важную роль в обеспечении ее устойчивости, в том числе в условиях изменяющегося климата (Демаков, 2000). Результаты исследований древесной растительности, произрастающей вблизи верхнего предела ее произрастания в разных регионах Земли (Kullman, 2002; Shiyatov et al., 2005; Camarero et al., 2006; Kharuk et al., 2010; Dufour-Tremblay et al., 2012; Chiu et al., 2014; Mamet et al., 2018; Grigor'ev et al., 2019; Moiseev et al., 2019), свидетельствуют об общей тенденции экспансии древесных растений вверх, в горы.

В последние десятилетия при изучении древесной растительности вблизи верхнего предела ее произрастания кроме традиционных выборочных методов наблюдений на пробных площадях или высотных профилях активно применяются новые методы и технологии сбора, обработки и интеграции данных. В частности, геоинформационные технологии, технологии получения данных с использованием искусственных спутников Земли и беспилотных авиационных систем, а также методы анализа, моделирования и представления данных с использованием специа-

лизированных языков программирования и информационных систем, включая системы искусственного интеллекта.

История развития аэрофотосъемки как источника информации о земной поверхности берет свое начало с экспериментальных исследований французских воздухоплателей середины XIX в. Первые попытки подъема камеры в небо принадлежат французскому физику Жозефу Нисефору Ньепсу. Он попытался создать устройство для фиксации изображений ландшафта. Однако техническая сложность изготовления фотоаппаратов, их громоздкость и невозможность стабилизировать положение в пространстве приводили к снижению качества полученных фотоизображений (Harding, 2013).

Одним из самых известных исследователей в области аэрофотосъемки в XIX в. является фотограф и воздухоплатель Гаспар-Феликс Турнашен, также известный под именем Надар. Он впервые запатентовал способ аэрофотосъемки. К настоящему времени сохранился лишь один снимок 1858 г. – вид Парижа. Данный снимок хранится в музее Мармоттан-Моне (Цай, Пименова, 2022; Ценч, Захарова, 2023).

После успешных попыток Надара многие исследователи обратили внимание на перспективность аэрофотосъемки для получения данных о земной поверхности. Достойных результатов достиг американский фотограф Джеймс Уоллес Блэк в 1860 г., сделав серию съемок Бостона с воздушного шара. Данные изображения подтвердили возможность получения уникальных сведений о городской инфраструктуре и природных объектах с воздуха, которые недоступны при использовании наземных методов (Encyclopedia ..., 2008).

В дореволюционной России первое практическое применение аэрофотосъемки для научных целей связано с поручиком Александром Матвеевичем Кованенко в 1886 г. Он сделал съемку устья Невы с разных высот (800, 1200 и 1350 м). Впоследствии подобные работы выполняли военнослужащие в рамках задач, поставленных военным командованием (Кусов, 1992; Бычкова, 2010).

Альтернативным методом получения снимков с высоты стало использование воздушных змеев. Одним из ранних экспериментов с этой платформой провел английский метеоролог Дуглас Арчибальд в 1882 г., установив камеру на огромного

змея и управляя им дистанционно с помощью троса (Захарова, 2024). Позже французский фотограф Артур Батут в 1888 г. в городе Лабрюгье получил фотографию собственного дома, используя автоматическую систему срабатывания затвора (Фомичев, 2023).

Среди российских изобретателей можно выделить инженера Сергея Сергеевича Неждановского с конструкцией «змей-планер», обладающей устойчивой платформой, с помощью которой в 1899 г. была проведена аэро съемка Москвы. В этот же период русским инженером Ричардом Юльевичем Тилем был представлен панаромограф в виде специальной установки для воздушных шаров и змеев, позволяющей захватывать большие участки пространства за одно экспонирование (Салемгараева, 2016).

Параллельно развитию аэро съемки с воздушных шаров и змеев были сделаны попытки расширения возможностей получения фотоизображений при помощи голубей. Основная идея этого метода состояла в том, что голуби могут взлетать выше воздушных змеев и без больших трудозатрат перемещаться на относительно большие расстояния от точки взлета. В 1903 г. немецкий аптекарь Юлиус Густав Нойброннер провел эксперимент с голубями. Одним из выявленных недостатков такого способа получения снимков оказалась невозможность регулировки фокуса фотоаппарата при маховых движениях крыльев птиц. Это приводило к тому, что снимки получались смазанными (Буянов и др., 2022).

Позднее по аэрофотоснимкам стали создавать топографические планы и карты. Первая топографическая карта с их помощью была составлена в 1891 г. российским инженером Н. Ф. Вилером.

В царской России с 1890-х гг. был введен своеобразный вид спорта по аэрофотосъемке, в котором принимали участие фотографы-любители. В 1902 г. были разработаны и проведены первые курсы по фотограмметрии подполковником Василием Федоровичем Найденовым в Санкт-Петербургской Военно-инженерной академии. В дальнейшем он становится автором монографии «Измерительная фотография и ее применение в воздухоплавании». С этой работой связывают зарождение основ аэрофотограмметрии в нашей стране (Келль, 1960).

В начале XX в. активно развивается авиационная промышленность. В 1909 г. Уилбуром Райтом сделана первая фотография с борта самолета. В нашей стране с 1918 г. аэрофотосъемка в целях картографии стала применяться в Военно-топографическом управлении, а с 1924 г. начал свою работу первый центр аэрофоторабот в СССР «Добролет» (Замшин, 2014), открывший период интенсивных научных изысканий в следующих направлениях: использование аэросъемочных работ в области геологии, землеустройства, лесоустройства (Райзер, 1963). Активное развитие аэрофотосъемки происходило во время Первой мировой войны (Ибрагимова, 2006; Грановитов и др., 2022).

Ранние попытки внедрения дистанционных методов для оценки лесных ресурсов относятся к первой половине XX в. В 1920-е годы в СССР активно ведутся работы по применению аэрофотосъемки для целей лесоустройства и таксации лесов (Сучков, 2022) для повышения точности учета лесных ресурсов, своевременного и оперативного принятия решений при ведении лесного хозяйства.

К концу 1930 г. применение аэрометодов укрепилось в практике лесного хозяйства. Они активно используются при инвентаризации лесных ресурсов, для охраны лесов от пожаров, обнаружения очагов заболеваний и вредителей, а также при проектировании лесных дорог. В этот же год создается подразделение Главного управления геодезии и картографии (ГУГК) для осуществления аэрофотосъемочных исследований и работ (Виноградов, 1984).

После Великой отечественной войны с появлением первых искусственных спутников Земли начинается этап качественных изменений в развитии дистанционного зондирования (Севко, 2005). В 1960–1970-е гг. формируются основы использования данных дистанционного зондирования, полученных при помощи спутников, развиваются специализированные методы обработки и анализа данных, разрабатываются базовые концепции и алгоритмы обработки информации применительно к лесным ресурсам для оценки структуры и состава насаждений, отслеживания процессов деградации и восстановления лесных массивов, анализа антропогенной нагрузки, наблюдения за климатическими изменениями (Kuzmenko, Kondrashin, 2019). К особенностям этого периода можно отнести создание различных классификационных схем на основе спектральных признаков спутниковых снимков

и разработку программного обеспечения для автоматической интерпретации изображений (Король, 2024). В лесной практике новые технологии позволили перейти к точечным измерениям, получению больших массивов данных, в том числе с целью оценки состояния территорий (Сушкевич, 2014; Шумовская, 2021).

С 1974 г. спутниковые снимки стали постепенно поступать в общее пользование для решения задач народного хозяйства СССР. При этом данные для некоторых северных районов СССР и в дальнейшем современной России до 2005 г. имели высокий уровень секретности, и чтобы воспользоваться ими, требовалось получение специального разрешения (Стыщенко, 2018; Другаков, 2019).

С 1980-х гг. с введением новых поколений спутников и сенсоров расширяются возможности по получению данных о земной поверхности, позволяющих строить трехмерные изображения, изучать плотность растительного покрова и высоту древесной растительности (Горный, Тронин, 2012; Сутырина, 2013).

С 90-х годов XX века для широкого круга пользователей становятся доступными данные, полученные при помощи американских спутников серии Landsat (Курбанов и др., 2014; Landsat..., 2025) и российские аппараты серии «Ресурс», позволившие получать данные с высоким временным разрешением для больших по площади территорий.

В рамках развития космических технологий развивались способы и методы обработки спутниковых данных: разрабатываются специализированные математические модели, инструменты визуализации и анализа с использованием компьютерных систем (Антропов, 2024). С увеличением количества космических аппаратов, используемых для получения данных дистанционного зондирования, наблюдается тенденция в удешевлении ДДЗ.

В начале XXI в. с развитием Интернет-технологий спутниковые снимки, охватывающие всю земную поверхность, становятся доступными пользователям сети Интернет при помощи картографических сервисов, таких как maps.google.com, Google Earth, bing.com, maps.yandex.ru. Развитие мобильных технологий открыло возможности для получения ДДЗ на мобильные устройства определению его местоположения в пространстве с использованием сигналов

спутников глобальных навигационных систем GPS и ГЛОНАСС. (Масталиева, 2019).

Помимо использования комических спутников широкое применение в дистанционном зондировании в 2010–2020-х гг. получили беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Известно, что теоретическая возможность их создания была рассмотрена итальянским ученым и художником Леонардо да Винчи, который создал эскизы проектов летательных аппаратов. В дальнейшем нереализованные наброски его проектов были использованы для создания различных механизмов без непосредственного присутствия человека на борту (Вытовтов, 2016; Кирюхин, 2023; Плеханов и др., 2023; Золатарев, Санеев, 2024; Лилиева, 2024).

Кроме собственно технологий создания и управления БПЛА, необходимо отметить, что им предшествовали разработки, которые внесли вклад в развитие науки и инженерии, прямо и косвенно способствовавшие созданию беспилотных технологий. Немецкий ученый Отто Лилиенталь в конце XIX в. реализовал ряд проектов в области конструирования планеров и методов управления летательными аппаратами тяжелее воздуха (Петушкова, Потопова, 2018; Резняев, Лагошина, 2023). Значимый шаг в создании дистанционного управления аппаратами осуществил Никола Тесла в 1899 г., представив публике радиоуправляемую модель корабля (Буянов и др., 2022).

Одним из прорывов в создании беспилотных летательных аппаратов произошел в начале XX в., когда американский военный инженер Чарльз Кеттеринг в 1910 г. презентовал концепцию беспилотного самолета The Kettering Bug. Он предложил беспилотный летательный аппарат – летающую бомбу. Суть концепции заключалась в сбросе крыльев у самолета и падении его на цель по отсечке механического таймера (Павлов, Данилова, 2024). Данная разработка подтолкнула ученых и инженеров использовать беспилотные аппараты для военных целей (Кузнецов, 2009).

Вторым значимым событием в области разработки беспилотных летательных аппаратов для военных целей стало создание беспилотного летательного аппарата – радиоуправляемого самолета Aerial Target в 1916 г., разработанного бри-

танским инженером-конструктором Арчибальдом Лоу (Герова, Максютенко, 2024).

В Германии с 1930-х гг. создание беспилотных самолетов переходит из области исследований и разработок в серийные промышленные изделия. Параллельно этому развивается концепция радиоуправляемых подводных лодок и кораблей (Васильев, Наумова, 2023). В течение Второй мировой войны были проведены исследования и разработки, которые привели к созданию немецкого самолет-снаряда Фау-1 и советского самолет-снаряда Х10, запускаемого с самолета Пе-8 (Коломейцев, 2020).

Период холодной войны ознаменовался расцветом развития беспилотных летательных аппаратов. В этот период были созданы разведывательные БПЛА с установленной на них аппаратурой для ведения фото- и видеозаписи. В Советском Союзе появляются боевые БПЛА: Ту-123 «Ястреб»; Ту-141 «Стриж», Ту-143 «Рейс», Ту-300 «Коршун-У» (Игнатъев, Любимов, 2024; Карамергенов и др., 2025).

Широкое распространение гражданских беспилотных летательных аппаратов началось в XXI в., разработка и конструирование которых ведется многими государственными и частными компаниями (Ивасенко, Чуба, 2021).

Современные БПЛА стремительно проникают в различные сферы деятельности: воздушная разведка, сельскохозяйственный мониторинг, доставка товаров, контроль сельскохозяйственной и лесной техники, сопровождение строительства, наблюдение за ирригационными системами, контроль выпаса скота, создание высокоточных ортофотопланов и векторных карт, разведка районов чрезвычайных ситуаций, проведение инвентаризации и многое другое (Воробьева, 2012; Сташкевич и др., 2019; Акифьева и др., 2023; Козлов и др., 2023; Дейберт, Сагитов, 2024; Борозда, Глабец, 2025).

Развитие аппаратной базы, позволяющей получать данные дистанционного зондирования совершенствовались методы их обработки и анализа, позволяющие дешифровать объекты на земной поверхности, в том числе для решения задач, связанных с оценкой лесных ресурсов. Первые шаги в этом направлении были

предприняты в XIX в. с получением первых фотографий. Наиболее активно дешифрованием аэроснимков занимались военные, которые использовали фотоизображения для слежения за перемещением войск противника, а также принятия стратегических решений (Дедкова, 2015). Известно, что во время гражданской войны в США фотоснимки получали с воздушных шаров для мониторинга передвижения солдат противника и поставок припасов (Петрякова, 2025). Также активно аэрофотоснимки, полученные с аэропланов и дирижаблей, использовали в ходе Первой мировой войны. Достаточно высокое качество снимков и накопленный опыт их дешифрирования открыли возможности для использования данного способа распознавания объектов не только в военном деле, но и в гражданских областях, таких как картография, сельское хозяйство и геология (Овчинникова, Примакова, 2025). Изначально дешифрирование проводили визуально при помощи оператора. Специалисты вручную определяли интересующие объекты и их признаки: цвет, текстуру, форму, размер (Аванесов, Селиванов, 2010).

В период после Первой мировой войны закладываются первые основы применения авиации в народном хозяйстве. Как было написано выше первые опыты по применению авиации для таксации лесов в первой половине XX века – в Подмосковье в 1922 г. С 1925 г. аэрофотосъемка становится неотъемлемой частью учета и картирования лесов. В 1930-х гг. ведутся разработки аэровизуальных методов обследования лесов. После освоения аэрофотосъемки в мелком масштабе создается более точный аэротаксационный метод, который заключался в сочетании аэровизуальных методов таксации с данными аэроснимков (Самойлович, 1964; Арцыбашев, 1977; Дворяшин, 1978; Лесная энциклопедия, 1985; Горяйнов, 2006).

В 1940-е г. несмотря на войну, авиационная охрана лесов не прекращалась. В 1947 г. впервые проводят лесопатологическое обследование и фенологические наблюдения с использованием данных лесоустроительных материалов, в свою очередь которые были получены с использованием аэроснимков (Лесная энциклопедия, 1985). С 1948 г. аэровизуальное обследование заменяется аэротаксацией. В период с 1948 по 1956 гг. малоизученные леса СССР были обследованы методами

аэротаксации, по результатам которой была создана первая карта лесов СССР (Цветков, 1957).

К 1950-м гг. государственная топографическая съемка СССР с использованием данных дистанционного зондирования в масштабе 1:100 000 была полностью завершена. В этот же период стартовали работы по созданию карт более крупного масштаба – 1:25 000, которые продолжались вплоть до 1985 г. (Национальный атлас России, 2007).

Качественное изменение в распознавании и интерпретации данных дистанционного зондирования произошло в 1960-х гг. с началом развития космической эры. Первый искусственный спутник был запущен в 1957 г. СССР (Площадная, Быкова, 2025), с этого момента анализ информации, полученных при помощи космических спутников активно используется в области мониторинга погоды и исследовании природных ресурсов, а также для решения задач в области экологии (Чикунов, Куцова, 2021).

В период 1960–1980 гг. активно развивается отраслевое тематическое картирование: геологическое, почвенное, геоботаническое, лесное (Шихов и др., 2020). Создаются серии специализированных карт для всей территории СССР. А. Г. Исаченко в своей работе подробно освещает методы составления геологических, почвенных и геоботанических карт, включая исторические справки о развитии каждого из направлений в СССР (Исаченко, 1960). В тот период активно развиваются методы ландшафтного картирования, отличительной особенностью которых является изучение географических или природных территориальных комплексов (Исаченко, 1961).

Период с 1879 по 1990 гг. можно охарактеризовать как период доминирования традиционных технологий, при помощи которых проводилась наземная съемка территорий и фотограмметрическая обработка материалов, за которой следовала ручная работа по рукописи, редактированию, генерализации и оформлению. Готовые карты получали при помощи литографической печати (позже – цифровыми средствами вывода). Внедрение геоинформационных систем (ГИС) позволило создавать цифровые геоинформационные базы данных (Usery et al., 2019).

В начале XXI в. наблюдается интенсивный рост применения методов обработки информации, полученной в результате дистанционного зондирования земной поверхности с использованием космических спутников и беспилотных летательных аппаратов, с использованием математико-статистических моделей, включая модели машинного обучения (Насуро, 2007; Хацкевич, 2019; Клейменкин, 2021).

Развитие компьютерных технологий способствовало обработке больших объемов данных дистанционного зондирования и разработке специализированного программного обеспечения для автоматизации этапов их обработки и анализа (Редин и др., 2020), которые основаны на спектральных и текстурных характеристиках снимков. В области оптимизации процессов дешифрирования введены этапы по предварительной, первичной вторичной обработке информации, выявлению прямых и косвенных признаков объектов дешифрирования (Дешифрирование ..., 2025). Большие успехи также достигнуты в области автоматизированного и автоматического распознавания объектов и структур на изображениях (Баенова и др., 2025).

В нашей стране в рамках стандартизации методик обработки и анализа данных дистанционного зондирования разработаны ряд государственных стандартов. В области данных дистанционного зондирования Земли из космоса разработаны и в настоящее время действуют государственные стандарты, которые регламентируют: типы ДДЗ (ГОСТ Р 59079–2020), продукты обработки данных (ГОСТ Р 59080–2020), включая базовые (ГОСТ Р 59081–2020), тематические (ГОСТ Р 59082–2020), сервисы и услуги, предоставляемые потребителю (ГОСТ Р 59083–2020, ГОСТ Р 59084–2020), требования к структуре и содержанию ДДЗ в радиолокационном (ГОСТ Р 59085–2020), видимом и ближнем инфракрасном диапазонах (ГОСТ Р 59086–2020), систему классификации уровней обработки данных и требования к операциям на каждом уровне (ГОСТ Р 59480–2021), порядок разработки и распространения программного обеспечения (ГОСТ Р 70032–2022).

В области обработки данных, полученных при помощи БПЛА, в настоящий момент действуют стандарты, которые косвенно могут относиться к обработке

ДДЗ: ГОСТ Р 57258–2016 «Системы беспилотные авиационные. Термины и определения», ГОСТ Р 70078–2022 «Программно-аппаратный комплекс аэрофотографической съемки с использованием беспилотного воздушного судна. Технические требования».

В последние годы в области обработки и анализа ДДЗ активно используются системы искусственного интеллекта (ИИ), основанные на методах машинного обучения. Они позволяют повысить эффективность и скорость анализа большого объема данных (Блануца, 2025; Дешифрирование ..., 2025). При этом необходимо отметить, что несмотря на большие успехи в области автоматизации этапов обработки и анализа изображений ручное дешифрирование объектов и структур на изображениях остается актуальным. Комплексный подход, который заключается в сочетании разных подходов (визуальных, инструментальных, автоматизированных) к дешифрированию данных, достигая тем самым высоких и максимально полных результатов (Попов, 2025).

Широкое применение методов дешифрирования данных ДЗЗ нашло в мониторинге окружающей среды, контроле и управлении природными ресурсами, строительстве и архитектуре, транспорте и дорожном хозяйстве, безопасности и обороне (Левкин, 2007; Усова, 2012; Копенков, 2017, Афанасьев, Корякина 2023).

Анализ публикационной активности в последние годы свидетельствует о кратном возрастании количества публикаций, посвященных вопросам использования БПЛА для мониторинга состояния лесов. С. Экке с соавторами провели систематический анализ 99 статей, охватывающих последние десять лет исследований, связанных с мониторингом лесов под влиянием биотических и абиотических факторов, с помощью беспилотных летательных аппаратов (Ecke et al., 2022).

Анализ использования сенсоров свидетельствует о том, что при проведении исследований преобладают RGB- и мультиспектральные камеры, а также их комбинированное использование. При проведении фотограмметрической обработки данных наиболее часто исследовали использовали Agisoft Metashape (Agisoft LLC, Санкт-Петербург, Россия) и Pix4D (Pix4D S.A., Лозанна, Швейцария).

При проведении мониторинга лесов при помощи анализа изображений ши-

роко используются спектральные индексы, формулы расчета которых могут быть различными и зависеть от количества и ширины спектральных каналов и их положения в спектре, т. е. зависят от конкретной съемочной аппаратуры. Например, мультиспектральная камера MicaSense RedEdge-MX позволяет регистрировать излучение в следующих диапазонах длин волн (нм): 1) BLUE: 475 ± 32 ; 2) GREEN: 560 ± 27 ; 3) RED: 668 ± 14 ; 4) RED EDGE: 717 ± 12 ; 5) NIR (Near-infrared): 842 ± 12 . На основе регистрируемых этим датчиком данных возможен расчет следующих индексов:

- 1) Red–green index (RGI) Simple = ρ_{red}/ρ_{green} ;
- 2) Simple ratio (SR) = ρ_{NIR}/ρ_{red} ;
- 3) Normalized difference vegetation index (NDVI) = $(\rho_{NIR} - \rho_{red})/(\rho_{NIR} + \rho_{red})$;
- 4) Normalized difference red edge (NDRE) index = $(\rho_{NIR} - \rho_{rededge})/(\rho_{NIR} + \rho_{rededge})$;
- 5) Green leaf index (GLI) = $(\rho_{NIR} - \rho_{red})/(\rho_{NIR} + \rho_{red})/2 \times \rho_{green} + \rho_{red} + \rho_{blue}$;
- 6) Excess green (ExG) index = $2 \times \rho_{green} - \rho_{red} - \rho_{blue}$;
- 7) Red–blue index (RBI) = ρ_{red}/ρ_{blue} ;
- 8) Mean red–green–blue (meanRGB) index = $(\rho_{red} + \rho_{green} + \rho_{blue})/3$ (Shrestha et al., 2024).

Расчет вегетационных индексов возможен также при использовании RGB-камер (Федоров и др., 2024).

В анализе изображений также широко используются текстурные характеристики. В настоящее время наиболее часто используемый метод выделения четырех текстурных признаков на изображениях: контраст (contrast – CON), корреляция (correlation – COR, энтропия (entropy – EN) и однородность (homogeneity – HO). Исследователи отмечают, что модель глубокого машинного обучения (deep learning – DL) также демонстрирует отличную производительность при выделении признаков текстуры (Zhu et al., 2024). Эти модели могут автоматически распознавать сложные признаки текстуры, поэтому они широко используются в области обнаружения вредителей сельскохозяйственных культур. При применении моделей глубокого обучения требуется большой объем выборочных данных, что также

становится проблемой при извлечении текстурных объектов.

Примерно в 44 % рассмотренных С. Экке с соавторами (Ecke et al., 2022) статей были реализованы специальные алгоритмы для автоматического определения дерева и сегментации изображений перед выполнением задач классификации. Для решения этих задач исследователи использовали следующее коммерческое программное обеспечение, такое как eCognition Developer (Trimble Geospatial, Вестминстер, Колорадо, США), MATLAB (MathWorks, Массачусетс, США) и ENVI (Harris Geospatial Solutions, Боулдер, Колорадо, США), а также решения с открытым исходным кодом, а именно R (с использованием пакетов lidR, itcSegment, rLiDAR и ForestTools), Orfeo toolbox и Python (с использованием scikit-image package) для этих задач.

Алгоритмы обнаружения деревьев в основном были представлены фильтрацией локальных максимумов и реже бинаризацией изображений. Для сегментации кроны обычно использовались рост региона (region growing) и «сегментация водораздела» (watershed segmentation). Ряд статей посвящены сравнительному анализу различных алгоритмов сегментации. Важно отметить, что распознавание видов деревьев иногда (17 публикаций) было частью анализа или даже фокусом исследования.

Более чем в половине статей (50) для классификации состояния отдельных деревьев авторы применяли методы машинного обучения. В большинстве других публикаций авторы проводили регрессионный анализ. Только в трех статьях исследователи применили физически обоснованные модели переноса излучения. Непараметрические подходы к анализу данных представляли собой наиболее часто используемые методы с использованием деревьев решений и связанного с ними классификатора Random Forest (RF), метода опорных векторов (SVM) и k-ближайших соседей (k-NN).

Подходы с использованием параметрических методов были представлены классификатором максимального правдоподобия (MLC) и моделями логистической регрессии. Авторы публикации отмечают, что с 2018 г. исследователи все чаще используют архитектуры глубокого обучения, основанные на искусственных нейронных сетях (ANN), в основном представленных сверточными нейронными сетями

(CNN) даже чаще, чем популярный классификатор RF. Другими архитектурами, связанными с ANN, были многослойные перцептроны и автоенкодеры (autoencoders).

Несмотря на многочисленные достоинства беспилотных летательных аппаратов, такие как их гибкость, относительно низкая стоимость и возможность летать ниже облачного покрова, авторы выявили ряд недостатков:

- масштабы долгосрочного мониторинга лесов с использованием БПЛА явно недостаточны;
- необходимо существенно расширить использование гиперспектральных и лидарных датчиков;
- дополнительные данные из других источников ДДЗ используются недостаточно полно;
- отсутствие стандартизированных рабочих процессов создает проблему для обеспечения единообразия данных;
- сложные алгоритмы машинного обучения затрудняют интерпретацию получаемых результатов анализа ДДЗ и препятствуют широкому их внедрению в практику;
- процесс обработки данных от сбора до окончательного анализа часто опирается на коммерческое программное обеспечение в ущерб инструментам с открытым исходным кодом.

Попеску с соавторами (Popescu et. al., 2023) провели анализ 23 архитектур сверточных нейронных сетей и свели их в таблицу, которая содержит информацию о конфигурации нейронной сети, ее функции (классификация или обнаружение), параметрах, характеризующих успешность решения задачи. Авторы свели в таблицу ссылки на публикации с результатами использования нейросетей, формулы для расчета показателей точности: точность (Accuracy – ACC); точность – (Precision – PRE); Балл F1 (F1 Score); средняя точность (Mean Average Precision – mAP).

Авторы также привели результаты анализа использования исследователями программного обеспечения. Они выделили ШЕСТЬ наиболее широко используемых программных продуктов:

1) PyTorch – фреймворк для проведения машинного обучения, в основе которого лежит язык программирования Python и библиотека Torch library (URL: <https://pytorch.org/>);

2) TensorFlow – комплексная платформа машинного обучения с открытым исходным кодом (URL: <https://www.tensorflow.org/>);

3) Keras – высокоуровневая, модульная и гибкая библиотека нейронных сетей с открытым исходным кодом и API на основе языка программирования Python, включает фреймфорки, в частности TensorFlow (URL: <https://keras.io/>);

4) Imagga Cloud API – сервис и API для распознавания изображений (URL: <https://imagga.com/>);

5) Fastai – библиотека для глубокого машинного обучения, созданная поверх PyTorch (URL: <https://www.fast.ai/>);

6) MathWorks Matlab – программная платформа для численного моделирования, предназначенная для инженеров и ученых (URL: <https://www.mathworks.com/-products/matlab.html>).

Необходимо отметить, что мультисетевые системы являются новой тенденцией в мониторинге состояния растительности. Использование ансамблей нейронных сетей и инновационных модифицированных архитектур может повысить точность обнаружения вредителей. Ансамбль сверточных нейронных сетей (CNN) – это смесь нескольких моделей CNN, позволяющая получить более сильную и точную модель прогнозирования. Цель ансамбля – использовать сильные стороны многих моделей для компенсации недостатков другой модели. Окончательное решение для ансамбля CNN выводится с помощью объединения прогнозов отдельных моделей CNN, часто большинством голосов или путем взвешенного усреднения. Разнообразие моделей в совокупности уменьшает проблему переобучения, что приводит к повышению точности прогноза.

Используя несколько моделей с разными сильными и слабыми сторонами, ансамбль может быть более устойчивым к изменениям освещения, фона или другим факторам, которые могут повлиять на внешний вид насекомых на изображениях. Наиболее популярными и применяемыми в случае обнаружения и иденти-

фикации вредителей являются ансамбли с голосованием по большинству голосов, средневзвешенные ансамбли и мультисетевые ансамбли, использующие различные магистрали (backbones). На основе анализа публикаций авторы выделили 15 ансамблей моделей нейронных сетей.

Рассмотренные выше современные методы получения, обработки и анализа данных о земной поверхности позволяют исследовать древесную растительность вблизи верхнего предела ее произрастания на разных пространственных и временных масштабах (Чжан-Энь-Хын и др., 2023).

Одним из первых исследователей верхней границы леса принято считать немецкого натуралиста Александра фон Гумбольда. В своих трудах он описал распределение растительности в зависимости от высоты местности, предложил концепцию зональности, согласно которой различные виды произрастают в определенных условиях (зонах) (Бобров, 2003). В этот же период немецкий ученый Иоганн Георг Гмелин, путешествуя по России, занимался описанием изменений лесных массивов в горах при движении к альпийским лугам, отмечая изменения растительных сообществ при изменении географических координат (Гмелин, 2014).

Владимир Васильевич Докучаев, предложив теорию почвообразования и установив зависимость типов почв от климатических условий, обратил внимание на связь высоты границы леса с географической широтой (Русакова, 2021). Ученик В. В. Докучаева Василий Васильевич Сапожников описал закономерности распространения леса в зависимости от географической широты и абсолютной высоты над уровнем моря на Алтае и центральных районах Тянь-Шаня (Сочава, 1930; Сапожников, 2025). Он разработал первую классификацию типов верхней границы леса в зависимости от доминирующих характеристик почв и морфологии древесных растений (Поздняков, 2016).

Михаил Иванович Голицин исследовал влияния микроклиматических условий на растения, произрастающие вблизи верхнего предела произрастания древесной растительности на Кавказе. В своих исследованиях он показал, что температурные колебания условия местообитания определяют высоту распространения древесной растительности (Пасецкий, 1977).

Первые научные работы по верхней границе Прибайкалья относятся к XIX веку, в период исследований, проводимых ученым Петром Александровичем Кропоткиным, который описал признаки оледенения на Патомском нагорье (Кропоткин..., 1998).

Михаил Альбертович Ковальский, участвовавший в Североуральской экспедиции от Русского географического общества в середине XIX в., выяснил, что остатки погибших лесных насаждений располагаются выше существующей границы леса. Он выдвинул гипотезу о возможных колебаниях климата (Смирнов, 2023).

Изучение верхней границы леса приобрело систематический характер в XX в. Во второй половине XX века исследователи начали активно применять геоботанические, дендрохронологические и палеоботанические методы, а также разрабатывались подходы к картированию верхней границы древесной растительности (Шиятов, 1962, 1973; Горчаковский, Шиятов, 1977; Горчаковский, Шиятов, 1985; Большаков и др., 1994; Истомов, 2005; Мазепа, 2009; Михеева, 2011; Владимиров, 2014; Воронин и др., 2016; Большаков и др., 1994). Во второй половине XX – начале XXI вв. активно проводятся исследования по влиянию температуры, ветра и снега, почвенно-гидрологических условий на древесную растительность (Шиятов, 1969, 1970; Горчаковский, Шиятов, 1985).

В Уральском регионе, Алтайской горной системе, Северном Прибайкалье, Европейских Альпах, Сибири, Кавказе проводятся многолетние исследования древесной растительности вблизи верхнего предела ее произрастания в условиях значительно отличающихся по эдафическим и климатическим условиям, действию биотических факторов, антропогенным воздействием (Шиятов, 1984; Бартыш и др., 2006; Патрушева, Останин, 2010; Владимиров, 2014; Combaud et al., 2024; Самойленко, Лысенко, 2024).

На Алтае активно ведутся исследования Катунского хребта, на котором установлено смещение верхней границы леса вверх в горы. Исследователями установлено неравномерное изменение плотности подроста сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.).

Триггером, запустившим процесс экспансии древесной растительности в горную тундру, является региональное потепление климата. Установлено увеличение среднегодовой температуры воздуха в Горном Алтае на 1,4–1,7 °С.

Сдвиг растительных рубежей вверх в горы установлен на горном массиве Хибины (Назаров и др., 2012; Ротонова и др., 2012; Быков и др., 2014; Журавлева, 2014; Тайник и др., 2014; Громов и др., 2023; Савчук и др., 2023; Филимонова и др., 2023; Дзюба и др., 2024).

На Патомском нагорье в Прибайкалье установлен факт увеличения радиального прироста древесной растительности с 1980-х гг. (Кладько, Бенькова, 2018). Также в данном регионе проведены работы по изучению влияния северо-западных ветров (фены) на границу леса (Бурдуковский и др., 2016; Воронин и др., 2016; Сизых и др., 2019; Кочеткова, Баханова, 2020; Sizykh et al., 2020; Гребенюк, Матвеева, 2025).

На плато Путорана (Восточная Сибирь) также установлен факт вертикального и горизонтального смещения верхней границы древесной растительности в горы за последние 60 лет. Установлено изменение морфометрических показателей древостоев, таких как диаметр ствола у основания и на высоте 1,3 м, высота, возраст и диаметр кроны (Матвеев, Гупалов, 2015; Григорьев и др., 2019; Тимофеев и др., 2021; Вьюхин и др., 2024; Вьюхин и др., 2025).

Исследования, связанные с изучением верхней границы леса, ведутся на Кавказе (Нефедова, 2006, 2009; Нефедова и др., 2014; Акатова, 2023), северной границы леса – на полуострове Таймыр (Бенькова, 2012; Симанько, 2014; Фахрутдинова, 2017; Кокшаров и др., 2019), Западном Саяне (Кокшаров и др., 2019; Максимова и др., 2023; Пахарькова и др., 2024). На Кавказе верхняя граница леса демонстрирует четкую тенденцию к подъему. Это связывают с действием климатических факторов (исследователи отмечают повышение температуры и влажности). В горной части Таймыра установлено вертикальное смещение и увеличение плотности редколесий в тундре, без продвижения на север (Pospelova et al., 2017).

Одним из первых анализ прироста годовых колец для реконструкции климатических изменений на Урале начал использовать Борис Анатольевич Тихомиров.

В 1940 г. во время работы геоботанического отряда Уральской комплексной экспедиции Академии наук СССР были собраны 60 образцов модельных деревьев. Места проведения полевых изысканий на Урале включали горные вершины Северного Урала (Кваркуш, Поясовый, Денежкин, Конжаковский камень) и Южного Урала (Иремель, Яман-Тау) (Полозова, 2009). В ходе исследований были получены данные о текущих приростах по высоте и диаметру ели и лиственницы, а также было сделано заключение об изменении климата в сторону потепления (Тихомиров, 1941).

Флора Южного Урала привлекала внимание ученых с 1950-х гг., одним из основоположников изучения растительности стал Александр Александрович Цветаев, изложивший результаты своих исследований в физико-географическом очерке (Цветаев, 1960).

В 1960-е гг. главным научным направлением П. Л. Горчаковского стало изучение закономерностей вертикального и горизонтального положения растительного покрова. Многочисленные экспедиции в разные районы Урала, Предуралья и Зауралья способствовали разработке оригинальной научной концепции о высотной зональности на исследуемых территориях (Горчаковский, 2002, 2006 а, б).

Проведенные исследования на горе Сланцевой (Полярный Урал) показали, как меняется видовое разнообразие четырех групп организмов (сосудистые растения, мхи, лишайники афиллофоровые грибы). При подъеме от речной долины в тундру (от 80 до 310 м н.у.м.). Было выявлено пять высотных поясов, от сомкнутых лесов внизу до тундры на вершине горы. Высотный градиент не сказывался на разнообразии сосудистых растений и мхов, но способствовал увеличению разнообразия лишайников в тундре. Афиллофоровые грибы были наиболее разнообразны в сомкнутых лесах и криволесье, наименее – в тундре (Shiryayev et al., 2020).

Использование древесно-кольцевых хронологий для исследования динамики древесной растительности вблизи верхнего предела ее произрастания на Урале принадлежит Степану Григорьевичу Шиятову (Горчаковский, Шиятов, 1977, 1978, 1979).

С 1964 г. сотрудник лаборатории лесоведения Гавриил Егорович Комин воз-

главил работу по сбору образцов древесины различных зон Западной Сибири. С 1970-х гг. С. Г. Шиятов и Г. Е. Комин организовали группу из специалистов в области дендрохронологии в рамках лаборатории экологии растений и геоботаники (Большаков, 1994; Смирнов, 2005).

Исследования, проведенные под руководством Г. Е. Комина, позволили получить древесно-кольцевые хронологии 212 экземпляров деревьев, которые охватывали временной интервал с 1870 по 1963 гг. Он предложил новый метод расчета динамической нормы прироста на основании биологических кривых роста для совокупности деревьев одного вида разного возраста – метод «коридора» (Шиятов, 2006). В дальнейшем на основании результатов этих исследований была создана программа для автоматического расчета индексов прироста деревьев (Шиятов, 1980; Мазепа, 1982, 1986).

Группой исследователей под руководством С. Г. Шиятова были изучены особенности сезонного развития и формирования годичных колец основных лесобразующих видов Среднего Урала: ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.), сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), береза повислая (*Betula pendula* Roth.).

С. Г. Шиятовым получены древесно-кольцевые хронологии от 150 до 830 лет различных видов древесных растений высокогорных районов Урала, севера Западной Сибири, Среднего и Южного Урала (Мазепа, 1998; Шиятов и др., 2000). На Полярном Урале были собраны ископаемые остатки можжевельника сибирского (*Juniperus sibirica* Burgsd.) и лиственницы сибирской, позволившие построить хронологии в 850 лет и 1360 соответственно. Учениками С. Г. Шиятова – В. М. Горчевым и Л. И. Агафоновым – получены тысячелетние хронологии для древесных видов (лиственнице сибирской, ели сибирской, сосне обыкновенной, кедру сибирскому, можжевельнику сибирскому) в различных районах России (Шиятов, 2006).

В 1980-х гг. В. С. Мазепой разработаны полициклические модели роста древесной растительности в разрезе климатических изменений (Шиятов, 1986; Шия-

тов, Мазепа, 1986).

В конце XX в. на протяжении 15 лет Л. И. Агафонов, совместно с сотрудниками Института экологии растений и животных УрО РАН (<https://ipae.uran.ru/>), проводил работы по изучению влияния гидрологического режима на радиальные приросты деревьев, выявления закономерностей за продолжительные временные промежутки (Агафонов, 1995, 2007; Кукарских, Агафонов, 2007).

На Среднем Урале в конце 1980 – начале 1990 гг. Р. М. Хантемировым проведены исследования по содержанию химических элементов и радиоактивных изотопов в годичных кольцах сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и березы повислой (*Betula pendula* Roth.) для выявления качества окружающей среды, влияния на древесную растительность токсических веществами (Хантемиров, 1996; Хантемиров, Шиятов, 1999; Попов и др., 2011).

В 1970-х гг. С. Г. Шиятов и П. Л. Горчаковский использовали аэрофотосъемку совместно с топографическими картами для описания растительного покрова верхней границы леса (Горчаковский, Шиятов, 1970). Получены данные о неоднородности верхней границы леса на Северном Урале, т. к. она неоднородна по высоте, породному составу и форме крон. Были выявлены ряд лимитирующих условий среды, влияющих на местоположение верхней границы леса, в этот список вошли высота гор, крутизна склонов и их экспозиция, накопление снега в зимний период и ветровой режим.

В конце XX – начале XXI вв. одним из основных направлений исследований древесной растительности вблизи верхнего предела ее произрастания является количественная оценка пространственно-временной динамики растительных рубежей (Шиятов и др., 2005; Капралов и др., 2006; Капралов, 2007; Шиятов и др., 2007; Госьков и др., 2022; Fomin et al., 2022; Балакин и др., 2024; Нагимов и др., 2024; Михайлович и др., 2025; Нагимов и др., 2025).

Группой исследователей под руководством Фомина Валерия Владимировича предложены ряд методик по количественной оценке вертикального и горизонтального сдвига растительных рубежей и скорости их смещения (Фомин и др., 2007; Фомин, 2008, 2009), разработаны оригинальные методы картирования лес-

ных и лесотундровых сообществ (Fomin et al., 2020, 2022). Созданы подходы к количественной оценке смен фитоценозов (Mikhailovich et al., 2023), а также реконструкции возрастных поколений лиственницы сибирской по данным наземных измерений и результатов дешифрирования снимков сверхвысокого пространственного разрешения, полученных с использованием беспилотного летательного аппарата (Fomin et al., 2022).

Количественная оценка запаса фитомассы лесных насаждений представляет собой одно из ключевых направлений в лесной таксации и экологии. Ключевая роль лесов в составе биосферы и критически важное значение в регулировании глобального углеродного цикла и предотвращении климатических изменений поставило перед наукой задачу перехода от сырьевого потенциала лесов к комплексному анализу их биологической продуктивности (Усольцев, 1988, 1998, 2001, 2002; Usoltsev, Vanclay, 1995; Щепашенко и др., 2008).

Фитомасса деревьев является не только показателем продуктивности лесных экосистем, но и основным объектом, аккумулирующим (депонирующим) связанный углерод в лесных экосистемах.

Основой количественной оценки фитомассы деревьев служат аллометрические уравнения. Наиболее часто используется аллометрическая (степенная) модель, в которой ключевым предиктором выступает диаметр ствола (Huxley, 1932; Кофман, 1986). Со временем аллометрические модели были усложнены до многофакторных моделей, которые включают разные морфометрические параметры деревьев (диаметр ствола и его высота), а также их возраст (Усольцев, 1988).

В работе Владимира Андреевича Усольцева с соавторами (Усольцев и др., 2017) описаны границы применимости создаваемых моделей. Модели, в основу которых заложены данные всего массива, дают недопустимо большие стандартные и систематические ошибки. Из этого следует, что аллометрические модели, построенные для определенного региона без калибровки, не применимы в других или будут иметь низкую точность оценки фитомассы.

В.А. Усольцев создал крупнейшие базы данных о фитомассе древостоев и ее годовом приросте по регионам Евразийского континента. Эти массивы данных

стали основой для многочисленных обобщений и анализа географических закономерностей (Усольцев, 2002, 2003 а, б).

Исследования фитомассы и запасов углерода в трех субарктических регионах России (Кольский полуостров, Полярный Урал и плато Путорана) позволили выявить тенденцию к накоплению надземной фитомассы древостоев на каждый километр верхней границы леса. Данные для анализа были получены на двадцати высотных профилях, использованы данные 139 модельных деревьев разных видов (*Betula pubescens* Ehrh. ssp. *tortuosa*, *Pinus sylvestris* L., *Picea abies* Ledeb. ssp. *obovata*, *Larix sibirica* Ledeb. и *Larix gmelinii* Rupr.) (Moiseev et al., 2022).

Сходные термические условия вегетационного периода – на протяжении Уральского хребта, при этом холод остается главным лимитирующим фактором. Биомасса и продуктивность древостоев закономерно и многократно снижаются от Южного Урала к Полярному (Hagedorn et al., 2020).

Глава 2. Программа, методика и объект исследования

2.1 Характеристика района исследований

Объект исследований – лиственница сибирская (*Larix Sibirica* Ledeb.), произрастающая на юго-восточном макросклоне горного массива Рай-Из (Полярный Урал, Приуральский район Ямало-Ненецкого автономного округа) в междуречье рек Енгаю и Кердоманшор (рисунок 2.1). Географические координаты исследуемой территории: 66°47'35" с.ш. 65°39'16" в.д. и 66°50'13" с.ш. 65°30'16" в.д.

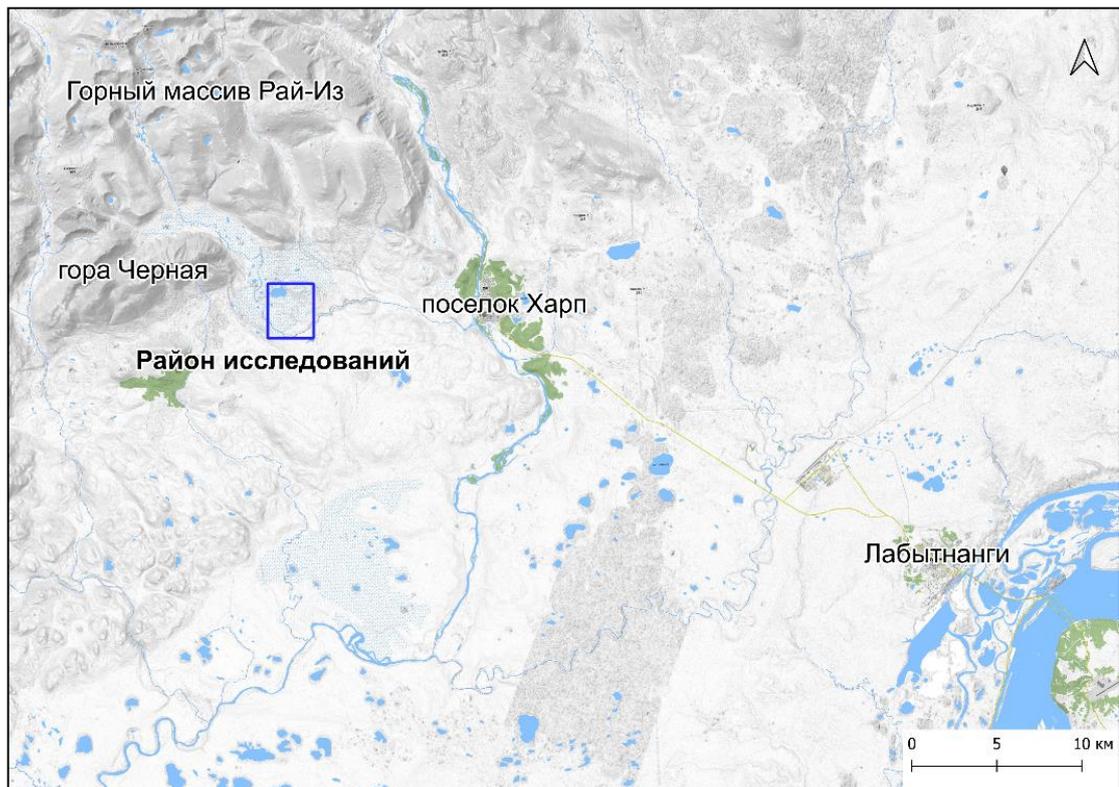


Рисунок 2.1 – Местоположение района исследований (выделен синим цветом) на топографической карте с обозначением крупных форм рельефа и населенных пунктов

Район исследований находится на территории Полярно-Уральского участка природного парка «Ингилор». Свое современное название парк приобрел в результате последней реорганизации Полярно-Уральского природного парка (О создании ..., 2022). На территории парка минимизировано антропогенное влияние на экоси-

стемы. Доступ автомобилей на его территорию возможен только после получения специального разрешения от Департамента природных ресурсов и экологии Ямало-Ненецкого автономного округа.

На рисунке 2.2 приведены фотоснимки, сделанные с беспилотного летательного аппарата в направлении на юго- и северо-восток. Они дают представление о распределении в пространстве района лиственницы сибирской – густота древостоев снижается при продвижении от нижней части участка, расположенного вдоль берега реки Енгаю к верхней части, формируя экотон верхней границы древесной растительности.

Горные структуры, частью которых является исследуемый район, включают в себя Рай-Из и Войкаро-Сынинский офиолитовые массивы (Вахрушева и др., 2023). Они состоят из особых древних пород (офиолитов), которые когда-то были частью земной коры и верхней мантии под океаном. Эти массивы надвинуты на край древнего Восточно-Европейского континента. Вместе с массивом (Сыум-Кеу) они образуют гигантский, самый большой в мире, протяженностью более 400 км, пояс из темных и ультратемных пород (Вахрушева и др., 2017).

Массив Рай-Из является особо ценным для экономики нашей страны. Он содержит наибольшее в России месторождение хромитовых руд (Строение, эволюция ..., 1990). В хромитовых рудах также были найдены алмазы, что говорит об их глубинном происхождении (Yang et al., 2015).

Александр Николаевич Заварицкий первым обнаружил и описал особые темные породы (субщелочные делориты) внутри ультраосновных пород массива Рай-Из. Он назвал их «жильный роговообманковый диабаз» (Заварицкий, 1932). В северо-восточной части района проходит дорога на карьер по добыче хромитовых руд «Центральный», который расположен на удалении 11 км от района исследований и на 20 км от поселка городского типа Харп.



а



б

Рисунок 2.2 – Ландшафтные аэрофотоснимки района исследований, сделанные в 2018 г.

Е. М. Агапитовым при помощи беспилотного летательного аппарата в направлении на юго-восток (а) и северо-восток (б) в направлении слияния рек Енгаю и Кердоманшор

С точки зрения антропогенного воздействия, грунтовая технологическая дорога имеет локальное антропогенное воздействие на окружающую растительность, выражающееся в распространении пыли на удалении до 50 м от дороги. Так как дорога проложена вдоль градиента высоты, она практически не повлияла на гидрологический режим юго-восточного макросклона горного массива Рай-Из.

Рельеф района исследований сформирован под определяющим влиянием ледников, двигавшихся по поверхности района, начиная с плейстоценового оледенения, начавшегося 2,58 млн лет назад (Иванов, 2013) и заканчивая последним оледенением около 10 тыс. лет назад (Svendsen et al., 2014).

В районе преобладают моренные формы рельефа, выраженные в виде разнообразно расположенных гряд, холмов (моренных бугров) и разделяющих их слабоволнистых равнин, что является следствием экзарационной и аккумулятивной деятельности ледника.

Исследуемая территория имеет сеть постоянных и временных водотоков и многочисленные озерные чаши (Старков, Пестова, 2015). Территория района исследований имеет множественные, мозаично расположенные области, занимаемые курумниками (каменистыми россыпями), рисунок 2.3 а.

Район исследований находится в континентальном субарктическом географическом поясе (Алисов, 1969). Его южная граница расположена на удалении 28 км к северу от параллели $66^{\circ}55'$ с.ш., определяющей положение Северного полярного круга. В летний период особенностью климата является поступление малого количества тепла и избыточное увлажнение, которое формируется талыми и дождевыми водами. Региону свойственна продолжительная холодная зима и короткое лето (Иванов, 2013).

Климатические условия в районе горного массива Рай-Из определяют особую специфику растительного мира – выживают виды, способные к вегетации в условиях короткого вегетационного сезона и длительного периода низких значений температуры воздуха и сильных ветров.

Инструментальные измерения погодных условий проводятся на метеостанции Салехард с 1882 г. В период с 1892 г. установлено увеличение значений средней температуры воздуха холодного и теплого периода года на 1,0 и на 1,2 °С соответственно (Михайлович, 2022).

Инструментальные измерения позволяют оценить основные тренды изменения климатических показателей за весь период инструментальных наблюдений. Для оценки изменений климата в прошлом использованы методы дендрохронологии (Шиятов, 1986 а). Для района исследований установлено, что завершение средневекового потепления и переход к холодному периоду (Малому ледниковому периоду) произошло в конце XIII в. Этот долгосрочный тренд на понижение температур с возможными краткосрочными колебаниями устойчиво доминировал вплоть до начала современного этапа потепления на рубеже XIX–XX вв. (Мазепа, Шиятов, 2015).

Снежный покров в районе исследований распределен неравномерно, это связано с особенностями переноса и накопления снега под влиянием ветра. На отдельных участках района исследований снег может находиться до середины июля и даже позже (Горчаковский, Шиятов, 1985; Михайлович, Фомин, 2017).

Борис Николаевич Норин отмечал, что для редколесий характерны разреженность древесного яруса, комплексная мозаичная структура растительного покрова (Норин, 1962). На рисунке 2.3 приведены ландшафтные фотографии, дающие представления об особенностях растительного покрова на исследуемой территории.

В районе исследований преобладают чистые лиственничники (Шиятов и др., 2005). В нижней части исследуемой территории может изредка встречаться ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.) и береза извилистая (*Betula tortuosa* Ledeb.). В подлеске встречается карликовая береза (*Betula nana* L.) и можжевельник сибирский (*Juniperus sibirica* Bugsd.) (Фирсова, Дедков, 1983; Панова и др. 2003), а травяно-кустарничковом – голубика (*Vaccinium uliginosum* L.), а в напочвенном покрове – зеленые мхи и лишайники (Панова и др., 2003).



а



б

Рисунок 2.3 – Мозаичная структура растительного покрова, неоднородность лиственничных редколесий в границах района исследований. Автор ландшафтных снимков – Е. М. Агапитов (июль 2018 г.)

2.2 Программа исследования и объем выполненных работ

1. Анализ литературы по проблеме исследований климатогенной динамики древесной растительности вблизи верхнего предела ее произрастания.

2. Проведение работ по закладке 9 круговых пробных площадей в районе исследований в градиенте густоты древостоев и высоты местности, проведение измерения биометрических характеристик экземпляров лиственницы от всходов до взрослых деревьев.

3. Моделирование взаимосвязи биометрических параметров лиственницы сибирской.

4. Проведение аэрофотосъемки района исследований при помощи беспилотного летательного аппарата и создание ортофотоплана.

5. Проведение дешифрирования лиственницы сибирской на ортофотоплане.

6. Создание модели оценки вероятности отнесения дерева к возрастным интервалам по значению радиуса кроны лиственницы сибирской на основе данных прямых наземных измерений на пробных площадях.

7. Оценка возрастной структуры популяции лиственницы сибирской по возрастным интервалам на основе данных радиуса кроны лиственницы сибирской, полученных в результате их дешифрирования на ортофотоплане

8. Создание математико-статистической модели зависимости диаметра шейки корня лиственницы сибирской от радиуса максимальной горизонтальной проекции ее кроны.

9. Оценка запаса фитомассы популяции лиственницы сибирской, в том числе по возрастным интервалам, по данным количественной оценки радиуса кроны лиственницы сибирской полученных в результате дешифрирования на ортофотоплане с использованием полученных моделей.

2.3 Методика исследований

Круговые пробные площади на трех профилях (трансект) по три пробной площади в каждой (рисунок 2.4) в градиенте изменения густоты. Радиус каждой пробной площади составлял 11 м. В центр каждой пробной площади устанавливали буссоль AP-1 (Вологодский оптико-механический завод, Россия), обеспечивающий точность угловых измерений – 6 мин или $0,1^\circ$. Координаты центра пробной площади определяли с использованием портативного GPS-навигатора Garmin eTrex-10 (Garmin Ltd., Швейцария).

В пределах пробной площади проводили измерения, позволяющие определить местоположение каждого экземпляра (от всходов до взрослых деревьев). Из центра пробной площади были проведены измерения угла (от направления на север) при помощи буссоли и расстояния до экземпляра при помощи мерной ленты с точностью до 1 см. С использованием перечисленных выше параметров были произведены расчеты географических координат каждого экземпляра лиственницы, а также координаты в проекции UTM (Universal Transverse Merktor – универсальная поперечная Маркатора), и созданы векторные точечные слои для каждой пробной площади в географической информационной системе QGIS.

В пределах пробной площади проводили измерение биометрических характеристик лиственницы: высота дерева, диаметр шейки корня и диаметр на высоте 1,3 м (для экземпляров, достигших этой высоты), диаметр кроны в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Возраст деревьев определяли по кернам древесины, которые извлекали из ствола при помощи приростного бурава Haglof (Haglof, Швеция). В случаях, когда бурение было невозможно (например, из-за малого диаметра ствола), для определения возраста отбирали образцы всходов и подроста лиственницы разной высоты. Возраст каждого из них определяли по срезы у шейки корня. Для определения возраста деревьев по кернам древесины использовали дендрохронологический комплекс Lintab (Rinntech Inc.).

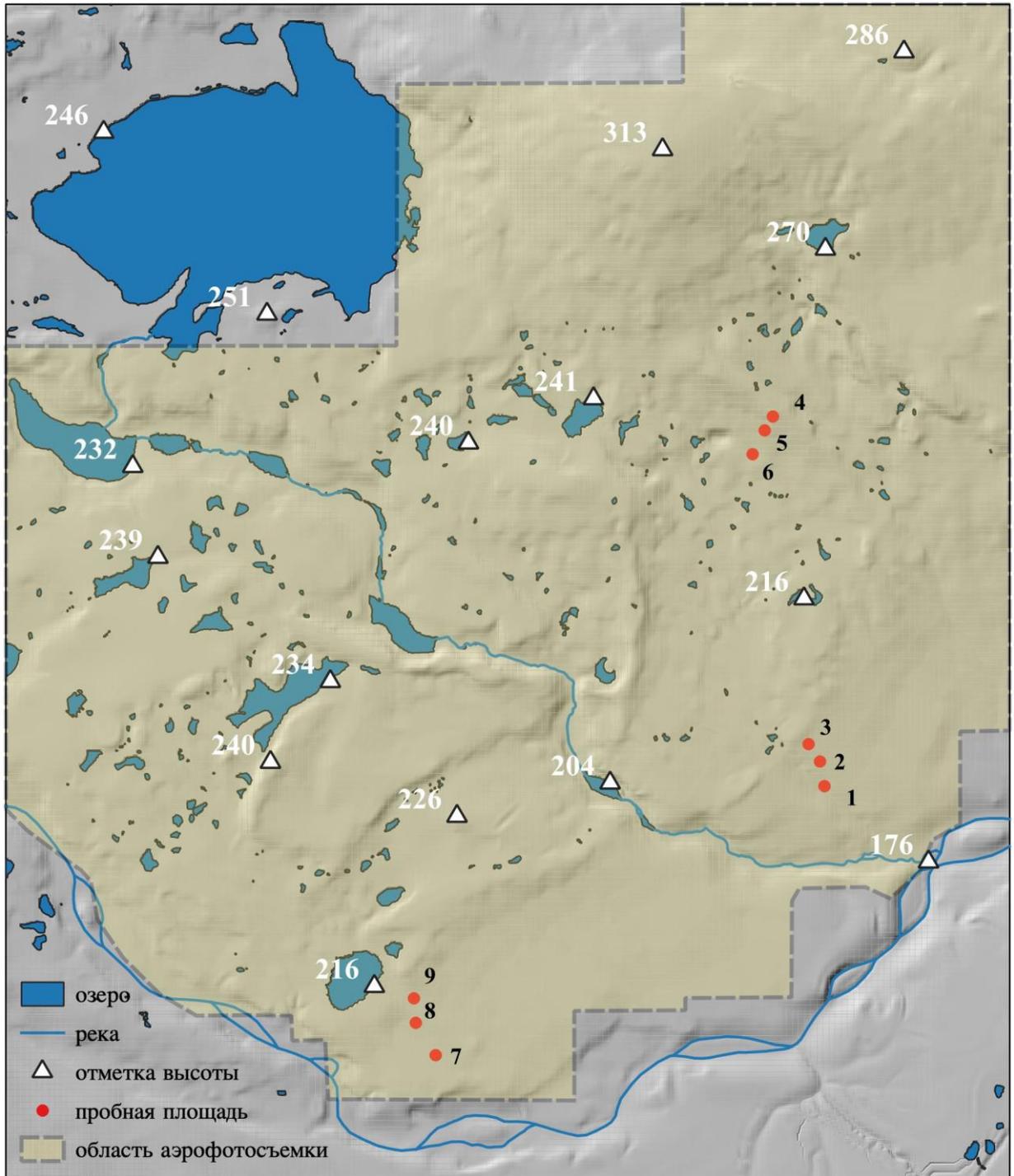


Рисунок 2.4 – Картосхема района исследований с обозначением местоположения пробных площадей и области аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата

Векторный полигональный слой, обозначающий кроны лиственницы, для каждой пробной площади был построен с использованием функции расчета буферной области вокруг каждой точки векторного точечного слоя по среднему радиусу кроны в географической информационной системе QGIS (qgis.org).

При определении возраста деревьев по кернам древесины к полученному значению, определяемому по количеству колец, прибавляли количество лет, определенного по подросту, высота которого соответствует высоте взятия керна древесины (Wong, Lertzman, 2001; Elliott, Kipfmüller, 2018).

Аэрофотосъемку территории проводили в ходе полевых исследований 2018 г. с использованием мультироторного беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 4 Advanced (Китай). Данная модель БПЛА оснащена механическим затвором и 20-мегапиксельной матрицей, что позволило получать кадры с высокой детализацией и минимальными искажениями. Все полетные задания были выполнены в автоматическом режиме по заранее построенным маршрутам с поддержанием с высоты 50 метров. Такой режим съемки обладает рядом преимуществ:

1) геометрическая стабильность – постоянная высота полета относительно стартовой точки позволяет получить серию снимков с минимально изменяющимся масштабом в пределах одного вылета, что критически важно для точного построения ортофотопланов;

2) снижение влияния рельефа – фиксация высоты от точки взлета минимизирует сложные перспективные искажения, которые возникают при полете с постоянной высотой над рельефом;

3) оптимизация процесса – автоматизированные полеты (использование автопилота) упрощают планирование, повышают повторяемость и безопасность съемки, а также обеспечивают равномерное продольное и поперечное перекрытие снимков (80 и 60 % соответственно), необходимое для построения ортофотопланов (ОДМ 218.9.017–2019, СТО 11468812.011–2025).

Управление полетами было выполнено с использованием мобильного приложения Pix4Dcapture (Pix4D Solutions, Швейцария). Параметры полетного задания задавались непосредственно в интерфейсе приложения, где оператор указывал следующие параметры: площадь съемки (длину и ширину зоны полета), расчетное время выполнения миссии, высоту над точкой взлета, значения продольного и поперечного перекрытия снимков в процентах, а также азимутное направление траектории полета. В случае выбора площади, превышающей допустимые для вы-

полнения пределы, приложение заблокировало возможность запуска миссии. Беспилотный летательный аппарат автоматически выполнял взлет, полет по заданной траектории и завершение миссии, однако посадка осуществлялась в ручном режиме оператором из-за наличия сложной растительности живого напочвенного покрова (Агапитов и др., 2024).

На момент проведения аэрофотосъемки в Ямало-Ненецкий автономном округе (как и в других субъектах Российской Федерации) не был введен запрет или ограничение на полеты беспилотных воздушных судов (рисунок 2.5). Район исследований также не входит в приграничную зону, которая имеет особые правила полета и строгие ограничения (Пограничная ..., 2025).

В районе исследований отсутствует инфраструктура жилых (селитебных) зон, что исключает риски для населения и хозяйственных объектов. Все полеты были выполнены в светлое время суток. Весь маршрут полета был под постоянным визуальным контролем оператора, что обеспечивало дополнительный контроль за безопасностью эксплуатации БПЛА.

На рисунке 2.6 видно, что зона полетов не пересекала области работы вертолетных площадок и аэродромов. Участок находится за пределами 5 км зоны от ближайших вертолетных площадок, а также вне границ диспетчерской зоны аэропорта города Салехард. Полеты проведены в соответствии с регламентами и с соблюдением всех мер безопасности.

На момент написания диссертационной работы, платформа Системы подачи планов полетов (Система представления ..., 2025) при формировании запроса высоты полета до 120 метров отражает возможность полетов в районе исследований без получения разрешений от органов Единой системы организации воздушного движения (ЕС ОрВД) и местного самоуправления.

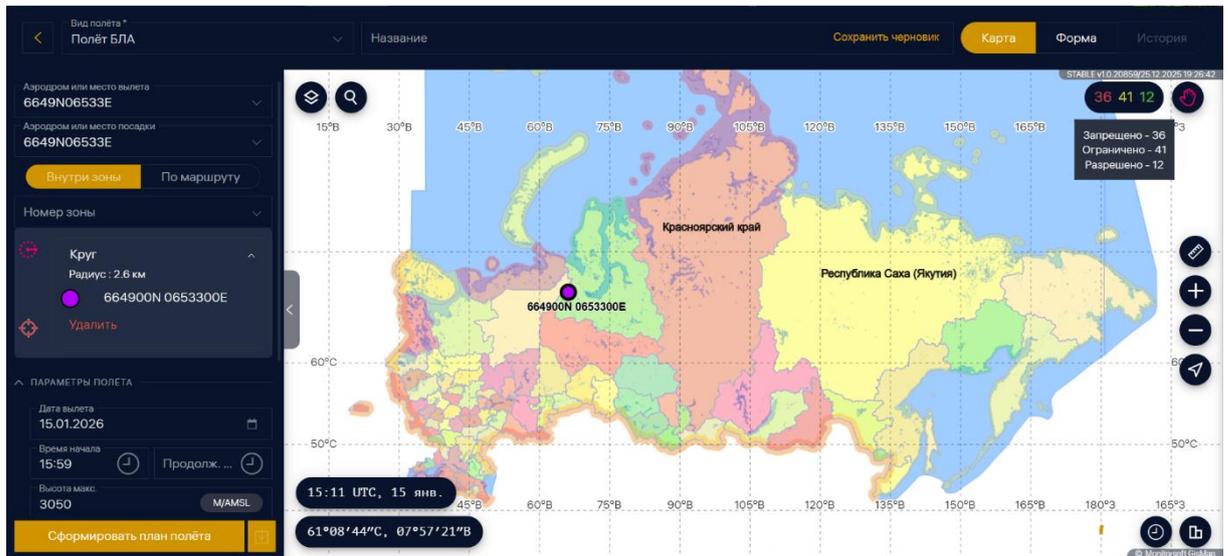


Рисунок 2.5 – Карта субъектов Российской Федерации, имеющие ограничения, запреты либо их отсутствие. Район исследований показан фиолетовой точкой

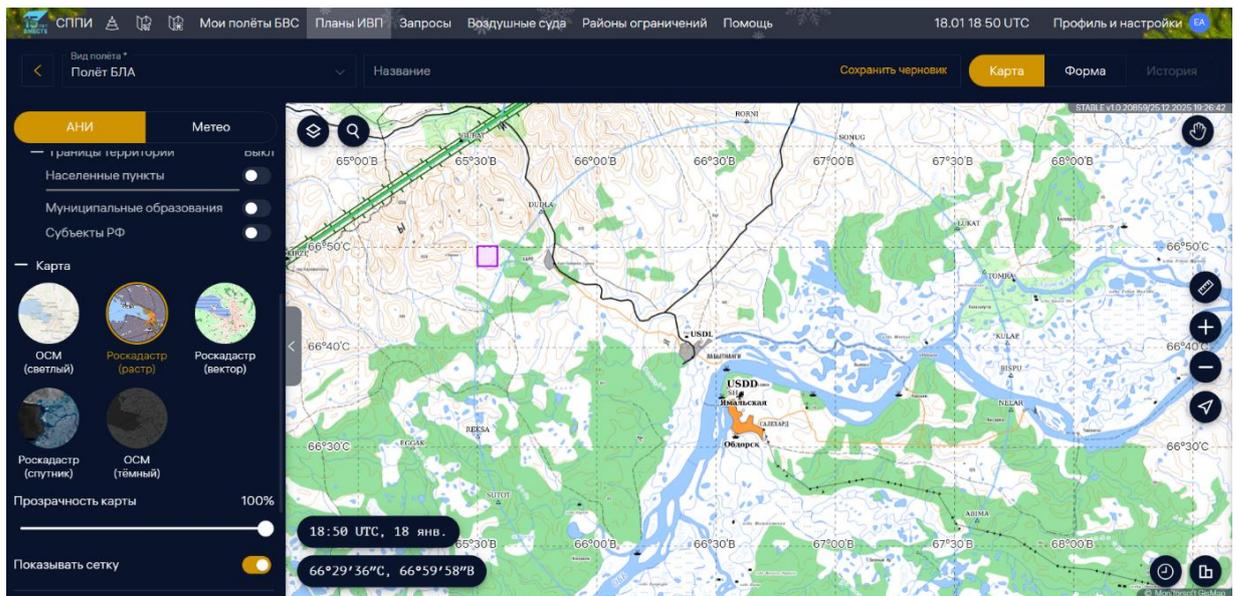


Рисунок 2.6 – Укрупненная карта, круг синего цвета показывает границы диспетчерской зоны аэропорта в городе Салехард. Фиолетовый квадрат – границы полетных заданий в районе исследований

Для контроля этапов аэрофотосъемки после выполнения каждой миссии при помощи утилиты ExifTool (URL: <https://exiftool.org>) был выполнен пакетный экспорт ключевых пространственных метаданных снимков. Результатом экспорта стали файлы в csv-формате, в которых для каждого снимка были записаны название снимка, географические координаты центра.

На основе данных csv-файлов были созданы векторные точечные геоинформационные слои в геоинформационной системе QGIS. Каждая точка такого слоя соответствовала центру проекции конкретного снимка на местности. Это позволило визуализировать и анализировать реальную схему покрытия территории снимками, проверить равномерность их размещения на исследуемой территории, выявить участки, для которых требуется проведение полетов.

Для создания ортофотоплана всего района исследований выполняли процедуру фотограмметрической обработки полученных аэроснимков при помощи программного обеспечения Agisoft Metashape Professional (Agisoft, Санкт-Петербург, Россия). Процесс обработки снимков для создания одного ортофотоплана включал в себя несколько этапов обработки, где каждый этап – это отдельный блок, который можно улучшать или заменять, не ломая всю цепочку обработки.

Подготовительный этап обработки данных включал импорт исходных аэрофотоснимков в проект Agisoft Metashape с помощью команды «Добавить снимки». Первым ключевым этапом фотограмметрической обработки стало выполнение операции «Выравнивание снимков» (Align photos). Алгоритм на основе методов структуры из движения анализирует каждый снимок, обнаруживает уникальные сопоставимые точки (ключевые точки) на перекрывающихся изображениях и на основе их совпадений определяет точное положение и ориентацию каждой камеры (снимка) в пространстве в момент съемки.

Результатом выравнивания является построение разреженного облака точек, представляющего собой трехмерный «каркас» области съемки. Данное облако служило геометрической основой для последующего этапа – построения плотного облака точек (Point cloud) путем алгоритма плотного сопоставления. Эта операция является наиболее ресурсоемкой, т. к. генерирует детализированную трехмерную модель поверхности с плотностью точек, близкой к разрешению исходных изображений.

На основе плотного облака точек была создана цифровая модель местности (ЦММ) при помощи создания триангуляционной модели (команда Build mesh), создавалась полигональная модель путем триангуляции. В свою очередь, ЦММ ис-

пользуется для построения текстур (Build texture). В процессе фототрансформирования каждый пиксель исходных снимков проецируется на трехмерную поверхность модели с поправкой на перспективные искажения и рельеф, что обеспечивает создание планово-точного, бесшовного растрового покрытия с единым масштабом для всего ортофотоплана.

Заключительным этапом обработки данных аэрофотосъемки в программном обеспечении Agisoft Metashape стало создание ортофотоплана, бесшовного растрового покрытия, объединяющего отдельные аэрофотоснимки в единое геометрически точное изображение исследуемой поверхности. Для обеспечения плановой корректности и возможности прямых пространственных измерений ортотрансформирование и сшивка проведена в систему координат WGS 84 / UTM Zone 41N.

Использование ортофотопланов, созданных в метрической проекции, обеспечило прямую возможность проведения измерений. Для последующего анализа и интеграции с другими пространственными данными ортофотопланы были экспортированы в растровый формат JPEG. Этот формат был выбран для обеспечения совместимости и эффективного использования в геоинформационной системе QGIS, в которой были выполнены дальнейшая обработка и анализ данных.

Дешифрирование крон деревьев и подроста лиственницы сибирской на снимках произведено ручным способом, это обусловлено требованием максимальной точности при идентификации границ крон и их пространственного положения. Существующие автоматизированные алгоритмы обработки изображений не обеспечивают требуемых точности и качества распознавания объектов результатов в условиях высокой пространственной неоднородности поверхности изучаемой территории.

Район исследований характеризуется выраженной мозаичностью подстилающей поверхности, которая обусловлена сочетанием различных типов почв и разнородной травянистой и кустарниковой растительностью. Значительное влияние на текстурные характеристики снимков оказывают также условия освещения. В солнечную погоду деревья и подрост отбрасывают тени, направление которых различается для разных полетных заданий, в условиях облачности тень отсутствовала.

Дополнительным фактором, усложняющим автоматическое распознавание, является специфика строения древостоя, который представлен в основном листовенницей сибирской. Для нее в районе исследований характерно формирование многоствольных форм, а также биогрупп, где отдельные экземпляры произрастают на минимальном расстоянии друг от друга, что приводит к слиянию крон в единый контур на снимке.

В совокупности вышеперечисленные факторы, влияющие на автоматическое распознавание, также могут повлиять на метод ручного распознавания. Ключевая особенность этого метода заключается в субъективности, которая обусловлена индивидуальными особенностями зрительного восприятия и интерпретации пространственных паттернов каждым оператором. Длительная и трудоемкая работа с изображениями приводит к так называемому «замыливанью» или «усталости» взгляда, что повышает риск возникновения оптических иллюзий, особенно на сложном мозаичном фоне подстилающей поверхности.

На точность визуального распознавания также напрямую влияют вариации условий съемки и характеристик самих объектов. Цветовые и тональные различия, контрастность объекта и фона, наличие тени и ее направление.

Вследствие перечисленных сложных для восприятия факторов методология ручного выделения объектов на основе аэроснимков для достижения объективности и достоверности результатов требовала обязательной процедуры валидации. Это предполагало независимый анализ одних и тех же материалов несколькими операторами с последующим сравнением согласованности их результатов для минимизации персональных ошибок и формирования понимания о субъективности принимаемых решений.

Достоверные данные о расположении и размерах крон деревьев листовенницы сибирской были получены при закладке круговых пробных площадей. Для анализа были использованы полученные геоинформационные слои с одновременным базовым использованием ортофотопланов для этих территорий. В дешифрировании крон в границах пробных площадей были задействованы четыре оператора (Фомин и др., 2019, Агапитов и др., 2022).

Согласованность количественной оценки и воспроизводимость результатов дешифрирования оценивали по методике статистического анализа межлабораторных испытаний в соответствии с ГОСТ Р ИСО 5725-2–2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений».

В рамках этой методологии применялся стандарт Манделя, который позволяет оценить два ключевых параметра точности визуального дешифрирования:

1) показатель h (коэффициент согласованности между операторами), который отражает степень совпадения результатов, полученных разными специалистами (прецизионность в условиях воспроизводимости);

2) показатель k (коэффициент внутренней согласованности оператора), который характеризует стабильность работы одного и того же оператора при повторных измерениях (прецизионность в условиях повторяемости).

Для интерпретации рассчитанных значений h и k использовались таблицы критических значений, приведенные в приложениях ГОСТа. Результаты оценивали по трем пороговым уровням:

1) значение ниже 5 %-го критического уровня. Результат признается статистически корректным и принимается;

2) значение в диапазоне между 5 %-ым и 1 %-ым критическими уровнями. Результат классифицируется как квазивыброс («подозрительное» значение);

3) значение выше 1 %-го критического уровня. Результат идентифицируется как статистический выброс и исключается из дальнейшего анализа как недостоверный.

Для организации процедуры валидации весь массив из девяти пробных площадей был разделен на две группы: обучающую (или тренировочную) и тестовую (контрольную). В обучающую выборку вошли пробные площади № 2, 3, 7. На этом материале операторы проходили этап калибровки восприятия и выработки единых критериев распознавания крон деревьев. В тестовую выборку были включены оставшиеся шесть пробных площадей (№ 1, 4, 5, 6, 8, 9). Именно на этом не-

зависимом наборе данных проводился контрольный анализ согласованности (h) и воспроизводимости (k) работы операторов с использованием описанной статистической процедуры по ГОСТ Р ИСО 5725-2–2002.

Руководствуясь критериями, описанными выше, было выявлено, что результат четвертого оператора на восьмой пробе классифицируется как квазивыброс по h -статистике. Причиной послужило то, что количество распознанных деревьев четвертым оператором превысило усредненный показатель.

Стоит пояснить, что положительные и отрицательные данные h -статистики показывают отклонения результатов операторов от общего среднего. Положительные значения соответствуют завышению, отрицательные – занижению количества распознаваемых объектов. У второго и третьего операторов наблюдается тенденция к занижению числа распознанных крон, т. к. их показатели ниже среднего, однако их данные находятся в пределах критических значений, что свидетельствует о согласованности измерений.

На основе анализа k -статистики зафиксировано аномально высокое значение у четвертого оператора, квалифицированное как статистический выброс. При рассмотрении данного случая было выявлено, что при повторном измерении оператор определил на одну крону больше, тогда как результаты остальных участников полностью совпали.

Таким образом, анализ воспроизводимости и согласованности данных, полученных при дешифрировании аэроснимков лиственницы сибирской, подтверждает, что предложенная методика может быть рекомендована для распознавания крон лиственницы сибирской. Установлено, что в пределах естественной изменчивости операторы выявляют сопоставимое количество крон, а различия между повторными оценками являются несущественными. Достижение нормативных показателей тестовых статистик обеспечивается регулярным обучением операторов и проведением контрольных мероприятий.

Полученные данные свидетельствуют о том, что совокупность использованных цветовых и морфологических признаков обеспечивает надежное дешифрирование лиственницы сибирской (*Larix Sibirica* Ledeb.) на снимках с высоким про-

странственным разрешением. Разработанная методика позволяет достоверно распознавать экземпляры деревьев лиственницы сибирской в границах ЭВГДР на восточном макросклоне горного массива Рай-Из (Полярный Урал).

Глава 3. Реконструкция возрастных поколений популяции лиственницы сибирской

Для количественной оценки экспансии древесной растительности в горную тундру, как правило, используются данные наземных измерений на пробных площадях или высотных профилях, т. к. данные дистанционного зондирования, включая архивные аэрофотоснимки, системно сделанные для горных районов в разные годы, не всегда есть в наличии (Fomin et al., 2020). Технологии получения снимков сверхвысокого пространственного разрешения с помощью беспилотных летательных аппаратов, открыло возможности для картирования древесной растительности, позволяющего для редкостойных древостоев экотона верхней границы древесной растительности наносить на карту не только местоположение отдельных древесных растений, но и очертания крон деревьев и даже подроста. Это открывает возможности для проведения ретроспективного анализа пространственно-временной динамики древесной растительности по результатам количественной оценки отдельных биометрических параметров деревьев и их возраста.

В ходе исследований был разработан подход к реконструкции возрастных поколений лиственницы сибирской. Все данные, полученные в ходе прямых измерений возраста и биометрических параметров лиственницы сибирской на пробных площадях, были сведены в один массив данных и ранжированы по следующим возрастным интервалам: 1–10, 11–40 и свыше 40 лет. Первый из приведенных интервалов соответствует подросту для условий севера (Луганский и др., 2010). Верхняя граница второго интервала используется в качестве порога, ограничивающего молодняки от средневозрастных древостоев. В третий интервал были отнесены все деревья, начиная с этапа средневозрастных древостоев.

Статистический анализ наземных данных, полученных на пробных площадях, выполнялся в программной среде R (URL: <https://www.r-project.org/>) с применением специализированных библиотек: MASS, caret, klaR, nortest, goft, dplyr, yarr. Для исследования распределения среднего радиуса проекции кроны исполь-

зовалась функция *fitdist* и графические методы диагностики (Q-Q plot, P-P plot, CDF). Установлено, что трехпараметрическое распределение Вейбулла наилучшим образом описывает вариабельность данного признака в рамках каждого из трех выделенных возрастных интервалов (1–10, 11–40, более 40). Результат теста Вейбулла для всех интервалов подтвердили адекватность выбранной модели. В таблице 3.1 представлены оценки параметров распределения (форма, масштаб, сдвиг) для радиусов крон по возрастным интервалам.

Таблица 3.1 – Результаты проверки соответствия распределения радиусов крон лиственницы сибирской (*Larix Sibirica* Ledeb.) по распределению Вейбулла и оценки его параметров по возрастным интервалам

Параметр модели отн. ед.	Возрастной интервал, лет					
	1–10		11–40		более 40	
P-value	0,056		0,252		0,740	
shape	0,791	0,083	1,123	0,112	1,462	0,242
scale	0,155	0,028	0,400	0,027	1,560	0,240

На рисунке 3.1 приведены графики плотности вероятности среднего радиуса максимальной горизонтальной проекции кроны лиственницы сибирской на пробных площадях для трех интервалов возраста 1–10; 11–40 и свыше 40 лет. Вертикальными линиями на рисунке обозначены точки пересечения кривых, которые делят диапазон значений радиуса на три области по величине вероятности отнесения экземпляра лиственницы к одному из трех диапазонов возраста. На качественном уровне оценка вероятности производится путем сравнения площадей под графиками для каждой из областей.

Для экземпляров лиственницы с радиусом кроны до 0,17 м включительно вероятность их отнесения к возрастному интервалу 1–10 лет превышает вероятность их отнесения к другим возрастным интервалам. Для области II для деревьев с кроной от 0,17 до 0,69 м включительно вероятность отнесения к возрастному интервалу 11–40 выше, чем для других интервалов. Для области III вероятность

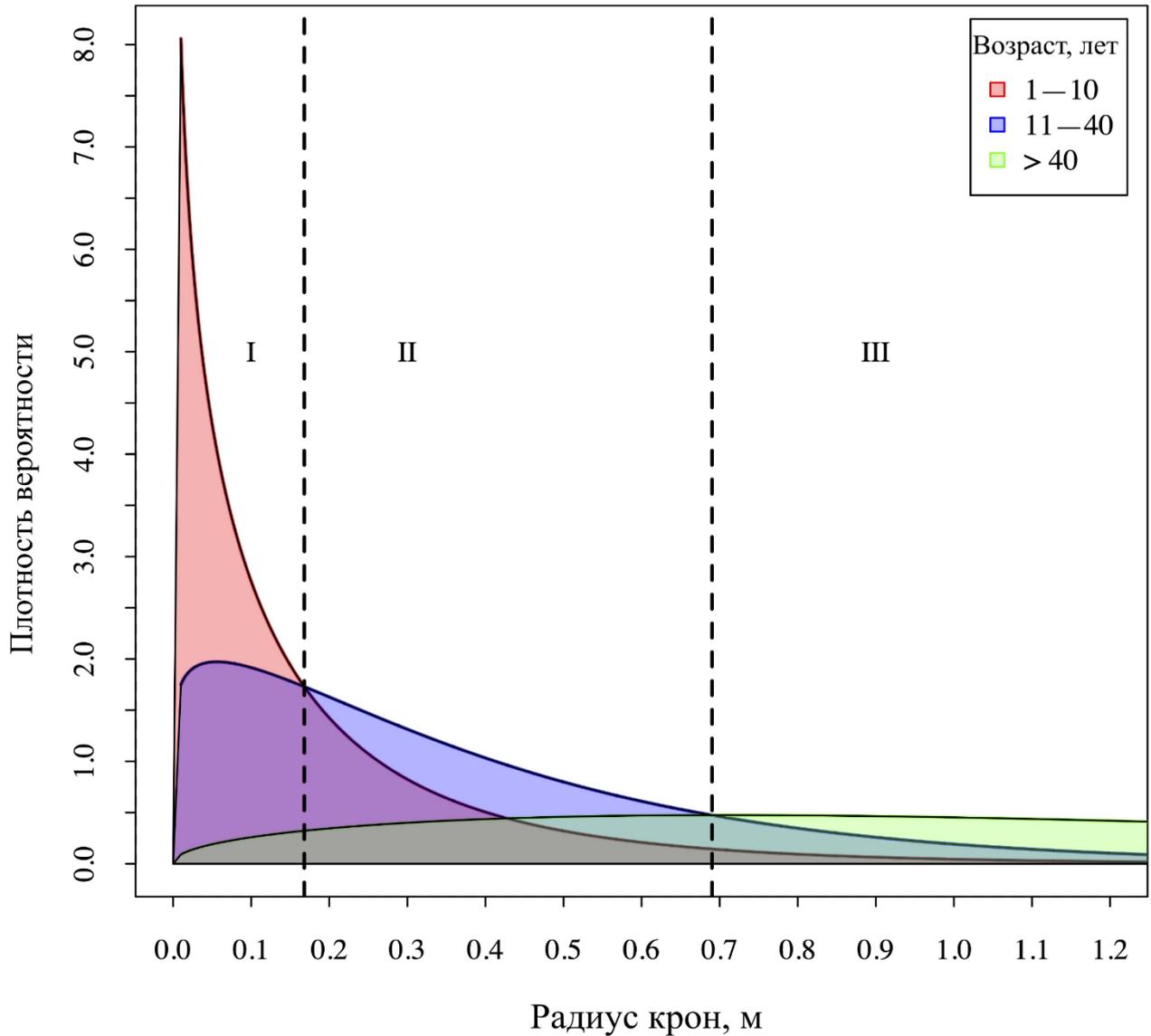


Рисунок 3.1 – Графики плотности вероятности значений среднего радиуса проекции кроны лиственницы сибирской на пробных площадях для трех интервалов возраста. Вертикальными линиями обозначены значения радиуса кроны в точках пересечения кривых. Для особей с радиусом проекции кроны до 0,17 м включительно вероятность их отнесения к возрастному интервалу 1–10 лет превышает вероятность их отнесения к другим возрастным интервалам. Для области II для деревьев с кроной от 0,17 до 0,69 м включительно вероятность отнесения к возрастному интервалу 11–40 выше, чем для других интервалов. Для области III вероятность того, что возраст дерева окажется в интервале 40 год, выше, чем для других возрастных интервалов

того, что возраст дерева окажется в интервале, превышающем 40 лет, выше, чем для других возрастных интервалов. Приведенные выше пороговые значения радиуса кроны были использованы для отнесения дешифрованных по снимку крон деревьев к одному из возрастных интервалов по значению радиуса.

Фрагменты ортофотоплана на участках района исследований, на которых находятся пробные площади № 2, № 5 и № 7, приведены на рисунках 3.2–3.4 соответственно. На них можно видеть то, что окружности, представленные белыми линиями, хорошо описывают кроны лиственницы на ортофотоплане. Необходимо отметить, что окружности были построены по величине радиуса максимальной горизонтальной проекции кроны по результатам прямых наземных измерений диаметра кроны в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Данные, представленные на рисунках 3.2–3.4, свидетельствуют о хорошем совпадении местоположения и размеров объектов – крон на аэроснимках и пробных площадях.

Результаты анализа распознавания операторами лиственницы сибирской на аэроснимках подтвердил высокий уровень совпадения их оценок, полученных в результате дешифрирования крон лиственницы разными операторами, что свидетельствует о высоком уровне согласованности и воспроизводимости результатов (Фомин и др., 2019, Агапитов и др., 2022). В ходе исследований также было выявлено наличие индивидуальных особенностей в работе каждого оператора, проявляющихся в систематических предпочтениях при интерпретации сложных контуров или стоящих рядом деревьев.

Для минимизации влияния данного субъективного фактора целесообразно внедрение корректирующих мероприятий: проведение регулярных дополнительных обучающих сессий (калибровок) с использованием эталонных снимков и обсуждение спорных случаев, что позволит выбрать единые стандарты интерпретации и сократить вероятность выхода статистических показателей качества работы за установленные контрольные пределы.

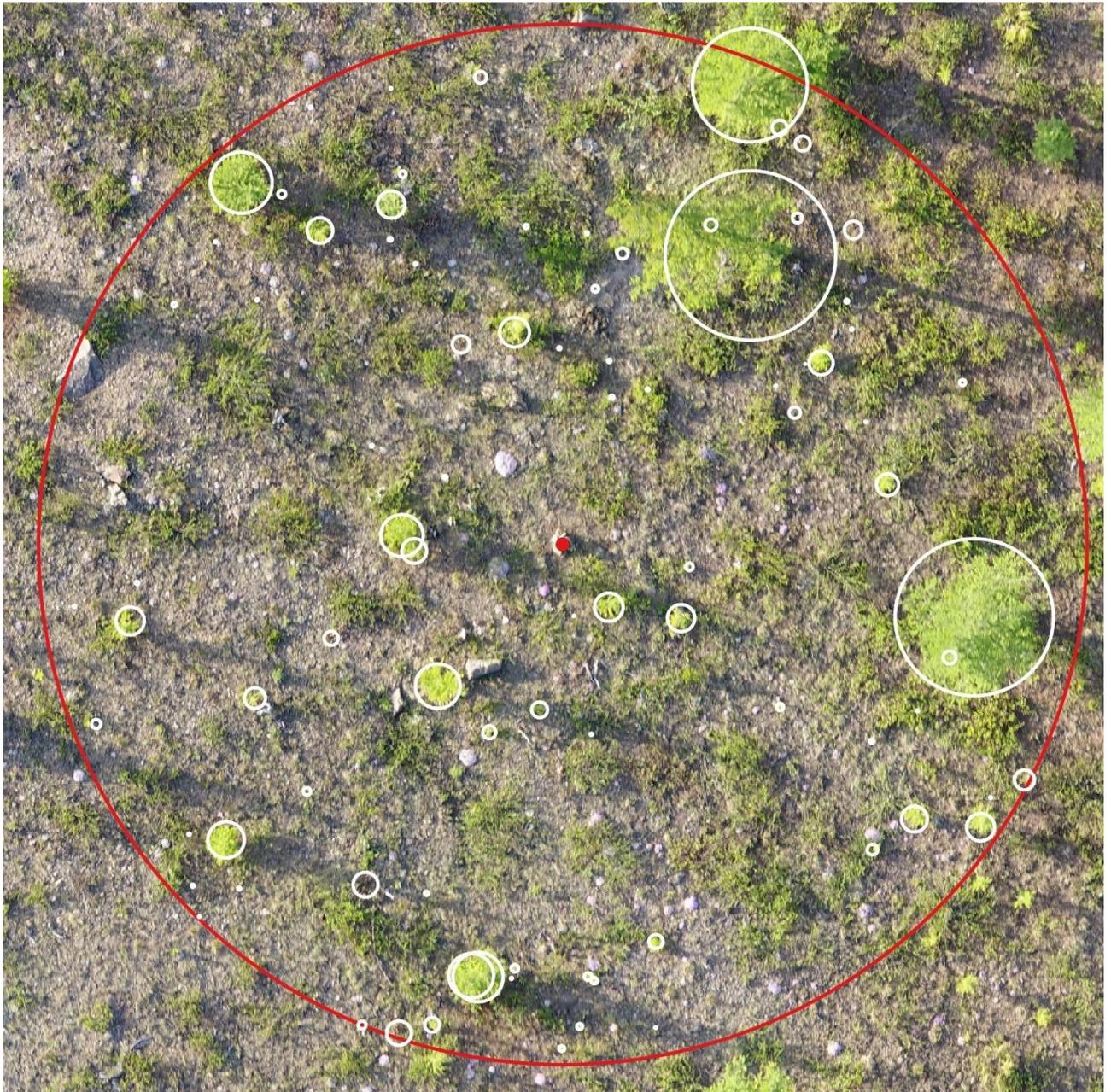


Рисунок 3.2 – Фрагмент ортофотоплана для пробной площади № 2. Граница пробной площади обозначена красной линией. Окружности с границей в виде линии белого цвета рассчитаны по величине среднего радиуса максимальной горизонтальной проекции кроны, полученной в ходе прямых наземных измерений

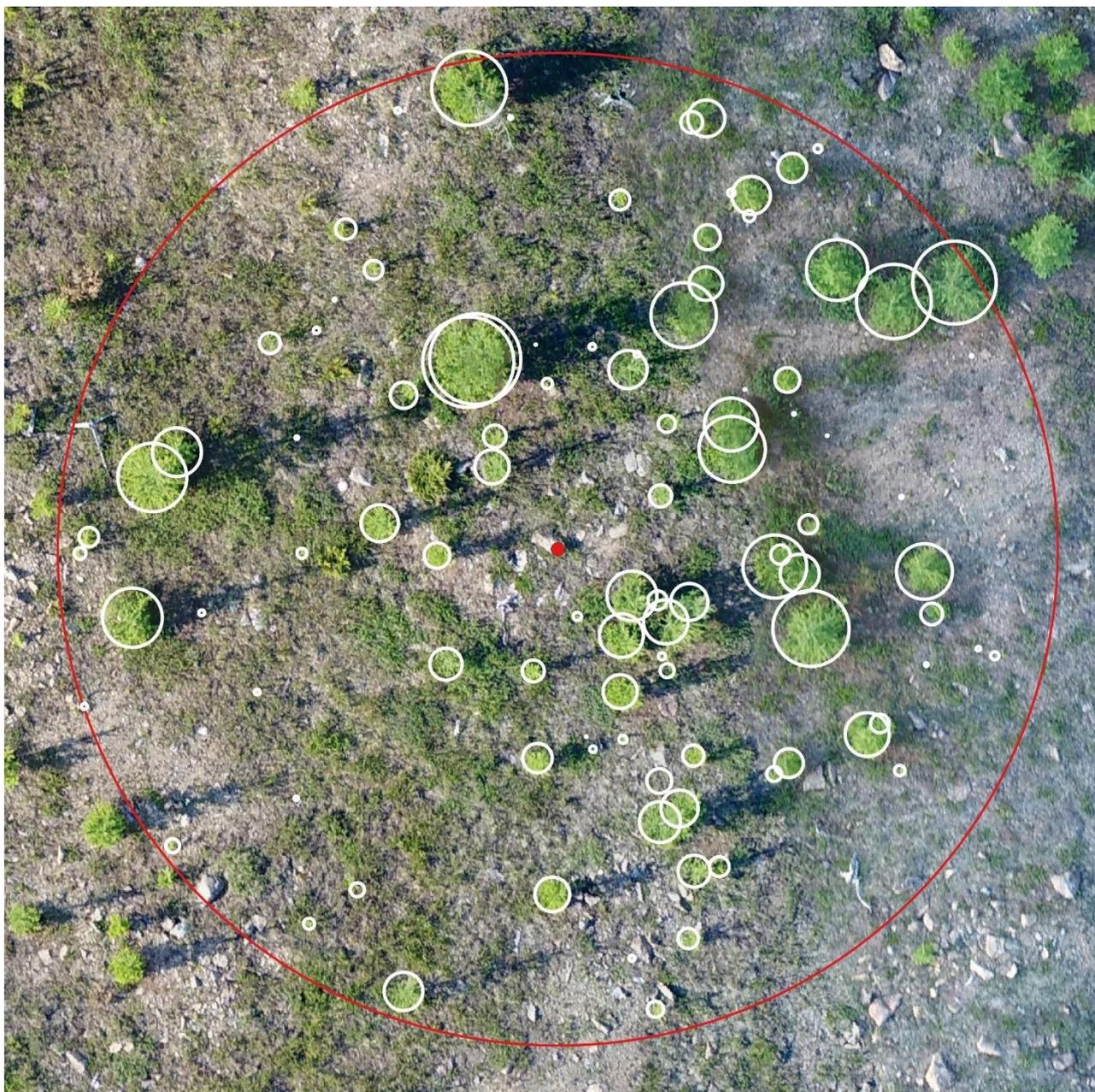


Рисунок 3.3 – Фрагмент ортофотоплана для пробной площади № 5. Граница пробной площади обозначена красной линией. Окружности с границей в виде линии белого цвета рассчитаны по величине среднего радиуса максимальной горизонтальной проекции кроны, полученной в ходе прямых наземных измерений

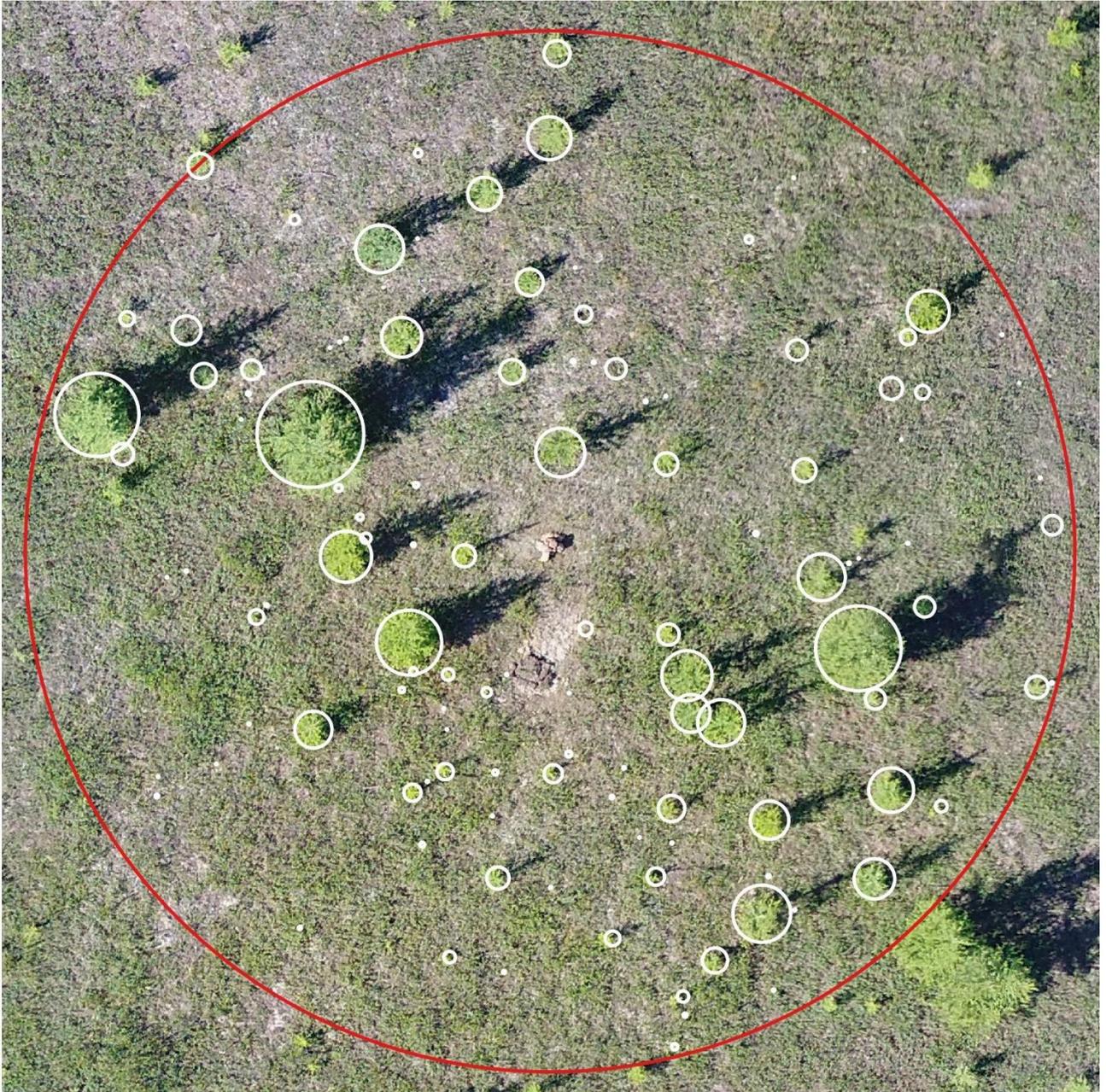


Рисунок 3.4 – Фрагмент ортофотоплана для пробной площади № 7. Граница пробной площади обозначена красной линией. Окружности с границей в виде линии белого цвета рассчитаны по величине среднего радиуса максимальной горизонтальной проекции кроны, полученной в ходе прямых наземных измерений

На рисунках 3.5 и 3.6 приведены картосхемы, полученные в результате наложения на цифровую модель рельефа векторного слоя, каждый полигон которого в виде окружности представляет крону лиственницы сибирской, распознанной оператором на ортофотопланах. Для каждого полигона был рассчитан радиус кроны.

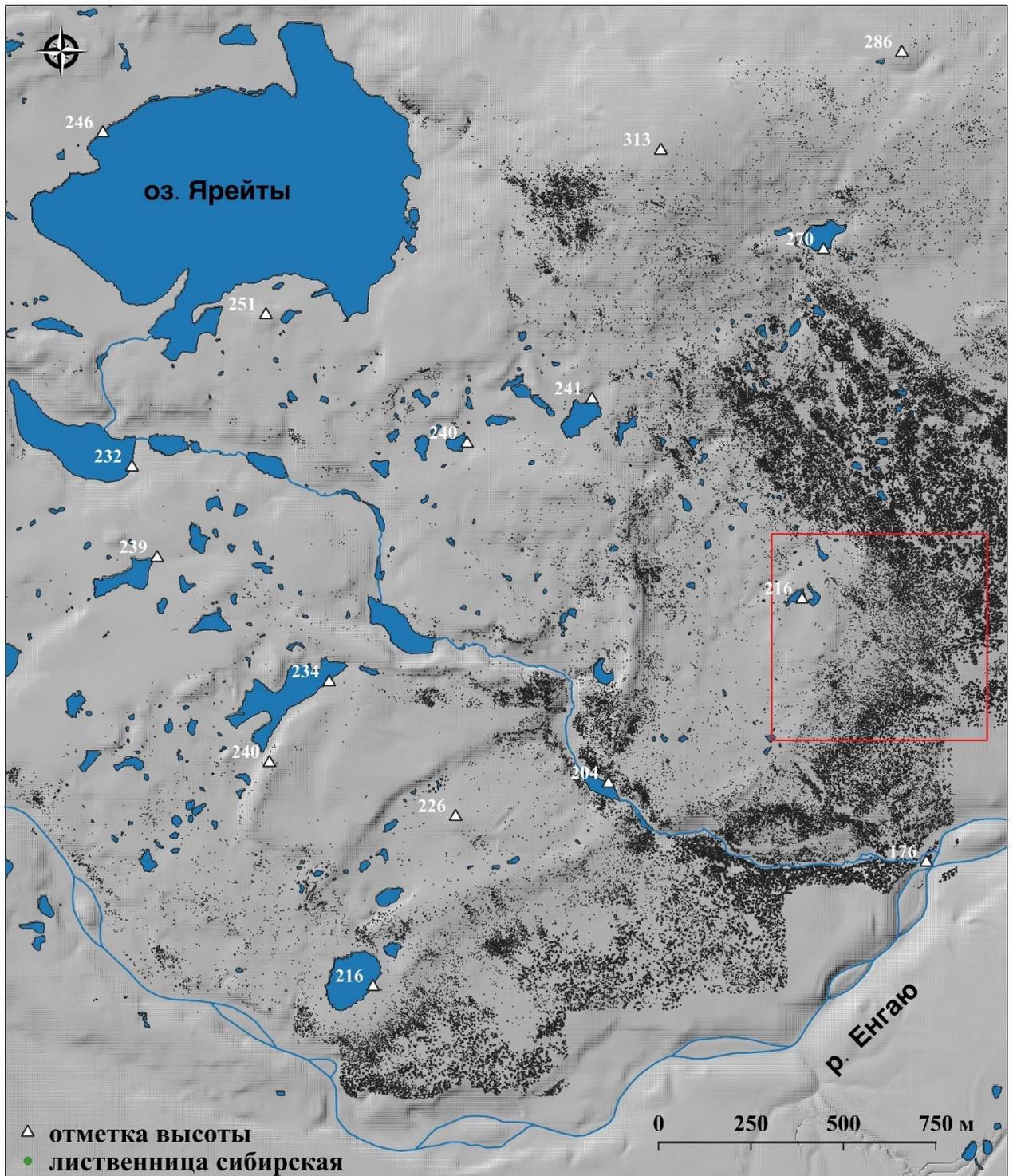


Рисунок 3.5 – Картограмма распределения экземпляров лиственницы сибирской в экотоне верхней границы древесной растительности, созданная на основе дешифрирования снимков, полученных с использованием беспилотного летательного аппарата. Прямоугольником с границей в виде линии красного цвета обозначена область, увеличенное изображение которой приведено на рисунке 3.6

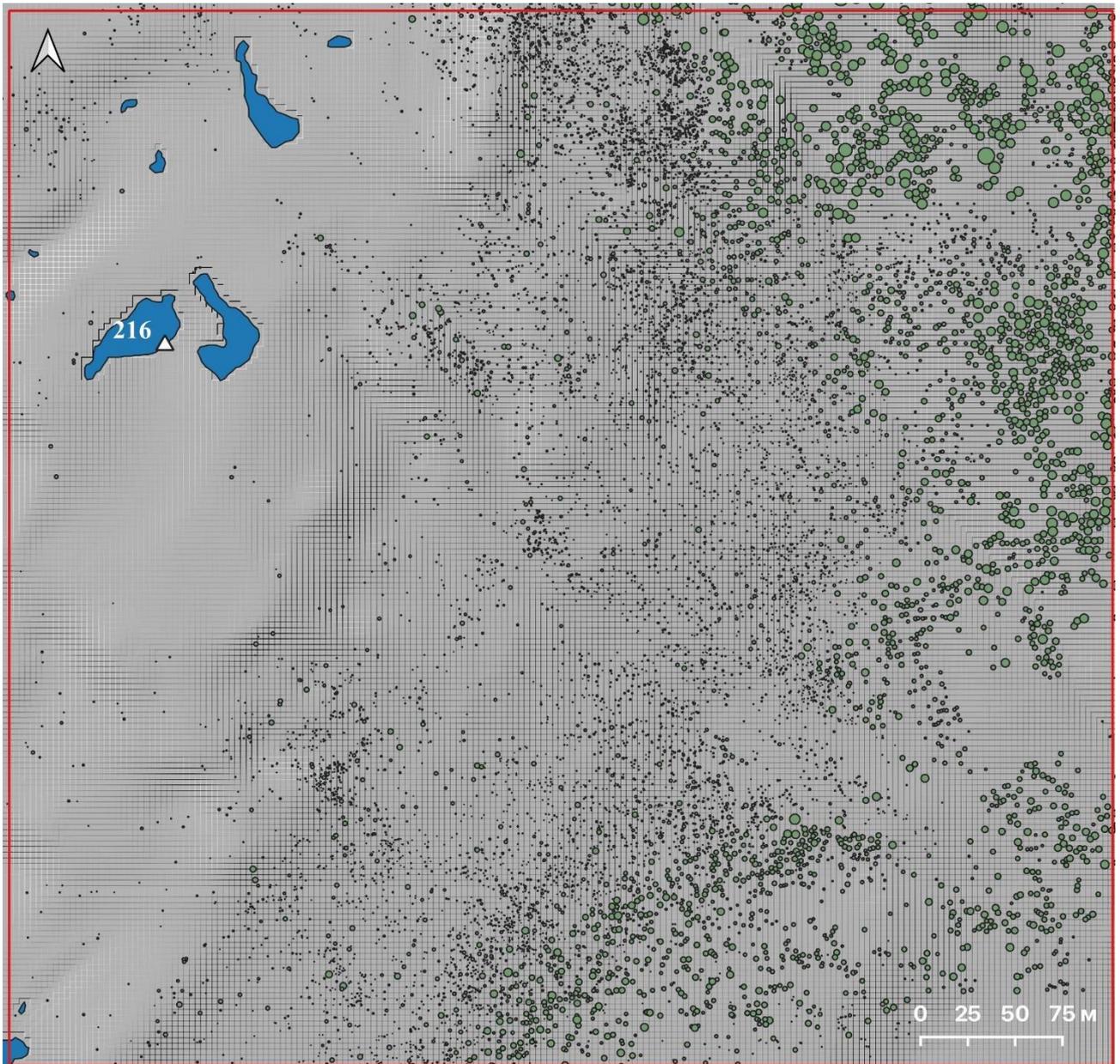


Рисунок 3.6 – Участок района исследований лиственницы сибирской и кронами, обозначенный на рисунке 2.5 прямоугольником с границей в виде линии красного цвета. Окружностями зеленого цвета обозначены кроны экземпляров лиственницы сибирской. Картограмма дает представление об изменении размера кроны в градиенте высоты местности (в направлении от юго-востока на северо-запад)

Выделение возрастных поколений лиственницы по радиусу кроны позволяет оценить процесс экспансии лиственницы сибирской в горную тундру в ходе современного потепления, который наблюдается в районе исследований с конца XIX – начала XX вв. (Шиятов и др., 2005).

На рисунке 3.7 приведена картосхема, созданная на основе методики реконструкции возрастных поколений лиственницы сибирской. Все полигоны векторного слоя крон были разделены на три группы по возрастным интервалам (1–10, 11–40 лет и свыше 40 лет) по величине радиуса кроны. Общее количество распознанных экземпляров лиственницы – 88608 шт., из них 16980 особей, возраст которых не превышает 10 лет. Количество экземпляров лиственницы с возрастом, лежащим в интервале 11–40 лет, составляет 51740, а с возрастом 40 и более лет – 19888 шт.

На данном рисунке можно видеть, что наибольшее количество экземпляров лиственницы, отнесенного к возрастному интервалу 1–10 лет (точки желтого цвета), окружены деревьями, относящимися к возрастным интервалам 11–40 и свыше 40 лет. Это можно объяснить тем, что деревья старшего возраста являются источниками обсеменения территории и служат защитой молодого поколения лиственницы от негативного воздействия снеговой корразии деревьями более крупного размера.

Приведенная на рис. 3.7 картосхема подтверждает ранее сделанное заключение на основе обработки современного космического снимка (Fomin et al. 2020) о том, что взрослые деревья в настоящее время еще не достигли некоторых участков исследуемой территории, на которых произрастали деревья в прошлом. Пространственное разрешение снимков, полученных с помощью беспилотного летательного аппарата, превосходит пространственное разрешение использованного ранее космоснимка (Fomin et al., 2020). Поэтому на космоснимке было невозможно обнаружить небольшие по размерам деревья, относящиеся к молодым поколениям лиственницы сибирской.

Необходимо отметить следующие особенности дешифрирования деревьев на аэроснимках, полученных при помощи беспилотного летательного аппарата, которые могут влиять на определение местоположения молодых экземпляров лиственницы. Кроны деревьев могут закрывать от наблюдателя молодые экземпляры лиственницы. Как правило, на участках, где находятся крупные взрослые деревья (нижняя часть экотона), хорошо развит живой напочвенный покров,

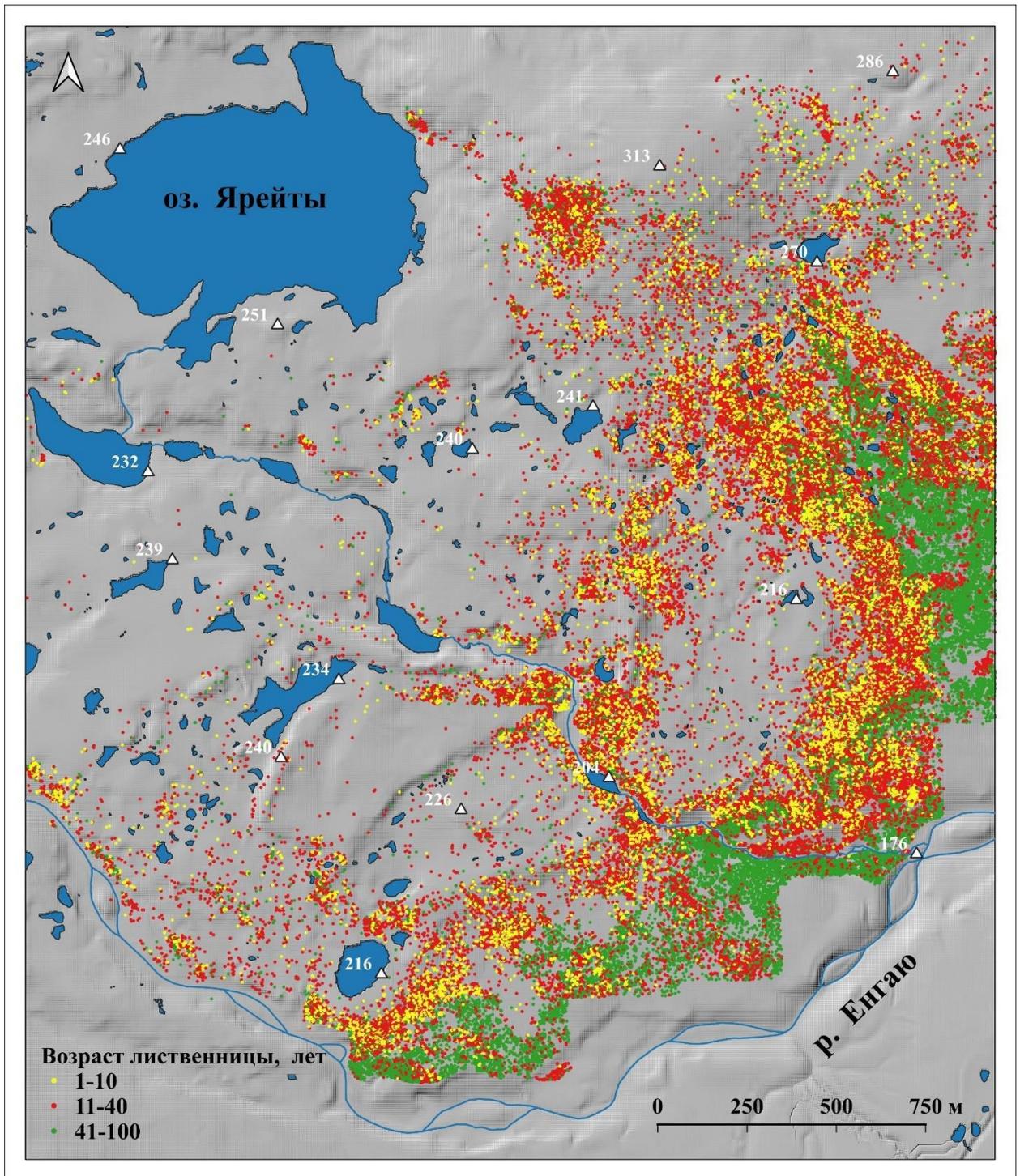


Рисунок 3.7 – Картограммы распределения деревьев лиственницы сибирской по трем интервалам возраста: 1–10, 11–40, и свыше 40 года

включающий кустарниковый ярус из карликовой березы (*Betula nana* L.) и зеленые мхи. Естественное возобновление лиственницы на таких участках затруднено из-за того, что семена очень часто не могут попасть на минерализованный слой почвы, а сеянцы испытывают сильное конкурентное воздействие со стороны дру-

гих видов растений из нижних ярусов растительности.

Вопрос количественной оценки выживаемости деревьев молодого поколения лиственницы требует дальнейшего изучения. В последние годы кроме тенденции положительного влияния регионального потепления климата наблюдается тенденция к возрастанию негативного воздействия биотических факторов, влияние которых на лиственницу ранее было незначительно. Это относится к воздействию фитопатогенов (шютте лиственницы) и грызунов, а также антропогенных воздействий, в первую очередь, связанных с увеличением частоты выпаса северных оленей на данной территории (Fomin et al., 2021).

Соотношение количества экземпляров лиственницы с возрастом от 11 до 40 лет к количеству особей с возрастом до 10 лет включительно составляет 3,04. Такое соотношение может свидетельствовать о том, что среднее количество особей по десятилетиям за последние 40 лет остается примерно на одном уровне и соответствует количеству особей самого молодого поколения.

Глава 4. Количественная оценка депонирования углерода лиственницей сибирской в XX – начале XXI вв.

Древесные растения являются одним из важных регуляторов глобального цикла углерода, выполняя функцию его долговременного биологического резервуара, т. к. они способны связывать атмосферный углекислый газ посредством фотосинтеза и аккумулировать его в форме органического вещества в стволовой древесине, в ветвях, корнях, хвое или листве. В условиях ратификации международных климатических соглашений, таких как Парижское соглашение (Paris Agreement ..., 2015), точный учет пула и потоков углерода становится обязательным элементом национальной отчетности. О важности климаторегулирующей функции лесов в рамках осуществления государственной политики Российской Федерации в области достижения углеродной нейтральности свидетельствует ряд принятых в последние годы нормативно-правовых актов РФ (Указ Президента Российской Федерации № 666, 2020; Федеральный закон № 296-ФЗ, 2021; Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации ..., 2021; О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов ..., 2022; О плане мероприятий («дорожной карте») ..., 2022; Указ Президента Российской Федерации № 812, 2023; Федеральный закон № 492-ФЗ, 2024).

К основным задачам климатической политики Российской Федерации, приведенным в разделе 32 Указа Президента РФ № 812 «Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации» (2023), в пункте «г» предусмотрена реализация климатических проектов как комплекса мероприятий, которые обеспечивают увеличение поглощения выбросов парниковых газов. Федеральным законом от 26.12.2024 г. № 492-ФЗ «О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации» (2024) в ст. 662 в п. 2 дается определение лесоклиматического проекта как климатического проекта, реализуемого в лесах, находящихся на землях лесного фонда и землях иных категорий, кроме земель сельскохозяйственного назначения.

В Федеральном законе № 492-ФЗ в п. 2 ст. 663 устанавливаются условия реализации лесоклиматических проектов, которые предусматривают осуществление мероприятий по сохранению лесов, направленных на сокращение (предотвращение) выбросов и увеличение поглощения парниковых газов, если эти мероприятия по сохранению лесов являются дополнительными к тем, которые уже осуществляются лицами, использующими леса или на которых возложена обязанность по осуществлению этих мероприятий.

Участки горных массивов, на которых наблюдается климатогенно обусловленная экспансия древесной растительности в горную тундру, потенциально могут быть использованы для реализации лесоклиматических проектов при условии проведения на этих участках мероприятий, обеспечивающих сохранение лесных и лесотундровых экосистем.

Продуктивность лиственничных редколесий вблизи верхнего предела произрастания древесной растительности относительно невелика, т. к. они находятся в экстремальных почвенно-климатических условиях с коротким вегетационным периодом. При этом площадь таких лиственничников на горных массивах достаточно велика, поэтому совокупный запас углерода, накопленный в них, может быть большим. Кроме того, в этих условиях разложение мертвой древесины происходит очень медленно, поэтому эмиссия углерода также растянуто во времени. Следовательно, изучение углероддепонирующей функции лиственничных редколесий позволяет количественно оценить их вклад в цикл углерода в лесных и лесотундровых экосистемах в условиях климатических изменений и деградации вечной мерзлоты.

Процессы деградации вечной мерзлоты способны превратить наземные экосистемы в новые источники парниковых газов (Brown et al., 2000; Лейбман, 2001; Шполянская, 2010; Moskalenko, 2013; Valdayskikh et al., 2013; Каверин и др., 2014; Бедулина и др., 2020). В этом контексте количественная оценка пула углерода в древесине является важным для понимания баланса эмиссии и депонирования парниковых газов в лесных и лесотундровых экосистемах.

Количественная оценка депонирования углерода лиственными древостоями представляет собой комплексную задачу, объединяющую методы наземной таксации, математико-статистического моделирования и дистанционного зондирования. Ее практическая значимость обусловлена необходимостью точного учета запаса фитомассы и углерода в древесных растениях на обширных и труднодоступных участках лесных и лесотундровых экосистем. Для перехода от измерений отдельных деревьев к оценке на уровне ландшафта критически важными являются модели, устанавливающие зависимость между параметрами, измеряемыми дистанционно, и таксационными показателями, по которым возможна оценка запаса фитомассы.

Высокую применимость в этом контексте демонстрируют уравнения, связывающие диаметр шейки корня с радиусом максимальной горизонтальной проекции кроны дерева. Такие модели, построенные на данных, полученных в ходе прямых наземных измерений, позволяют использовать одно из ключевых преимуществ современных данных дистанционного зондирования земли – высокое пространственное разрешение, позволяющее проводить количественную оценку радиуса максимальной горизонтальной проекции кроны лиственницы по материалам аэрофотосъемки при помощи беспилотного летательного аппарата. После распознавания проекций кроны и определения их радиусов созданные модели дают возможность рассчитать некоторые биометрические параметры лиственницы, например, диаметр шейки корня, для каждого распознанного экземпляра.

На основе данных полевых измерений, устанавливающих зависимость между диаметром у корневой шейки и радиусом проекции кроны, было проведено сравнение количественной и качественной адекватности, а также прогностических возможностей моделей, основанных на следующих методах: 1) алгоритма машинного обучения «случайный лес» (Random Forest); 2) ансамбля моделей машинного обучения; 3) нелинейной регрессионной модели следующего вида (1):

$$y = 13,463x^{1,185}, R^2 = 0,960, \quad (1)$$

где y – диаметр ствола в коре у шейки корня (м);

x – радиус кроны (м).

При создании модели на основе ансамблевого алгоритма «случайный лес» был использован пакет R «randomForest». С целью повышения точности прогноза был сформирован комбинированный ансамбль моделей (пакет «caretEnsemble»), включающий метод бутстрэп-агрегирования деревьев решений («threebag») и две модификации метода «случайного леса» (библиотеки «rf» и «parRF»). Качество моделей на этапе обучения оценивали по комплексу метрик: коэффициента детерминации (R^2); средней квадратичной ошибки (MSE); корня из средней квадратичной ошибки (RMSE); средней абсолютной ошибки (MAE). Финальная валидация на тестовой выборке проведена с использованием пакета «Metrics».

Сравнительная оценка показателей моделей представлена в таблице 4.1. Анализ данных, представленных в ней, свидетельствует о высоком уровне количественной адекватности всех трех тестируемых моделей, что подтверждается значениями перечисленных выше метрик.

Таблица 4.1 – Статистические показатели регрессионных моделей взаимосвязи диаметра ствола на высоте корневой шейки и проекционного радиуса кроны лиственницы сибирской

Название модели	Статистическая характеристика			
	средняя абсолютная ошибка	среднеквадратичная ошибка	корень из средней квадратичной ошибки	коэффициент детерминации
«Случайный лес»	0,381	0,615	0,785	0,967
Ансамбль моделей	0,374	0,592	0,769	0,968
Модель нелинейной регрессии $y = 13,463x^{1,185}$	0,536	1,482	1,217	0,960

Статистические показатели, характеризующие алгоритмы машинного обучения: ансамбля моделей и «случайный лес», демонстрируют несколько более высокую количественную адекватность по сравнению с параметрической нелинейной регрессионной моделью.

При этом ограничением моделей машинного обучения является их низкая экстраполяционная способность вне предела обучающей выборки, т. е. слабая

применимость для прогнозирования за пределами диапазона данных, на которых они были обучены (Mikhailovich et al., 2025). При попытке предсказания для значений предиктора (независимой переменной), выходящих за границы обучающей выборки, такие модели, как правило, воспроизводят усредненные или предельные теоретические значения целевой переменной, что ведет к значительным и плохо контролируемым ошибкам.

В контексте нашего исследования это ограничение является критическим. Экстраполяция на основе параметрической нелинейной регрессионной модели в данном случае оказывается методологически более предпочтительной.

Таким образом, хотя статистические метрики моделей машинного обучения лучше, чем модель нелинейной регрессии (внутри диапазона обучающих данных), их непригодность для экстраполяции делает модель параметрической нелинейной регрессии более предпочтительной по сравнению с другими использованными моделями.

На рисунке 4.1 представлен график зависимости измеренных (обозначены точками) и теоретических (линия) значений диаметра ствола у шейки корня от радиуса кроны экземпляров лиственницы сибирской на пробных площадях, рассчитанных при помощи модели нелинейной регрессии.

Наложённая линия регрессии и коэффициент детерминации, указанный на рисунке 4.1, количественно характеризуют силу выявленной аллометрической зависимости, что является основой для последующего масштабирования методики на уровень лиственничных редколесий.

Для расчета сухой фитомассы лиственницы сибирской, включая ее надземную и подземную части, были использованы региональные аллометрические модели, выбранные с учетом соответствия условиям произрастания на Полярном Урале (Мазепа, Шиятов, 2014; Devi et al., 2020):

$$p_a = 2005,2 * y^{2,5631}, R^2 = 0,983 \quad (2)$$

$$p_b = 1700,7 * y^{2,7923}, R^2 = 0,983, \quad (3)$$

где p_a и p_b – абсолютно сухая надземная и подземная фитомасса, кг;

y – диаметр ствола в коре у шейки корня, м.

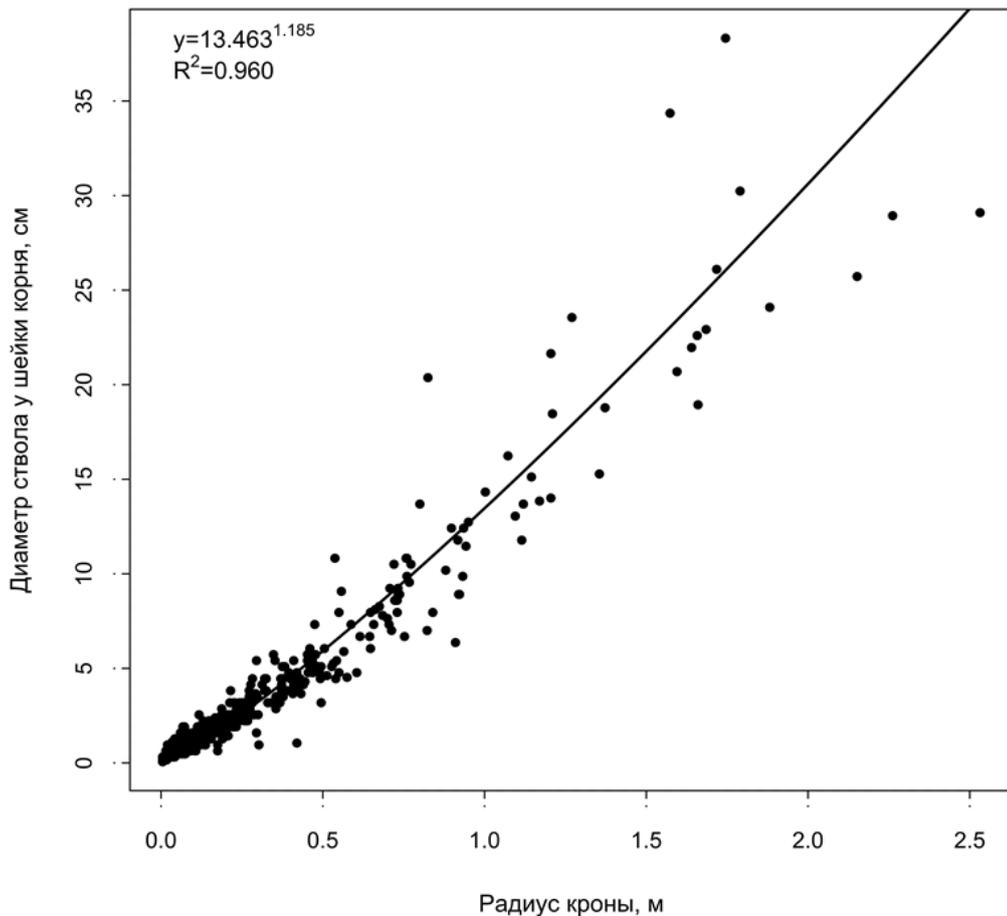


Рисунок 4.1 – График зависимости измеренных (обозначены точками) и теоретических (линия) значений диаметра ствола у шейки корня от радиуса кроны экземпляров лиственницы сибирской на пробных площадях

Оценка величины углерода, депонированного в биомассе лиственницы сибирской, проведена в два этапа с использованием стандартных биогеохимических коэффициентов.

На первом этапе величина абсолютно сухой фитомассы (надземной и подземной), переводилась в массу химического элемента углерода. Согласно методическим рекомендациям (Распоряжение Минприроды России от 30.06.2017 № 20-р, 2021), конверсионные коэффициента для расчета запаса углерода в фитомассе лиственницы в зависимости от возраста варьирует от 0,423 до 0,523. В расчетах использовали значение коэффициента 0,5 (50 %), широко принятый в международной и отечественной практике для хвойных видов, поскольку примерно половина сухого органического вещества древесных растений состоит из углерода (Ко-

стоусова и др., 2025; Михайлович и др., 2025).

На втором этапе для оценки климаторегулирующей функции лиственничных редколесий и перевода полученных значений в универсальные экологические единицы была рассчитана масса эквивалентного углерода углекислого газа (CO_2 – эквивалента). Использовался стехиометрический коэффициент 3,667, полученный из отношения молекулярных масс углекислого газа (44 г/моль) и атомарного углерода (12 г/моль) по формуле (4):

$$\frac{CO_2}{C} = \frac{44}{12} = 3,667. \quad (4)$$

Таким образом, одна тонна углерода, запасенная в биомассе, соответствует примерно 3,67 тонн CO_2 из атмосферы.

Данный подход, основанный на консервативных и общепринятых коэффициентах, обеспечивает сопоставимость результатов оценки углеродного депонирования с данными других исследований и позволяет интегрировать их в системы углеродного учета регионального и национального уровня.

В рамках исследования была реализована комплексная методика оценки фитомассы и углеродного пула, основанная на каскадном применении математических моделей. Исходными данными послужили результаты дешифрирования 88608 экземпляров лиственницы сибирской. Для каждого дерева по данным о радиусе кроны с помощью, полученной нелинейной регрессионной модели (1), был оценен диаметр ствола у шейки корня.

Полученные значения диаметра ствола у шейки корня стали входными параметрами для аллометрических уравнений расчета фитомассы. Надземная фитомасса определялась по уравнению (2), а подземная (корневая) фитомасса – по уравнению (3), которые были разработаны для лиственницы сибирской в условиях рассматриваемого района исследований. Сумма этих компонентов составляет общую фитомассу для каждого дерева.

На завершающем этапе осуществлен перевод биометрических показателей в величину депонированного углерода. Для этого общая фитомасса переведена в запас углерода с использованием стандартного углеродного коэффициента по формуле (4). Итоговые суммарные значения запаса фитомассы лиственницы сибирской и содержания углерода в ней на всей исследуемой территории представлены в таблице 4.2. Величина CO₂-эквивалента (углеродных единиц) на исследуемой территории составляет 2485 ± 184 тонны.

Таблица 4.2 – Расчетные значения величины фитомассы и углерода лиственничных древостоев в районе исследований

Прогнозируемая величина и интервальная оценка параметра	Фитомасса, т			Содержание углерода, т		
	Надземный пул	Подземный пул	Совокупная	Надземный пул	Подземный пул	Совокупная
Расчетное значение	834,6	520,6	1355,2	417,3	260,3	677,6
Нижний порог	776,6	480,8	1257,4	388,3	240,4	628,7
Верхний порог	895,3	562,6	1457,3	447,6	281,3	728,9

Использование набора уравнений (2) и (3), разработанных коллективом исследователей (Мазепа, Шиятов, 2014; Devi et al., 2020), в сочетании с нелинейной регрессионной моделью $y = 13,463x^{1,185}$ позволило провести оценку фитомассы всех экземпляров лиственницы сибирской, распознанных на ортофотоплане.

В соответствии с результатами, описанными в главе 3, деревья лиственницы

сибирской, распознанные на снимках высокого разрешения, были распределены по трем возрастным интервалам в зависимости от радиуса крон. Анализ распределения числа деревьев в соответствии с запасами фитомассы и углерода выявил существенную разницу количественного распределения по возрастным интервалам.

Первый возрастной интервал (1–10 лет) включил в себя 19,3 % от общего количества распознанных деревьев. Однако вклад в общую фитомассу является минимальным и составляет лишь 0,13 % от суммарного расчетного значения, что объясняется незначительной биомассой молодых особей.

Второй возрастной интервал (от 11 до 40 лет) является наиболее многочисленным, объединяя более половины всех учтенных деревьев – 58,2 %. Несмотря на доминирование по количеству, накопленная фитомасса в этой группе достигает только 6,5 % от общего расчетного запаса.

Третий возрастной интервал (более 40 лет) составляет 22,5 % от общего числа распознанных деревьев, однако именно на нее приходится подавляющая часть фитомассы, соответственно, и запаса углерода. Деревья, отнесенные к этому возрастному интервалу, аккумулируют 93,37 % от общего рассчитанного значения фитомассы. Полученные результаты свидетельствуют о ключевой роли лиственных редколесий, достигших возраста более 40 лет в накоплении фитомассы и углерода соответственно.

Картосхемы, описывающие некоторые биометрические характеристики для лиственницы сибирской на пробных площадях в ходе прямых измерений представлены в приложении А. Под литерой (а) – высота; (б) – диаметр шейки корня; (в) – фитомасса (надземная и подземная); (г) – возраст.

Предлагаемый подход к количественной оценке депонирования углерода редкостойными лиственничниками вблизи верхнего предела произрастания древесной растительности, разработанные в его рамках методики, обеспечивают повышение объективности и точности оценки запасов углерода и, соответственно, позволяют более точно оценить стоимость депонированного углерода.

В настоящее время на глобальном рынке функционирует около десяти спе-

циализированных бирж и торговых платформ, осуществляющих операции с углеродными единицами и иными производными финансовыми инструментами, связанными с выбросами парниковых газов.

Экономическая стоимость рассчитанного объема депонированного углерода определяется исключительно рыночными механизмами и не является фиксированной. Итоговая экономическая оценка экосистемной услуги, связанной с депонированием углерода, будет зависеть от конъюнктуры рынка углеродных единиц.

Заключение

Древесная растительность близи верхнего предела ее произрастания является чувствительным индикатором изменений в климатической системе. В районе исследований, расположенном на юго-восточном макросклоне горного массива Рай-Из (Полярный Урал, Ямало-Ненецкий автономный округ, Россия), проведены исследования климатогенной пространственно-временной динамики лиственницы сибирской *Larix sibirica* Ledeb.

С использованием данных, полученных в результате прямых наземных измерений биометрических параметров лиственницы сибирской на девяти пробных площадях, заложенных в градиенте густоты в экотоне верхней границы древесной растительности, разработаны математико-статистические модели: взаимосвязи диаметра ствола у шейки корня от радиуса максимальной горизонтальной проекции кроны; количественной оценки вероятности отнесения экземпляра лиственницы к одному из трех возрастных интервалов: 1–10; 11–40 и свыше 40 лет.

На основе данных распознавания 88608 крон лиственницы сибирской на RGB-снимках, полученных при помощи беспилотного летательного аппарата, создана картосхема распределения экземпляров лиственницы сибирской на исследуемой территории, в том числе по трем возрастным интервалам. Полученные данные свидетельствуют об активном процессе экспансии молодого поколения лиственницы вверх в горную тундру на необлесенные или слабо облесенные участки склона.

На основе количественной оценки значений радиуса крон лиственниц по аэроснимкам с использованием системы аллометрических уравнений количественной оценки надземной и подземной фитомассы лиственницы сибирской, а также уравнения расчета диаметра ствола у шейки корня по радиусу кроны проведена количественная оценка запасов фитомассы и углерода как для каждого распознанного на аэроснимках экземпляра лиственницы, так и всей их совокупности в районе исследований. Установлено, что в экотоне верхней границы древесной растительности на участке площадью 7,32 км² величина общей фитомассы, со-

держания углерода и CO_2 -эквивалента составляет соответственно: $1355,2 \pm 0,1$; $677,6 \pm 0,5$ и $2485,5 \pm 1,83$ тонн. Распределение запаса фитомассы и содержания углерода в лиственнице по трем возрастным интервалам 1–10; 11–40 лет и свыше 40 лет составляет соответственно: $1,76 \pm 0,10$ и $0,88 \pm 0,50$; $88,09 \pm 0,10$ и $44,04 \pm 0,50$; $1265,35 \pm 0,01$ и $632,68 \pm 0,50$ тонн. В процентах соотношение фитомассы по возрастным интервалам следующие: 0,13, 6,5 и 93,37.

Предлагаемый подход и разработанные в ходе исследований модель количественной оценки диаметра ствола у шейки корня (входного параметра аллометрических уравнений оценки надземной и подземной фитомассы лиственницы сибирской) по радиусу максимальной горизонтальной проекции ее кроны в сочетании с разработанными методиками реконструкции возрастных поколений лиственницы сибирской и их картирования на основе результатов дешифрирования RGB-снимков, полученных с использованием беспилотного летательного аппарата открывают возможности для проведения количественной оценки запаса углерода в редкостойных лиственничных древостоях вблизи верхнего предела произрастания древесной растительности на юго-восточном макросклоне горного массива Рай-Из.

Предлагаемый подход к созданию методики реконструкции возрастных поколений лиственницы сибирской может быть использован для создания аналогичных методик для реконструкции возрастных поколений как редкостойных лиственничных, так редкостойных древостоев другого видового состава на горных массивах в других регионах нашей страны и за рубежом.

Результаты проведенных исследований как в части, касающейся предлагаемого подхода, разработанных моделей и методик, так и в части, относящейся к получению количественных оценок запаса фитомассы и углерода в лиственничных древостоях в районе исследований, в том числе по возрастным интервалам могут быть использованы при проведении экологического мониторинга, создании и ведении лесоклиматических проектов.

Список сокращений и условных обозначений

БПЛА – беспилотный летательный аппарат

ГИС – геоинформационная система

ПП – пробная площадь

ЭВГДР – экотон верхней границы древесной растительности

ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли

ИИ – искусственный интеллект

Библиографический список

Аванесов, Г. А. Исследование Земли из космоса начало пути / Г. А. Аванесов, А. С. Селиванов // Исследование Земли из космоса. – 2010. – № 1. – С. 8–12.

Агапитов, Е. М. Методика распознавания лиственницы сибирской на верхнем пределе ее произрастания на полярном Урале с использованием снимков беспилотного летательного аппарата / Е. М. Агапитов, В. Е. Рогачев, А. П. Михайлович, В. В. Фомин // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России : материалы XVIII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2022. – С. 7–11.

Агапитов, Е. М. Оценка использования мобильного приложения для оптимизации полетных заданий беспилотного летательного аппарата для целей экологического мониторинга / Е. М. Агапитов, В. Е. Рогачев, Е. А. Пряничникова, В. В. Фомин // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов : сборник материалов Всероссийской научной конференции (с международным участием) аспирантов и обучающихся. – Донецк : Донецкий национальный технический университет, 2024. – С. 165–167.

Агафонов, Л. И. Влияние гидрологического и температурного режимов на радиальный прирост лиственных деревьев в пойме Нижней Оби / Л.И. Агафонов // Экология. – 1995. – № 6. – С. 436-443.

Агафонов, Л. И. Особенности влияния гидрологического режима рек на радиальный прирост деревьев в условиях Субарктики / Л. И. Агафонов // Новые методы в дендрэкологии : материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. – Иркутск : Институт географии им. В. Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук, 2007. – С. 165–167.

Акатова, Ю. С. Некоторые итоги изучения верхней границы леса Северного макросклона Западного Кавказа / Ю. С. Акатова // Экологические проблемы использования горных лесов : материалы II Международной научно-практической конференции. – Краснодар : Кубанский государственный университет, 2023. – С. 21–24.

Акифьева, Е. С. Диагностика состояния мостов с использованием беспилотных летательных аппаратов / Е. С. Акифьева, А. С. Нечушкин, В. В. Атапин // XLIX Самарская областная студенческая научная конференция : тезисы докладов. – Санкт-Петербург : ООО «Эко-Вектор», 2023. – С. 92–93.

Алисов, Б. П. Климат СССР : учебник / Б. П. Алисов. – Москва : Высш. школа, 1969. – 104 с.

Андреяшкина, Н. И. Оценка факторов флористического богатства сообществ на верхней границе леса на Полярном Урале / Н. И. Андреяшкина, Д. В. Веселкин // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. – 2019. – № 2(30). – С. 1–10.

Антропов, Н. А. История и перспективы развития беспилотных летательных аппаратов / Н. А. Антропов // Мавлютовские чтения : материалы XVII Всероссийской молодежной научной конференции. – Уфа : Уфимский университет науки и технологий, 2024. – С. 9–11.

Арцыбашев, Е. С. Тушение лесных пожаров с воздуха в Канаде и США / Е. С. Арцыбашев. – Москва : ЦБНТИлесхоз, 1977. – 28 с.

Афанасьев, А. А. Мониторинг популяции белого медведя в природном заповеднике «Медвежьи острова» / А. А. Афанасьев, Л. П. Корякина // Ресурсы дичи и рыбы: использование и воспроизводство : материалы IV Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. – Красноярск : Красноярский государственный аграрный университет, 2023. – С. 9–13.

Ахметьев, М. А. Климат в эпохи крупных биосферных перестроек / М. А. Ахметьев, А. Б. Герман, М. А. Жарков [и др.]. – Москва : Наука, 2004. – 299 с.

Баенова, Г. М. Использование алгоритмов компьютерного зрения для идентификации подвижных объектов / Г. М. Баенова, К. С. Агадилова, Ш. Ж. Сеилов [и др.] // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. – 2025. – № 1 (17). – С. 49–56.

Балакин, Д. С. Оценка погодичного изменения запаса фитомассы в возрастных группах лиственницы сибирской на Полярном Урале / Д. С. Балакин, С. О. Вьюхин, А. М. Громов [и др.] // Горные экосистемы и их компоненты : материалы

IX Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 300-летию Российской академии наук, 35-летию научной школы чл.-корр. РАН А.К. Темботова, 30-летию Института экологии горных территорий им. А. К. Темботова РАН. – Нальчик : Институт экологии горных территорий им. А. К. Темботова РАН, 2024. – С. 65–66.

Бартыш, А. А. Динамика верхней границы леса на склонах Серебрянского Камня (Северный Урал) / А. А. Бартыш, З. Я. Нагимов, А. С. Акулов [и др.] // Леса Урала и хозяйство в них. – 2006. – № 28. – С. 280–285.

Басманов, А. А. Картирование изменений лесопокрываемых площадей с использованием многолетних данных дистанционных спутниковых наблюдений / А. А. Басманов, М. И. Богачев, А. А. Григорьев // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященная Дню радио. – 2025. – № 1 (80). – С. 267–270.

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 [и др.] // Лесоведение. – 2012. – № 5. – С. 59–70.

Блануца, В. И. Геопространственный искусственный интеллект для географической экспертизы проектов регионального развития: три парадигмы // В. И. Блануца // Псковский регионологический журнал. – 2025. – Т. 21, № 1. – С. 3–21.

Бобров, Е. Из путешествия А. Гумбольда по России и его пребывание в Поволжье в 1820 г. / Е. Бобров // Гасырлар авазы – Эхо веков. – 2003. – № 3. – С. 188–197.

Большаков, В. Н. Институт экологии растений и животных УрО РАН: страницы полувековой истории / В. Н. Большаков, Ю. Л. Вигоров, П. Л. Горчаковский // Экология. – 1994. – № 3. – С. 98–102.

Борозда, А. В. Важнейшие направления развития современного производства беспилотных летательных аппаратов / А. В. Борозда, Т. В. Глабец // Стратегии устойчивого развития: социальные, экономические и юридические аспекты : материалы VI Всероссийской научно-практической конференции с международным

участием. – Чебоксары : Издательский дом «Среда», 2025. – С. 150–154.

Бурдуковский, А. И. Морфологические особенности *Linnaea borealis* L. в условиях Северного Прибайкалья / А. И. Бурдуковский, Е. В. Бухарова, М. В. Казаков // Символ науки: международный научный журнал. – 2016. – № 2–1 (14). – С. 17–21.

Бурков, В. Д. Применение методов дистанционного мониторинга в оптическом и СВЧ диапазонах на этапах моделирования лесных экосистем / В. Д. Бурков, М. В. Черемисин, В. С. Шалаев // Лесной вестник. – 2011. – № 7. – С. 41–49.

Буянов, М. С. История создания и развития беспилотных летательных аппаратов / М. С. Буянов, А. С. Фискевич, А. А. Федорченко, С. А. Гаранин // Специальная техника и технологии транспорта. – 2022. – № 14. – С. 13–25.

Быков, Н. И. Дендрохронологическая оценка изменений верхней границы леса в Алтае-Саянской горной стране / Н. И. Быков, А. В. Захарова, С. Г. Бабина // Современные достижения и проблемы в области изучения окружающей среды : материалы Всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием. – Барнаул : Алтайский государственный университет, 2014. – С. 14–16.

Бычкова, И. А. История развития аэрометодов в России в 1880–1950-х гг. / И. А. Бычкова // Метеорологический вестник. – 2010. – Т. 3, № 1. – С. 54–68.

В. В. Фомин, В. В. Разработка технологии автоматизированной оценки запаса углерода в древостоях с использованием беспилотных авиационных систем (БАС) / В. В. Фомин, В. Е. Рогачев, Е. М. Агапитов, Л. Е. Рогачев // Оптимизация лесопользования : материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием, посвященной 70-летию Почетного работника высшего образования, Заслуженного лесоведа России Залева Сергея Вениаминовича. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2023. – С. 211–217.

Василий Васильевич Сапожников // Литература Алтая : [сайт]. – URL: <https://project4346235.tilda.ws/page64488323.html> (дата обращения: 25.12.2025).

Васильев, К. В. Беспилотная авиация гражданского назначения: ключевые этапы становления / К. В. Васильев, Т. В. Наумова // Наука. Техника. Человек: ис-

торические, мировоззренческие и методологические проблемы. – 2023. – Т. 1, № 13. – С. 112–117.

Вахрушева, Н. В. Петрология и хромитоносность ультраосновного массива Рай-Из Полярный Урал / Н. В. Вахрушева, П. Б. Ширяев, А. Е. Степанов, А. Р. Богданова. – Екатеринбург : ИГГ УрО РАН, 2017. – 265 с.

Вахрушева, Н. В. Субщелочные базальтоиды в ультрамафитах массива Рай-Из (Полярный Урал) и их петрогенетическое значение / Н. В. Вахрушева, К. С. Иванов, В. Н. Пучков, П. Б. Ширяев // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2023. – Т. 509, № 2. – С. 208–214.

Виноградов, Б. В. Аэрокосмический мониторинг / Б. В. Виноградов. – Москва : Наука, 1984. – 320 с.

Владимиров, И. Н. Динамика верхней границы леса на Байкальском хребте / И. Н. Владимиров // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. – 2014. – Т. 10. – С. 46–56.

Владимиров, И. Н. Динамика верхней границы леса на Байкальском хребте / И. Н. Владимиров // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. – 2014. – Т. 10. – С. 46–56.

Воробьева, А. А. Дистанционное зондирование земли : учебно-методическое пособие / А. А. Воробьева. – Санкт-Петербург : СПбУ ИТМО, 2012. – 168 с.

Воронин, В. И. Тенденции динамики верхней границы леса в высокогорьях Северного Прибайкалья / В. И. Воронин, В. А. Осколков, В. А. Буянтуев, А. П. Сизых // Сибирский лесной журнал. – 2016. – № 4. – С. 77–85.

Вытовтов, А. В. К вопросу о создании беспилотных летательных аппаратов / А. В. Вытовтов, А. В. Калач, А. А. Сазанова, Ю. М. Лебедев // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2016. – № 2. – С. 87–91.

Вьюхин, С. О. Изменчивость радиального прироста лиственницы Гмелина на плато Путорана в пределах экотона лес – горная тундра / С. О. Вьюхин, А. А. Вьюхина, А. С. Тимофеев, А. А. Григорьев // Научное творчество молодежи – лес-

ному комплексу России : материалы XX Всероссийской (национальной) научно-технической конференции, Екатеринбург. – Екатеринбург : Уральский государственный лесотехнический университет, 2024. – С. 78–82.

Вьюхин, С. О. Радиальный рост лиственницы Гмелина на верхнем пределе распространения в Западной части плато Путорана / С. О. Вьюхин, А. А. Григорьев, Д. С. Балакин [и др.] // Лесоведение. – 2025. – № 3. – С. 349–358.

Герова, Н. В. Развитие и классификация беспилотных летательных аппаратов / Н. В. Герова, А. А. Максютенко // Инновационные технологии в науке и технике : сборник материалов II Научно-практической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань : ИП Коняхин А. В., 2024. – С. 126–130.

Горный, В. И. Обзор достижений последнего десятилетия в области применения спутниковых методов дистанционного зондирования при геологических и геофизических исследованиях / В. И. Горный, А. А. Тронин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9, № 5. – С. 116–132.

Горчаковский, П. Л. Антропогенные смещения верхней границы леса и их фитоиндикация / П. Л. Горчаковский, С. Г. Шиятов // Экология. – 1978. – № 5. – С. 5–17.

Горчаковский, П. Л. Библиографический справочник / П. Л. Горчаковский. – 3-е изд., доп. – Екатеринбург : «Гощивский», 2006 б. – 152 с.

Горчаковский, П. Л. Верхняя граница леса в лесах бореальной зоны СССР и ее динамика / П. Л. Горчаковский, С. Г. Шиятов // Ботанический журнал. – 1977. – Т. 62, № 11. – С. 1560–1571.

Горчаковский, П. Л. Верхняя граница леса как индикатор условий среды в высокогорьях / П. Л. Горчаковский, С. Г. Шиятов // Ландшафтная индикация и ее использование в народном хозяйстве. – 1979. – С. 92–93.

Горчаковский, П. Л. Развитие представлений о высотной поясности растительности в горах: от Гумбольдта до наших дней / П. Л. Горчаковский // Александр Гумбольдт и исследования Урала : материалы российско-германской конференции 20–21 июня 2002 г., Екатеринбург, Россия. – Екатеринбург : Урал. гос. пед.

ун-т, 2002. – С. 12–16.

Горчаковский, П. Л. Развитие представлений о зонально-поясной структуре растительного покрова Урала / П. Л. Горчаковский // Леса Урала и хозяйство в них: сборник научных трудов. – Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2006 а. – С. 3–8.

Горчаковский, П. Л. Физиономическая и экологическая дифференциация верхней границы леса на Северном Урале / П. Л. Горчаковский, С. Г. Шиятов // Записки Свердл. отд. Всесоюз. ботан. о-ва. – 1970. – Вып. 5. – С. 14–33.

Горчаковский, П. Л. Фитоиндикация условий среды и природных процессов в высокогорьях / П. Л. Горчаковский, С. Г. Шиятов. – Москва : Наука, 1985. – 208 с.

Горяйнов, М. С. История развития дистанционного зондирования как основного компонента географических информационных систем : специальность 07.00.10 «История науки и техники» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук : 07.00.10 / Горяйнов Максим Сергеевич. – Москва, 2006. – 23 с.

ГОСТ Р 57258–2016. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы беспилотные авиационные. Термины и определения / Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 ноября 2016 г. № 1674. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293750/4293750302.pdf> (дата обращения: 26.01.2026).

ГОСТ Р 59079–2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Типы данных дистанционного зондирования Земли из космоса / Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 октября 2020 г. № 766-ст. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/752/75231.pdf> (дата обращения: 26.01.2026).

ГОСТ Р 59080–2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Продукты обработки дан-

ных дистанционного зондирования Земли из космоса стандартные. Требования к составу и документационному описанию / Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 октября 2020 г. № 767-ст. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/752/75232.pdf> (дата обращения: 26.01.2026).

ГОСТ Р 59081–2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Продукты обработки данных дистанционного зондирования Земли из космоса (базовые). Требования к составу и документационному описанию / Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 октября 2020 г. № 768-ст. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/752/75254.pdf> (дата обращения: 26.01.2026).

ГОСТ Р 59083–2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Сервисы (услуги), предоставляемые потребителям с использованием данных дистанционного зондирования Земли из космоса. Обеспечение доступа потребителей к сервисам на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса / Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 октября 2020 г. № 770-ст. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/752/75230.pdf> (дата обращения: 26.01.2026).

ГОСТ Р 59084–2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Интеграция сервисов (услуг), предоставляемых потребителям с использованием данных дистанционного зондирования Земли из космоса, с картографическими веб-сервисами / Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 октября 2020 г. № 771-ст. – URL: <https://files.stroyinf.ru/-Data/752/75229.pdf> (дата обращения: 26.01.2026).

ГОСТ Р 59085–2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Руководство пользователя данными дистанционного зондирования Земли из космоса, получаемыми с косми-

ческих аппаратов радиолокационного наблюдения. Требования к структуре и содержанию / Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 октября 2020 г. № 772-ст. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/752/75250.pdf> (дата обращения: 26.01.2026).

ГОСТ Р 59086–2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Руководство пользователя данных дистанционного зондирования Земли из космоса, получаемых с космических аппаратов оптикоэлектронного наблюдения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне. Требования к структуре и содержанию / Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 октября 2020 г. № 773-ст. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/752/75251.pdf> (дата обращения: 26.01.2026).

ГОСТ Р 70032–2022. Национальный стандарт Российской Федерации. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Программное обеспечение обработки данных дистанционного зондирования Земли из космоса. Порядок разработки и распространения / Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 мая 2022 г. № 346-ст. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/779/77944.pdf> (дата обращения: 26.01.2026).

ГОСТ Р 70078–2022. Национальный стандарт Российской Федерации. Программно-аппаратный комплекс аэрофотографической съемки с использованием беспилотного воздушного судна. Технические требования / Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 апреля 2022 г. № 247-ст. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/777/77762.pdf> (дата обращения: 26.01.2026).

ГОСТ Р ИСО 5725-2–2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений / Постановление Госстандарта России от 23 апреля 2002 г. № 161-ст 2002 г. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200029976> (дата обращения: 26.01.2026).

Госьков, Е. А. Лазерное сканирование в исследовании структуры древостоев верхней границы леса на Южном Урале / Е. А. Госьков, Т. С. Воробьева, И. Б. Воробьев // Леса России и хозяйство в них. – 2022. – № 2 (81). – С. 4–10.

Грановитов, Е. А. История развития и анализ современных достижений в фотограмметрии и аэрофотосъемке / Е.А. Грановитов, А.И. Кривичев, И.А. Хабарова // Новые горизонты студенческой науки в условиях глобализации : материалы II Межрегиональной научно-практической конференции. – Элиста : Калмыцкий государственный университет им. Б. Б. Городовикова, 2022. – С. 979–984.

Гребенюк, А. Л. Возрастная структура и состав высокобонитетных сосновых лесов Прибайкалья / А. Л. Гребенюк, А. Г. Матвеева // Сибирский лесной журнал. – 2025. – № 3. – С. 45–55.

Григорьев, А. А. Структура и динамика древостоев верхней границы леса в западной части плато Путорана / А. А. Григорьев, Н. М. Дэви, В. В. Кукарских [и др.] // Экология. – 2019. – № 4. – С. 243–254.

Громов, А. М. Фитомасса сосны сибирской кедровой (*Pinus sibirica*) верхней границы леса в условиях Алтае-Саянского горно-таежного района / А. М. Громов, Д. С. Балакин, И. К. Гайсин, П. А. Моисеев // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России : материалы XIX Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2023. – С. 91–95.

Данные дистанционного зондирования Земли // Геопространственное агентство Иннотер : [сайт]. – URL: <https://innoter.com/services/dannye-dzz/> (дата обращения: 26.01.2026).

Дарижапов, Д. Д. Обработка интерферометрических данных, полученных с японского спутника ALOS PALSAR (радар с синтезированной аппаратурой) / Д. Д. Дарижапов, И. И. Кирбижекова, А. С. Леонов // Вестник ВГЛТУ. – 2010. – № 3. – С. 5–9.

Дворяшин, М. В. Лесная крупномасштабная аэрофотосъемка с вертолетов / М. В. Дворяшин, А. У. Кармазин. – Москва : Лесн. пром-сть, 1978. – 72 с.

Дедкова, Е. В. Дистанционное зондирование Земли / Е. В. Дедкова // Физика. Первое сентября. – 2015. – № 4. – С. 16–20.

Дейберт, А. И. Некоторые аспекты истории создания, развития и эксплуатации беспилотных летательных аппаратов / А. И. Дейберт, Д. И. Сагитов // Научный аспект. – 2024. – Т. 23, № 5. – С. 3176–3181.

Демаков, Ю. П. Диагностика устойчивости лесных экосистем : методологические и методические аспекты / Ю. П. Демаков. – Йошкар-Ола : Поволжский государственный технологический университет, 2000. – 416 с.

Депонирование углерода лиственницей сибирской в экотоне верхней границы древесной растительности на Полярном Урале / А. П. Михайлович, В. В. Фомин, Д. Ю. Голиков [и др.] // Экология. – 2025. – № 3. – С. 193–201.

Дешифрирование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) // Геопространственное агентство Иннотер : [сайт]. – URL: <https://innoter.com/services/tematicheskiiy-analiz/deshifrirovanie-dannykh-distantsionnogo-zondirovaniya-zemli-dzz/> (дата обращения: 20.12.2025).

Дзюба, В. В. Поиск параметра для надёжного перекрестного датирования кедра и лиственницы на верхней границе леса в Центральном Алтае / В. В. Дзюба, В. С. Мыглан, В. В. Баринов [и др.] // Эволюция биосферы и техногенез : материалы IV Всероссийской конференции, посвященной 300-летию РАН, 300-летию первой научной экспедиции под руководством Д. Г. Мессершмидта в Забайкалье. – Чита : ФГБУН Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук, 2024. – С. 25.

Доклад Постоянной комиссии по экологическим правам Совета при Президенте Российской Федерации по развитию гражданского общества и правам человека «Зеленый поворот» / Д. С. Бедулина, Е. А. Близначная, А. Л. Гусев [и др.] // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2020. – № 19–24 (342–347). – С. 31–157.

Другаков, П. В. Анализ архива спутниковых изображений Landsat на территории Горцецкого района за 1984–2018 годы / П. В. Другаков // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 3. – С. 152–

156.

Дэви, Н. Накопление биомассы в различных лесотундровых сообществах на Полярном Урале / Н. Дэви, В. Мазепа, Ф. Хагедорн // Криогенные ресурсы полярных регионов : Международная конференция: материалы, Салехард, 01–30 июня 2007 года. Том 2. – Салехард: Пушинский Научный центр РАН, 2007. – С. 72-74.

Дэви, Н. Накопление биомассы в различных лесотундровых сообществах на Полярном Урале / Н. Дэви, В. Мазепа, Ф. Хагедорн // Криогенные ресурсы полярных регионов : Международная конференция: материалы, Салехард, 01–30 июня 2007 года. Том 2. – Салехард: Пушинский Научный центр РАН, 2007. – С. 72-74.

Жуковский, В. Е. Национальный атлас России. Том 1. Общая характеристика территории / В. Е. Жуковский, А. Н. Краюхин, С. В. Кривое [и др.] // Геодезия и картография. – 2007. – № 11. – С. 18–26.

Журавлева, О. В. Дендроиндикация изменений природной обстановки на верхней границе леса в горах Алтая (на примере Алтая) / О. В. Журавлева. – Горно-Алтайск : Горно-Алтайский государственный университет, 2014. – 118 с.

Заварицкий, А. Н. Перидотитовый массив Рай-Из в Полярном Урале / А. Н. Заварицкий. – Москва ; Ленинград : Гос. науч.-технич. изд-во, 1932. – 221 с.

Замшин, В. В. История возникновения и развития аэрокосмических методов исследования Земли / В. В. Замшин // Geomatics. – 2014. – № 3. – С. 67–79.

Захарова, Н. И. Развитие методов и технических средств аэрофотосъемки сельскохозяйственных угодий с помощью беспилотных воздушных судов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса, 5.6.6. История науки и техники (технические науки) : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Захарова Наталья Ивановна. – Москва, 2024. – 215 с.

Золотарев, В. А. История создания и развития беспилотных летательных аппаратов / В. А. Золотарев, М. И. Санеев // Научное и образовательное пространство студенческой молодежи: ступени познания : сборник научных статей. – Пермь : Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской

Федерации, 2024. – С. 71–76.

Ибрагимова, С. А. История развития аэрокосмических методов в России / С. А. Ибрагимова // Исследования в области естественных наук и образования : сборник научных трудов. – Самара : Самарский государственный педагогический университет, 2006. – Т. 5. – С. 272–280.

Иванов, М. Н. Эволюция оледенения Полярного Урала в позднем голоцене / М. Н. Иванов. – Москва : Географический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, 2013. – 200 с.

Ивасенко, Е. Д. История развития беспилотных летательных аппаратов, применяемых в сельском хозяйстве / Е. Д. Ивасенко, А. Ю. Чуба // Актуальные вопросы науки и хозяйства: новые вызовы и решения : сборник материалов LV Студенческой научно-практической конференции. – Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2021. – С. 119–124.

Игнатъев, И. В. Исторические аспекты эволюции беспилотных летательных аппаратов и их классификация / И. В. Игнатъев, М. С. Любимов // Направления и перспективы развития образования в военных институтах войск национальной гвардии Российской Федерации : сборник научных статей XVI Международной научно-практической конференции. – Новосибирск : Новосибирский военный институт им. генерала армии И. К. Яковлева войск национальной гвардии Российской Федерации, 2024. – С. 172–177.

Изменение климата и ландшафтов за последние 65 миллионов лет (кайнозой: от палеоцена до голоцена) / под ред. А. А. Величко. – Москва : ГЕОС, 1999. – 260 с. – ISBN 5-89118-083-9.

Иоганн Георг Гмелин // Зональная научная библиотека Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина : [сайт]. – URL: https://lib.ideafix.su/rus/our_resources/exhibitions/newexhibitio/ex_travel_russian_ex/gmelin/ (дата обращения: 25.12.2025).

Исаченко, А. Г. Физико-географическое картирование. Часть 2 / А. Г. Исаченко. – Ленинград : Изд-во Ленингр. ун-та, 1960. – 232 с.

Исаченко, А. Г. Физико-географическое картирование. Часть 3 / А. Г. Исаченко. – Ленинград : Изд-во Ленингр. ун-та, 1961. – 268 с.

Истомов, С. В. Современная динамика верхней границы леса в горах Западного Саяна / С. В. Истомов // Актуальные вопросы изучения и охраны растительного мира. – 2005. – № 1. – С. 210–212.

Каверин, Д. А. Температурный режим тундровых почв и подстилающих многолетнемерзлых пород (Европейский северо-восток России) / Д. А. Каверин, А. В. Пастухов, Г. Г. Мажитова // Криосфера Земли. – 2014. – Т. 18, № 3. – С. 23–32.

Капралов, Д. С. Изменения в составе, структуре и высотном положении мелколесий на верхнем пределе их произрастания в горах Северного Урала / Д. С. Капралов, С. Г. Шиятов, П. А. Моисеев, В. В. Фомин // Экология. – 2006. – № 6. – С. 403–409.

Капралов, Д. С. Изучение пространственно-временной динамики верхней границы леса на Северном и Южном Урале ними : диссертация на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук : специальность 06.03.03 Агролесомелиорация и защитное лесоразведение, озеленение населённых пунктов, лесные пожары и борьба с ними : диссертация на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Капралов Денис Сергеевич. – Екатеринбург, 2007. – 148 с.

Карамергенов, Т. Т. Развитие БПЛА в предвоенный и военный периоды. Развитие БПЛА в Советском союзе. История развития БПЛА в США / Т. Т. Карамергенов, Б. М. Нагаев, Е. Т. Ескибаев, Н. К. Юрков // Надежность и качество: Труды международного симпозиума «Надежность и качество». Пенза : Пензенский государственный университет, – 2025. – Т. 2. – С. 364–368.

Кармазин, А. У. Вертолеты в лесном хозяйстве / А. У. Кармазин, Н. К. Таланцев. – Москва : Лесная пром-сть, 1974. – 120 с.

Келль, Н. Г. Значение аэрометодов в геолого-географических исследованиях / Н. Г. Келль // Доклад на XV Научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава и студентов Института, посвященного 90-летию со

дня рождения В. И. Ленина. – Ленинград : Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР Ленинградский орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горный институт им. Г. В. Плеханова, 1960. – 17 с.

Кирюхин, В. В. Создание первых беспилотных летательных аппаратов: от идеи до реализации / В. В. Кирюхин // Экстремальные ситуации, конфликты, социальное согласие : сборник материалов XXV Международной научно-практической конференции. – Москва : Академия управления МВД России, 2023. – С. 138–144.

Кладько, Ю. В. Радиальный рост древесных видов в условиях высокой антропогенной нагрузки г. Красноярска / Ю. В. Кладько, В. Е. Бенькова // Сибирский лесной журнал. – 2018. – № 4. – С. 49–57.

Клейменкин, Д. В. Автоматическая сегментация спутниковых снимков на базе сверточной нейронной сети / Д. В. Клейменкин // Электронный научный журнал «Дневник науки». – 2021. – № 5(53).

Козлов, А. А. Применение беспилотных летательных аппаратов в подразделениях МЧС России / А. А. Козлов, М. Ю. Гаручава, Д. В. Иванов, В. Ф. Юрьева // Безопасный и комфортный город : материалы VI Международной научно-практической конференции. – Орел : Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, 2023. – С. 568–571.

Коломейцев, А. Э. История создания и применения беспилотных летательных аппаратов военного назначения / А. Э. Коломейцев, А. А. Столяров, П. И. Попрядухин [и др.] // Информационная безопасность – актуальная проблема современности. Совершенствование образовательных технологий подготовки специалистов в области информационной безопасности. – 2020. – № 2–1 (13). – С. 305–312.

Копенков, В. Н. Дистанционное зондирование Земли геоинформационные системы / В. Н. Копенков, В. В. Сергеев, В. А. Сойфер, А. В. Чернов // Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. – 2017. – № 3(95). – С. 78–96.

Король, А. А. Дистанционное зондирование и мониторинг земель сельскохозяйственного назначения на Кубани: к истории вопроса / А. А. Король, А. В.

Суровенкова // Цифровая трансформация сельского хозяйства и аграрного образования : сборник материалов I Международной научно-практической конференции. – Краснодар : Новация, 2024. – С. 221–226.

Костоусова, Е. А. Количественная оценка прироста фитомассы лиственницы сибирской в экотоне верхней границы древесной растительности на Полярном Урале за период 2018–2023 гг. / Е. А. Костоусова, А. П. Михайлович, В. В. Фомин, Е. М. Агапитов, В. Е. Рогачёв, Е. С. Переходова, Е. Б. Коритняк, Д. Ю. Голиков // Экобиотех-2025 : материалы VIII Всероссийской конференции с международным участием. – Уфа : Уфимский федеральный исследовательский центр РАН, 2025. – С. 90.

Кофман, Г. Б. Рост и форма деревьев / Г. Б. Кофман. – Новосибирск : Наука ; Сиб. отделение, 1986. – 209 с.

Кочеткова, Н. Н. Состояние лесов Забайкальского горно-мерзлотного района и их количественная и качественная характеристика / Н. Н. Кочеткова, М. В. Баханова // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В. Р. Филиппова. – 2020. – № 2(59). – С. 168–175.

Кошкаров, А. Д. Климатогенная Динамика фитоценотического разнообразия в поясе верхней границы леса Западного Саяна за последние четыре тысячи лет / А. Д. Кошкаров, В. Л. Кошкарлова, И. Ю. Овчинников // Хвойные бореальной зоны. – 2019. – Т. 37, № 5. – С. 301–306.

Кропоткин Петр Алексеевич. Естественно-научные работы / составители Р. К. Баландин, В. А. Маркин, А. В. Бирюков. – Москва : «Наука», 1998. – 270 с.

Кузнецов, Г. А. Применение и перспективы развития беспилотных летательных аппаратов / Г. А. Кузнецов // Решетневские чтения. – 2009. – Т. 1. – С. 34–35.

Кукарских, В. В. Исследование связей различных параметров радиального прироста сосны с климатом / В. В. Кукарских, Л. И. Агафонов // Экология: от Арктики до Антарктики : материалы Всероссийской конференции молодых ученых. – Екатеринбург : Академкнига, 2007. – С. 154–162.

Курбанов, Э. А. Четыре десятилетия исследований лесов по снимкам Landsat / Э. А. Курбанов, О. Н. Воробьев, А. В. Губаев [и др.] // Вестник Поволж-

ского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2014. – № 1(21). – С. 18–32.

Кусов, В. С. История аэрофотосъемки в фотографиях: славянский вклад / В. С. Кусов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1992. – № 6. – С. 54–61.

Левкин, И. М. Возникновение и развитие космических систем изучения природных ресурсов Земли / И. М. Левкин // Клио. – 2007. – № 3(38). – С. 104–106.

Лейбман, М. О. Динамика слоя сезонного оттаивания пород и методика измерения его глубины в различных ландшафтах Центрального Ямала / М. О. Лейбман // Криосфера Земли. – 2001. – Т. 5, № 3. – С. 17–24.

Лесная энциклопедия: в 2-х т. / гл. ред. Г. И. Воробьев. – Москва : Сов. энциклопедия, 1985. – 563 с.

Лилеева, Т. А. История беспилотных летательных аппаратов / Т. А. Лилеева // История и перспективы развития транспорта на севере России. – 2024. – № 1. – С. 103–105.

Луганский, Н. А. Лесоведение и лесоводство. Термины, понятия, определения : учебное пособие / Н. А. Луганский, С. В. Залесов, В. Н. Луганский. – Екатеринбург : Уральский государственный лесотехнический университет, 2010. – 128 с.

Мазепа, В. С. Динамика верхней границы леса на Полярном Урале в связи с изменениями климата / В. С. Мазепа, С. Г. Шиятов // Вопросы географии. – 2014. – № 137. – С. 267–290.

Мазепа, В. С. Использование спектрального представления и линейной фильтрации стационарных последовательностей при анализе цикличности в дендрохронологических рядах / В. С. Мазепа // Дендрохронология и дендроклиматология. – Новосибирск : Академический научно-издательский и книгораспространительский центр «Наука», 1986. – С. 49–68.

Мазепа, В. С. Климатогенная динамика верхней границы леса на Полярном Урале за последние Полторы тысячи лет / В. С. Мазепа // Человек и Север: антро-

пология, археология, экология : материалы всероссийской конференции / Институт проблем освоения Севера СО РАН. Том 1. – Тюмень : Институт проблем освоения Севера СО РАН, 2009. – С. 342–346.

Мазепа, В. С. Климатогенная динамика верхней границы лиственничных редколесий на Полярном Урале за последние полторы тысячи лет / В. С. Мазепа, С. Г. Шиятов // Леса России и хозяйство в них. – 2015. – Вып. 4 (55). – С. 4–11.

Мазепа, В. С. Метод расчета индексов годичного прироста обобщенного дендроклиматологического ряда / В. С. Мазепа // Экология. – 1982. – № 3. – С. 21–27.

Мазепа, В. С. Пространственно-временная изменчивость радиального прироста хвойных видов деревьев в субарктических районах Евразии : диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук : специальность 03.02.08 Экология (по отраслям) : диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук / Мазепа Валерий Семенович. – Екатеринбург, 1998. – 38 с.

Максимова, К. М. Морфологические особенности *Pinus sibirica* на верхней границе леса хребта Борус Западного Саяна / К. М. Максимова, И. И. Куппер, П. И. Печерин // Экология России и сопредельных территорий : материалы XXVI Международной экологической студенческой конференции. – Новосибирск : Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2023. – С. 46.

Масталиева, В. А. Средства и технологии дистанционного зондирования Земли из космоса в науке, образовании, бизнесе / В. А. Масталиева // Актуальные тенденции и инновации в развитии российской науки : сборник научных статей. – Москва : Издательство «Перо», 2019. – С. 73–76.

Матвеев, С. М. Лесоводственный анализ насаждений лиственницы Гмелина в горах Путорана / С. М. Матвеев, Д. И. Гупалов // Лесные экосистемы в условиях меняющегося климата: проблемы и перспективы : материалы международной научно-технической юбилейной конференции, посвященной 100-летию кафедры лесоводства, лесной таксации и лесоустройства. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова, 2015. – С. 89–92.

Михайлов, Н. В. Моделирование ареалов потенциального распространения древесных пород на территории России с использованием методов машинного обучения / Н. В. Михайлов, С. А. Барталев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : материалы 23-й Международной конференции. – Москва : Институт космических исследований РАН, 2025. – С. 396.

Михайлович, А. П. Анализ пространственно-временной динамики древесной растительности на Полярном Урале во второй половине XX – начале XXI веков с использованием метода наземного фотомониторинга / А. П. Михайлович, В. В. Фомин // Известия Уфимского научного центра РАН. – 2017. – № 4–1. – С. 62–64.

Михайлович, А. П. Депонирование углерода лиственницей сибирской в экотоне верхней границы древесной растительности на Полярном Урале / А. П. Михайлович, В. В. Фомин, Д. Ю. Голиков, Е. М. Агапитов, В. Е. Рогачев, В. С. Мазепа // Экология. – 2025. – № 3. – С. 193–201.

Михайлович, А. П. Пространственно–временная динамика популяции лиственницы сибирской на верхнем пределе ее произрастания в нижнем течении рек Енга и Кердоманшор (Полярный Урал) в условиях изменения климата : диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук : специальность 1.5.15 Экология : диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Михайлович Анна Павловна. – Екатеринбург, 2022. – 146 с.

Михеева, А. И. Исследование изменений верхней границы леса по аэрокосмическим снимкам / А.И. Михеева // Геодезия и картография. – 2011. – № 1. – С. 31–36.

Моисеев, И. М. Формирование российской законодательной базы дистанционного зондирования земли из космоса. Проблемы и возможные решения / И. М. Моисеев // Земля из космоса: наиболее эффективные решения. – 2011. – № 11. – С. 112–119.

Нагимов, З. Я. Запасы надземной фитомассы и депонированного углерода в древостоях ели в высокогорьях Южного Урала / З. Я. Нагимов, А. А. Григорьев, Д. С. Балакин [и др.] // Сибирский лесной журнал. – 2025. – № 4. – С. 56–67.

Нагимов, З. Я. Особенности формирования фитомассы деревьев ели в верхней границе леса на горе Малый Иремель / З. Я. Нагимов, П. А. Моисеев, И. В. Шевелина, Т. С. Воробьева // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий : материалы XV Международной научно-технической конференции. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2024. – С. 208–214.

Назаров, А. Н. Динамика верхней границы леса и ледников Центрального и Восточного Алтая в голоцене / А. Н. Назаров, О. Н. Соломина, В. С. Мыглан // Доклады Академии наук. – 2012. – Т. 444, № 6. – С. 671.

Насуро, Е. В. Применение модульных нейронных сетей для классификации спутниковых данных / Е. В. Насуро // Проблемы информатизации и управления. – 2007. – Т. 4, № 22. – С. 99–103.

Не требовать от Бога: 300 лет назад в России начались регулярные наблюдения за погодой // Русское географическое общество : [сайт]. – URL: <https://rgo.ru/activity/redaction/articles/ne-trebovat-ot-boga-300-let-nazad-v-rossii-nachalis-regulyarnye-nablyudeniya-za-pogodoy/> (дата обращения: 15.02.2026).

Нефедова, М. В. Особенности внутриландшафтной дифференциации растительности зоны экотона верхней границы леса хребта Абишира-Ахуба / М. В. Нефедова // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции., Одесса Изд-во Черноморье , – 2006. – Т. 10, № 3. – С. 20–24.

Нефедова, М. В. Особенности растительности горного экотона верхней границы леса (на примере среднегорных и высокогорных ландшафтов Западного Кавказа) : монография / М. В. Нефедова, В. А. Шальнев. – Ставрополь : Изд-во Ставропольского гос. ун-та, 2009. – 151 с.

Нефедова, М. В. Особенности растительности экотона верхней границы леса Западного Кавказа / М. В. Нефедова, В. В. Мельничук, Е. А. Ляшенко // Естественные и технические науки. – 2014. – № 6 (74). – С. 58–61.

Норин, Б. Н. О комплексности и мозаичности растительного покрова лесотундры / Б. Н. Норин // Проблемы ботаники. – 1962. – Т. 6. – С. 161–171.

О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации : Федеральный закон от 26.12.2024 № 492-ФЗ // Официальный сайт Президента России : [сайт]. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/51550> (дата обращения: 06.03.2026).

О плане мероприятий («дорожной карте») развития организованной (биржевой) торговли на отдельных товарных рынках на 2023–2025 годы : Распоряжение Правительства РФ от 23.12.2022 № 4140-р // Официальный интернет-портал правовой информации : [сайт]. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202212280084?index=1> (дата обращения: 06.03.2026).

О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федерации : Федеральный закон от 06.03.2022 № 34-ФЗ : принят Государственной Думой 22.02.2022 : одобрен Советом Федерации 02.03.2022 // Официальный интернет-портал правовой информации : [сайт]. – URL: <https://www.zakonrf.info/doc-37201942/> (дата обращения: 06.03.2026).

О создании природного парка «Ингилор» : постановление Правительства Ямало-Ненецкого автономного округа от 31.07.2014 № 605-П // Кодекс : [сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/412380716> (дата обращения: 27.05.2025).

О сокращении выбросов парниковых газов : Указ Президента Российской Федерации № 666 : принят 4 ноября 2020 года // Официальный сайт Президента России : [сайт]. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45990> (дата обращения: 06.03.2026).

Об ограничении выбросов парниковых газов : Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ : принят Государственной Думой 01.07.2021 : одобрен Советом Федерации 07.07.2021 // Официальный интернет-портал правовой информации : [сайт]. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47013> (дата обращения: 06.03.2026).

Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации : Указ Президента Российской Федерации № 812 : принят 26 октября 2023 года // Официальный сайт Президента России : [сайт]. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/49910> (дата обращения: 06.03.2026).

Об утверждении методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов : Распоряжение Минприроды России от

30.06.2017 № 20-р (ред. от 20.01.2021) // Судебные и нормативные акты РФ : [сайт]. – URL: <https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-minprirody-rossii-ot-30062017-n-20-r/metodicheskie-ukazaniia-po-kolichestvennomu-opredeleniiu/prilozhenie-n-2/tablitsa-14/> (дата обращения: 09.03.2026).

Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года : Распоряжение Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р. // Официальный интернет-портал правовой информации : [сайт]. – URL: <http://static.government.ru/media/files/-ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtIpyzWfHaiUa.pdf> (дата обращения: 06.03.2026).

Овчинников, Д. М. Реконструкция изменений климата гор Алтая дендрохронологическими методами : диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук : специальность 25.00.25 Геоморфология и эволюционная география : диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук / Овчинников Дмитрий Викторович. – Иркутск, 2002 – 132 с.

Овчинникова, Н. Г. Понятие и история развития технологий дистанционного зондирования / Н. Г. Овчинникова, А. С. Примакова // Актуальные проблемы науки и техники : материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 95-летию Донского государственного технического университета. – Ростов-на-Дону : Донской государственный технический университет, 2025. – С. 1106–1107.

ОДМ 218.9.017–2019. Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по производству аэрофототопографических работ с использованием беспилотных летательных аппаратов в целях строительства и реконструкции автомобильных дорог. Распоряжение Федерального дорожного агентства от 29 июля 2019 № 1982-р. – URL: <https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/-uploaded-files/odm-2189017-2019.pdf> (дата обращения: 26.01.2026).

Опыт ведения лесного хозяйства и лесоустройства в Западной Сибири : сборник статей / отв. ред. Г. В. Крылов. – Новосибирск : [б. и.], 1962. – 99 с. :

Павлов, З. С. История развития беспилотных летательных аппаратов и их использование в современных условиях / З. С. Павлов, В. Г. Данилова // Динамика развития системы военного образования : материалы VI Международной научно-практической конференции. – Омск : Омский государственный технический университет, 2024. – С. 755–761.

Панова, Н. К. Динамика рРастительности и экологические условия на Полярной Урале в голоцене / Н. К. Панова, В. Янковска, О. М. Корона, Е. В. Зиновьев // Экология. – 2003. – № 4. – С. 248–260.

Пасецкий, В. М. Географические исследования декабристов / В. М. Пасецкий. – Москва : «Наука», 1977. – 183 с.

Патрушева, Т. В. Анализ изменения климата в высокогорьях Алтая на основе прироста древесных колец в верхней границе леса (на примере центрального Алтая) / Т. В. Патрушева, О. В. Останин // Экологические проблемы природопользования в Сибири : сборник научных трудов. – Барнаул : Алтайский государственный аграрный университет, 2010. – С. 42–45.

Пахарькова, Н. В. Изменчивость морфологических и экофизиологических признаков деревьев сосны сибирской на верхней границе леса в горах Западного Саяна / Н. В. Пахарькова, А. А. Калабина, Е. Е. Позднякова [и др.] // Горные экосистемы и их компоненты : материалы IX Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 300-летию Российской академии наук, 35-летию научной школы чл.-корр. РАН А. К. Темботова, 30-летию Института экологии горных территорий им. А. К. Темботова РАН. – Нальчик : Институт экологии горных территорий им. А. К. Темботова РАН, 2024. – С. 98–99.

Петрякова, В. В. Дистанционное зондирование земли / В. В. Петрякова // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сборник материалов XI Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики и 10-летию науки и технологий. – Красноярск : Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнева, 2025. – С. 1401–1403.

Петушкова, В. Б. История создания беспилотных летательных аппаратов / В. Б. Петушкова, С. О. Потапова // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2018. – Т. 1, № 9. – С. 713–717.

Плеханов, М. Е. Из истории применения беспилотных летательных аппаратов в военных конфликтах во второй половине XX – начала XXI веков / М. Е. Плеханов, А. М. Семенов, Ю. Л. Попов // Научный аспект. – 2023. – Т. 26, № 12. – С. 3207–3213.

Площадная, А. А. Основные области применения материалов ДЗЗ / А. А. Площадная, М. В. Быкова // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : сборник статей по материалам 80-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2024 год. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина, 2025. – С. 176–178.

Пограничная зона / Правительство ЯНАО : [сайт]. – URL: <https://yanao.ru/-region/pogranichnaya-zona/> (дата обращения: 23.12.2025).

Поздняков, А. А. Василий Васильевич Сапожников – ученый и путешественник: к 155 летию со дня рождения / А. А. Поздняков // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. – 2016. – №4 (43). – С. 89–92.

Полозова, Т. Г. Борис Анатольевич Тихомиров (к 100-летию со дня рождения) / Т. Г. Полозова // Растительность России. – 2009. – № 15. – С. 149–151.

Попов, А. С. Влияние мезоклимата и атмосферных промышленных загрязнений на радиальный прирост сосны обыкновенной. / А. С. Попов, В. В. Фомин, Ю. В. Шалаумова // Аграрный вестник Урала. – 2011. – № 4 (83). – С. 15–18.

Попов, Б. В. Перспективы развития космических систем дистанционного зондирования земли / Б. В. Попов // Радиочастотное планирование и электромагнитная совместимость : материалы IX межрегионального вебинара. – Саранск : Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, 2025. – С. 58–62.

Райзер, П. Я. Развитие аэрометодов в России и Советском Союзе / П. Я. Райзер // Академия наук СССР. – Москва : Изд-во Акад. наук СССР, 1963. – 64 с.

Редин, Д. Е. История и перспективы развития систем геоданных / Д. Е. Редин, И. Ю. Яценко, Е. Н. Прокофьева // Шаг в будущее: искусственный интеллект и цифровая экономика: Smart Nations: экономика цифрового равенства : материалы III Международного научного форума. – Москва : Государственный универси-

тет управления, 2020. – С. 18–23.

Рензьяев, А. О. Беспилотные летательные аппараты в агропромышленном комплексе: обзор истории и перспектив применения / А. О. Рензьяев, В. В. Лагошина // Актуальные научно-технические средства и сельскохозяйственные проблемы : материалы XI Национальной научно-практической конференции с международным участием. – Кемерово : Кузбасский государственный аграрный университет имени В. Н. Полецкого, 2023. – С. 197–201.

Ротанова, И. Н. Изменения климата Алтая за период инструментальных исследований / И. Н. Ротанова, Н. Ф. Харламова, О. В. Останин // Известия Алтайского государственного университета. – 2012. – № 3-2 (75). – С. 105–109.

Русакова, Е. А. Василий Докучаев: Масштаб личности (к 175-летию В. В. Докучаева) / Е. А. Русакова // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. – 2021. – № S1. – С. 84–155.

Савиных, В. В. Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования / В. В. Савиных, В. Я. Цветков. – Москва : Картгеоцентр – Геодезиздат, 2001. – 228 с.

Савчук, Д. А. Динамика верхней границы леса на Катунском хребте (Горный Алтай) за последние 120 лет / Д. А. Савчук, Е. Е. Тимошок, Е. О. Филимонова, С. А. Николаева // Экология. – 2023. – № 6. – С. 416–421.

Салемгараева, Л. Р. История развития аэрофотосъемки в России / Л. Р. Салемгараева // Актуальные проблемы геодезии, картографии, геоинформатики и кадастра : материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Уфа : Башкирский государственный университет, 2016. – С. 170–172.

Самойленко, Л. Г. Динамика внутриландшафтной дифференциации лесной растительности среднегорий Западного Кавказа (на примере Гондарайского ландшафта) / Л. Г. Самойленко, А. В. Лысенко // Естественные и технические науки. – 2024. – № 6(193). – С. 130–133.

Самойлович, Г. Г. Применение аэрофотосъемки и авиации в лесном хозяйстве : учебник / Г. Г. Самойлович. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Лесная промышленность, 1964. – 486 с.

Севко, О. А. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве : курс лекций / О. А. Севко. – Минск : БГТУ, 2005. – 168 с.

Сизых, А. П. Структура и тенденции формирования лесов юго-восточного побережья озера Байкал / А. П. Сизых, А. П. Гриценюк, А. И. Шеховцов, В. И. Воронин // География и природные ресурсы. – 2019. – № S5(159). – С. 33–37.

Симанько, В. В. Особенности радиального роста и структуры годичных колец лиственницы Гмелина на полуострове Таймыр и Котуйской возвышенности : диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук : специальность 03.02.08 Экология : диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Симанько Валентина Витальевна. – Красноярск, 2014. – 168 с.

Система представления планов полетов : [сайт]. – URL: <https://ivprf.ru/> (дата обращения: 23.12.2025).

Смирнов Н. Г. Истоки биологии на Урале : В.Н. Татищев и землепроходцы / Н. Г. Смирнов. – Екатеринбург : ИД «Лисица», 2023. – 102 с.

Смирнов, Н. Г. Уральская экологическая школа: вехи становления и развития / Н. Г. Смирнов. – Екатеринбург : «Гощицкий», 2005. – 264 с.

Современные методы дистанционного зондирования Земли / Д. С. Чжан-Энь-Ххын, В. С. Веселов, Д. Е. Глущенко [и др.] // Авиационная и спутниковая метеорология : материалы II Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Сергея Васильевича Солонина. – Санкт-Петербург : Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2023. – С. 145–150.

Сочава, В. Б. Пределы лесов в горах Ляпинского Урала / В. Б. Сочава // Труды Ботанического музея. 1930. – Т. 32. – С. 47.

Старков, В. Д. Полярный Урал – уникальный регион России / В. Д. Старков, Ю. С. Пестова // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. – 2015. – Т. 1, № 2. – С. 17–22.

Сташкевич, С. П. Использование беспилотных летательных аппаратов в военных и гражданских целях / С. П. Сташкевич, В. А. Кабанов, Т. Д. Хуснутдинов //

Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. – Красноярск : ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева», 2019. – С. 171–173.

СТО 11468812.011–2025. Типовой стандарт осуществления кадастровой деятельности. «Выполнение аэрофотосъемки беспилотными авиационными системами в кадастровой деятельности. Методы и технологии определения местоположения объектов недвижимости с использованием беспилотных авиационных систем». Стандарт Президиума Ассоциации «Национальное объединение саморегулируемых организаций кадастровых инженеров» (протокол № 09/25 от 21/10/2025). – URL: <https://np-okirt.ru/o-partnerstve/vnutrennie-dokumenty-partnerstva/standarty-osushchestvleniya-kadastrovoy-deyatelnosti-razrabotannye-assotsiatsiey-natsionalnaya-palat/Стандарт-БПЛА-с-паспортом.pdf> (дата обращения: 26.01.2026).

Строение, эволюция и минерагения гипербазитового массива Рай-Из / под общ. ред. В. Н. Пучко. – Свердловск : УрО АН СССР, 1990. – 228 с.

Стыценко, Е. А. Разработка методики автоматизированного дешифрования растительного покрова с комплексным использованием разносезонных зональных космических изображений : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : специальность 25.00.34 Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Стыценко Екатерина Александровна. – Москва, 2018. – 213 с.

Сутырина, Е. Н. Дистанционное зондирование земли : учебное пособие / Е. Н. Сутырина. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2013. – 165 с.

Сухоносова, Э. А. Области применения данных дистанционного зондирования / Э. А. Сухоносова // Наука и молодежь : сборник научных трудов. Том 6. – Новочеркасск : Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А. К. Кортунова – филиал Донской государственной аграрной академии, 2019. – С. 98–104.

Сучков, Д. К. История применения дистанционных (аэрокосмических) методов в лесном хозяйстве России / Д. К. Сучков // Успехи современного естествозна-

ния. – 2022. – № 10. – С. 46–50.

Сушкевич, Т. А. 60 лет от первого совещания по ИСЗ до современных систем дистанционного зондирования и мониторинга Земли из космоса: информационно-математический аспект (история и перспективы) / Т. А. Сушкевич, С. А. Стрелков, С. В. Максакова // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27, № 7. – С. 573–580.

Тайник, А. В. Лиственница сибирская на верхней границе леса в Республике Алтай / А. В. Тайник, В. С. Мыглан, В. В. Баринов // Экология Южной Сибири и сопредельных территорий. – Абакан : Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова, 2014. – С. 43.

Тайник, А. В. Прирост лиственницы сибирской (*Larix Sibirica* Ldb.) на верхней границе леса в Республике Алтай / А. В. Тайник, В. С. Мыглан, В. В. Баринов [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2015. – № 6. – С. 61–71.

Тепляков, В. К. «Лесной журнал» и международный союз лесных исследовательских организаций (ИОФРО) / В. К. Тепляков, В. С. Шалаев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2018. – № 5. – С. 13–25.

Тимофеев, А. С. Структура и динамика древесной и кустарниковой растительности на верхнем пределе своего произрастания на плато Путорана / А. С. Тимофеев, С. О. Вьюхин, А. А. Григорьев, П. А. Моисеев // Леса России и хозяйство в них. – 2021. – № 1 (76). – С. 23–28.

Тихомиров, Б. А. К вопросу о динамике полярного и вертикального предела лесов Евразии / Б.А. Тихомиров // Советская ботаника. – 1941. – № 5–6. – С. 23–38.

Усова, Н. В. Использование данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) для получения достоверной и оперативной информации о территории проектирования и строительства градостроительных объектов / Н. В. Усова // Наука, образование и экспериментальное проектирование. Труды МАРХИ : материалы международной научно-практической конференции. Сборник статей. – Москва : Московский архитектурный институт (государственная академия), 2012. – С. 287–

293.

Усольцев, В. А. О возможностях применения всеобщих и региональных аллометрических моделей при оценке фитомассы деревьев ели / В. А. Усольцев, К. В. Колчин, В. А. Азаренок // Аграрный вестник Урала. – 2017. – № 6 (160). – С. 33-37.

Усольцев, В. А. Рост и структура фитомассы древостоев / В. А. Усольцев. – Новосибирск : Наука, Сибирское отделение, 1988. – 256 с.

Усольцев, В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных и география / В. А. Усольцев – Екатеринбург : УрО РАН. – 2001. – 706 с.

Усольцев, В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных, таблицы биопродуктивности, география / В. А. Усольцев // Сибирский экологический журнал. – 2003б. – Т. 10, № 6. – С. 659–667.

Усольцев, В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии / В. А. Усольцев. – Екатеринбург : УрО РАН. – 2002. – 762 с. – URL: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3302> (дата обращения: 25.01.2026).

Усольцев, В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии / В. А. Усольцев. – Екатеринбург : Уральское отделение РАН, 2002. – 763 с.

Усольцев, В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: предельная продуктивность и география / В. А. Усольцев. – Екатеринбург : Уральское отделение РАН, 2003 а. – 406 с.

Усольцев, В. А. Формирование банков данных о фитомассе лесов / В. А. Усольцев. – Екатеринбург : УрО РАН. – 1998. – 541 с. – URL: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3224> (дата обращения: 25.01.2026).

Фахрутдинова, В. В. Изменчивость структуры годичных колец у лиственницы Гмелина на северной границе леса (полуостров Таймыр) / В. В. Фахрутдинова, В. Е. Бенькова, А. В. Шашкин // Сибирский лесной журнал. – 2017. – № 2. – С. 62–69.

Филимонова, Е. О. Современное состояние верхней границы леса в высокогорьях Катунского хребта (горный Алтай) / Е. О. Филимонова, Е. Е.

Тимошок, Д. А. Савчук, С. А. Николаева // Успехи современного естествознания. – 2023. – № 7. – С. 49–54.

Фирсова, В. П. Почвы высоких широт горного Урала / В. П. Фирсова, В. С. Дедков. – Свердловск : УНЦ АН СССР, 1983. – 96 с.

Фомин, В. В. Климатогенная и антропогенная пространственно-временная динамика древесной растительности во второй половине XX века / В. В. Фомин. – Екатеринбург : ИЭРиЖ УрО РАН, 2009. – 150 с.

Фомин, В. В. Пространственно-временная динамика верхней границы леса на Южном Урале во второй половине XX века / В. В. Фомин, Д. С. Капралов, М. М. Терентьев [и др.] // Геоинформатика. – 2007. – № 1. – С. 56–61.

Фомин, В. В. Разработка и использование количественных методов и моделей для оценки климатогенной и антропогенной динамики древесной растительности в экстремальных условиях ее произрастания / В. В. Фомин. – Екатеринбург : УГЛТУ, – 2008. – 197 с.

Фомин, В. В. Методические аспекты распознавания деревьев лиственницы сибирской в экотоне верхней границы древесной растительности на Полярном Урале на аэро- и космоснимках высокого пространственного разрешения / В. В. Фомин, А. П. Михайлович, Е. М. Агапитов [и др.] // Лесная наука в реализации концепции уральской инженерной школы: социально-экономические и экологические проблемы лесного сектора экономики : материалы XII Международной научно-технической конференции. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2019. – С. 243–246.

Фомичёв, М. А. История создания и развития беспилотных летательных аппаратов / М. А. Фомичёв // Симпозиум конвергентных исследований. – 2023. – № 1. – С. 40–42.

Хантемиров, Р. М. Биоиндикация загрязнения среды в прошлом на основе анализа содержания химических элементов в годичных слоях древесины / Р. М. Хантемиров // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 1996. – Т. 16. – С. 153–164.

Хантемиров, Р. М. Радиоуглеродные и дендрохронологические датировки полуископаемой древесины на Ямале и их использование для изучения динамики

лесотундровых экосистем / Р. М. Хантемиров, С. Г. Шиятов // Биота Приуральской Субарктики в позднем плейстоцене и голоцене : сборник научных трудов. – Екатеринбург : Издательство «Екатеринбург», 1999. – С. 3–22.

Хацкевич, М. В. Распознавание крон деревьев на изображении с применением нейросетевых методов / М. В. Хацкевич, В. А. Головкин, А. Л. Михняев // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2019. – № 5(118). – С. 18–24.

Цай, Ц. Этапы развития и перспективы аэрофотограмметрии / Ц. Цай, М. Б. Пименова // Политехнический молодежный журнал. – 2022. – № 12 (77). – С. 1–13.

Цветаев, А. А. Горы Иремель (Южный Урал) : физико-географический очерк / А. А. Цветаев. – Уфа : [б. и.], 1960. – 83 с.

Цветков, М. А. Лесные карты и методика их составления. - , Москва. — Ленинград., 1950 – 212 с.

Ценч, Ю. С. Тенденции развития технических средств аэрофотосъемки сельскохозяйственных земель / Ю. С. Ценч, Н. И. Захарова // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2023 – Т. 17, № 3. – С. 16–26.

Черненкова, Т. В. Оценка биоразнообразия лесов наземными и дистанционными методами на основе ГИС-технологий / Т. В. Черненкова // Биосфера. – 2009. – Т. 1, № 1. – С. 93–100.

Чернов Шиятов, Н. Н. С. Г. Лесоводственная наука на Урале : монография / Н. Н. Чернов С. Г. Шиятов. – Екатеринбург : Уральский государственный лесотехнический ун-т, 2006. – 360 с.

Чикунев, И. А. Специфика дистанционного зондирования и его развитие в России / И. А. Чикунев, Э. Л. Куцова // Мир в зеркале языков: комплексная парадигма : материалы научно-практической студенческой конференции. – Шахты : ИСОиП (филиал) ДГТУ в г. Шахты, 2021. – С. 169–174.

Шалаумова, Ю. В. Прогнозные оценки продвижения древесной растительности в горные тундры на Южном Урале / Ю. В. Шалаумова, А. А. Григорьев, Г. И. Ложкин [и др.] // Горные экосистемы и их компоненты : материалы IX Все-

российской конференции с международным участием, посвященной 300-летию Российской академии наук, 35-летию научной школы чл.-корр. РАН А. К. Темботова, 30-летию Института экологии горных территорий им. А. К. Темботова РАН. – Нальчик : Институт экологии горных территорий им. А. К. Темботова РАН, 2024. – С. 116–117.

Шапошникова Л. А., Изображение леса на картах, Москва., 1957 – 67 с..

Шихов, А. Н. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения : учебное пособие / А. Н. Шихов, А. П. Герасимов, А. И. Пономарчук, Е. С. Перминова. – Пермь : Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2020. – 191 с.

Шиятов С. Г. Циклическая динамика лесной растительности на Урале / С. Г. Шиятов, Г. Е. Комин, В. С. Мазепа // Экологические основы рационального использования и воспроизводства лесов Урала. – Свердловск : Свердловский институт технического обучения рабочих Министерства черной металлургии СССР, 1986. – С. 19–21.

Шиятов, С. Г. Вертикальный и горизонтальный сдвиги верхней границы редколесий и сомкнутых лесов в XX столетии на Полярном Урале / С. Г. Шиятов, М. М. Терентьев, В. В. Фомин, Н. Е. Циммерманн // Экология. – 2007. – № 4. – С. 243–248.

Шиятов, С. Г. Верхняя граница леса на Полярном Урале и ее динамика в связи с изменениями климата / С. Г. Шиятов // Доклады первой научной конференции молодых ученых специалистов-биологов. – Свердловск : Редакционно-издательский совет Уральского филиала АН СССР (РИСО), 1962. – С. 37–48.

Шиятов, С. Г. Дендрохронологические исследования / С. Г. Шиятов // Лесоводственная наука на Урале. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2006. – С. 47–60.

Шиятов, С. Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале / С. Г. Шиятов // Академия наук СССР, Уральский научный центр, Институт экологии растений и животных. – Москва : Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр «Наука», 1986. –

136 с.

Шиятов, С. Г. Дендрохронология, ее принципы и методы / С. Г. Шиятов // Проблемы ботаники на Урале : Записки Свердловского отделения Всесоюзного ботанического общества. – 1973. – Вып. 6. – С. 53–81.

Шиятов, С. Г. К методике расчета индексов прироста деревьев / С. Г. Шиятов // Экология. – 1970. – № 3. – С. 85–87.

Шиятов, С. Г. Методы дендрохронологии : учебно-методическое пособие / С. Г. Шиятов, Е. А. Ваганов, А. В. Кирдянов [и др.]. Часть I. – Красноярск : Красноярский государственный аграрный университет, 2000. – 80 с.

Шиятов, С. Г. Пространственно-временная динамика лесотундровых сообществ на Полярном Урале / С. Г. Шиятов, М. М. Терентьев, В. В. Фомин // Экология. – 2005. – Вып. 36. – № 2. – С. 69–75.

Шиятов, С. Г. Пути устранения неоднородности дендрохронологических рядов / С. Г. Шиятов // Продуктивность и рациональное использование растительности Урала. – Свердловск : УНЦ АН СССР, 1980. – С. 90–100.

Шиятов, С. Г. Снежный покров на верхней границе леса и его влияние на древесную растительность / С. Г. Шиятов // Новые данные о флоре и растительности Урала / Академия наук СССР, УРАЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ, Институт экологии растений и животных. – Свердловск : «Уральский рабочий», 1969. – С. 141–157.

Шиятов, С. Г. Цикличность радиального прироста деревьев в высокогорьях Урала / С. Г. Шиятов, В. С. Мазепа // Дендрохронология и дендроклиматология / Лимнологический институт (Академия наук СССР). – Новосибирск : Академический научно-издательский и книгораспространительский центр «Наука», 1986. – С. 134–160.

Шиятов, С. Г. Экологические типы верхней границы леса на Урале / С. Г. Шиятов // Ботанические исследования на Урале : Информационные материалы. – Екатеринбург : Уральский научный центр РАН, 1984. – С. 39–41.

Шовенгердт, Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р. А. Шовенгердт. – Москва : Техносфера, 2013. – 592 с.

Шполянская, Н. А. Вечная мерзлота и глобальные изменения климата. –

Москва : МГУ, 2010. – 97 с.

Шумовская, Д. А. Дистанционное спутниковое зондирование в географических исследованиях (анализ тематик российских и зарубежных статей) / Д. А. Шумовская, А. В. Егорова, А. И. Кичин [и др.] // Российская неделя: Научно-техническая информация и перспективы космонавтики : материалы Российской конференции, посвященной 60-летию полета Юрия Гагарина в космос. – Москва : Всероссийский институт научной и технической информации РАН, 2021. – С. 120–124.

Щепашенко, Д. Г. Биологическая продуктивность и бюджет углерода листовенных лесов Северо-Востока России : монография / Д. Г. Щепашенко, А. З. Швиденко, В. С. Шалаев. – Москва : ГОУ ВПО МГУЛ, 2008 – 296 с.

Щепашенко, Д. Г. Площадь лесов России и ее динамика на основе синтеза продуктов дистанционного зондирования / Д. Г. Щепашенко, А. З. Швиденко, М. Ю. Лесив [и др.] // Лесоведение. – 2015. – № 3. – С. 163–171.

Brown, J. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: research designs and initial results / J. Brown, K.M. Hinkel, E.F. Nelson // Polar Geography. – 2000. – V. 24, № 3. – P. 165–258.

Camarero, J. J. Spatial patterns of plant richness across treeline ecotones in the Pyrenees reveal different locations for richness and tree cover boundaries / J. J. Camarero, E. Gutiérrez, M-J. Fortin // Global Ecology and Biogeography. – 2006. – № 15. – P. 182–191.

Chiu, C-A. A concise scheme of vegetation boundary terms in subtropical high mountains. / C-A. Chiu, M-F. Lee, H-Y. Tzeng, M-C. Liao // African Journal of Agricultural Research. – 2014 – № 9 (20). – P. 1560–1570.

Combaud, M. Climate change altered the dynamics of stand dominant height in forests during the past century – Analysis of 20 European tree species / M. Combaud, T. Cordonnier, S. Dupire, P. Vallet // Forest Ecology and Management. – 2024. – Vol. 553. – P. 121601.

Devi, N. M. 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, V. S. Mazepa // For. Ecosyst. – 2020. – Vol. 7. – No.7.

Dufour-Tremblay, G. Dufour-Tremblay, G. Dynamics at the treeline: Differential responses of *Picea mariana* and *Larix laricina* to climate change in eastern sub-arctic Québec / G. Dufour-Tremblay, E. Lévesque, S. Boudreau // Environmental Research Letters. – 2012. – Vol. 7. – P. 044038.

S. Ecke, S. UAV-Based Forest Health Monitoring: A Systematic Review / S. Ecke, J. Dempewolf, J. Frey [et al.] // In Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14, Issue 13. – Art.3205.

Elliott, G. P. Multi-scale Influences of Slope Aspect and Spatial Pattern on Ecotonal Dynamics at Upper Treeline in the Southern Rocky Mountains, U.S.A / G. P. Elliott, K. F. Kipfmüller // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. – 2018. – № 42. – P. 45–56.

Encyclopedia of nineteenth-century photography / Editor J. Hannavy // Routledge Taylor & Francis Group. – 2008 – Vol. 1. – 1630 p.

Fomin, V. Reconstruction of the Expansion of Siberian Larch into the Mountain Tundra in the Polar Urals in the 20th – Early 21st Centuries / V. Fomin, A. Mikhailovich, D. Golikov, E. Agapitov // Forests. – 2022. – Vol. 13, No. 3. – Art. 419.

Fomin, V. V. Factors determining the phenomena in the upper tree line ecotone in the Polar Urals mountains / V. V. Fomin, S. G. Shiyatov // Forests of Russia and Economy in Them. – 2021. – No. 2(77). – P. 42–51.

Fomin, V. V. Trees in the Upper Treeline Ecotone in the Polar Urals: Centuries-Old Change and Spatial Patterns / V. V. Fomin, A. P. Mikhailovich, S. G. Shiyatov // Mountain Research and Development. – 2020. – № 40(2). – P. 32 – 40.

Grigor'ev, A. A. Structure and Dynamics of Tree Stands at the Upper Timberline in the Western Part of the Putorana Plateau / A. A. Grigor'ev, N. M. Devi, V. V. Kukarskikh [et al.] // Russian Journal of Ecology. – 2019. – Vol. 50. – P. 311–322.

Hagedorn, F. Latitudinal decline in stand biomass and productivity at the elevational treeline in the Ural mountains despite a common thermal growth limit / F. Hagedorn, M. A. Dawes, M. O. Bubnov [et al.] // J Biogeogr. – 2020. – № 47. – P. 1827–1842.

Harding, C. N is for Joseph Nicéphore Niépce, creator of the first photograph / C. Harding // Science+ Media Museum : [website]. – URL: <https://blog.scienceandmediamuseum.org.uk/a-z-of-photography-joseph-nicephore-niepce-first-photograph/> (дата обращения: 10.12.2025).

Huxley, J. Problems of relative growth / J. Huxley. – London : Methuen & Co, 1932. – 296 p.

Kharuk, V. I. Forest–tundra ecotone response to climate change in the Western Sayan Mountains, Siberia / V. I. Kharuk, S. T. Im, M. L. Dvinskaya // Scandinavian Journal of Forest Research. – 2010. – Vol. 25(3). – P. 224–233.

Kullman, L. 2002. Rapid recent range-margin rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes / L. Kullman // Journal of Ecology. – 2002. – Vol. 90 – P. 68–77.

Kuzmenko, A. Methods and approaches to the development of a automated analysis's system of the changes' dynamics in the area of forest plantations based on the methods of automatic pattern recognition / A. Kuzmenko, D. Kondrashin // Ergodesign. – 2019. – № 4. – P. 230–240.

Landsat // Nasa : [website]. – URL: <https://science.nasa.gov/mission/landsat/> (дата обращения: 12.12.2025).

Mamet, S. D. Shifting global Larix distributions: Northern expansion and southern retraction as species respond to changing climate / S. D. Mamet, C. D. Brown, A. J. Trant, C. P. Laroque // Journal of Biogeography. – 2019. – Vol. 46. – P. 30–44.

Mikhailovich, A. P. Carbon Storage by Siberian Larch in the Upper Treeline Ecotone in the Polar Urals / A. P. Mikhailovich, V. V. Fomin, D. Yu. Golikov E. M. Agapitov, V. E. Rogachev, V. S. Mazepa[et al.] // Russian Journal of Ecology. – 2025. – Vol. 56, No. 3. – P. 200–207.

Mikhailovich, A. Quantitative Assessment of Forest–Tundra Patches Dynamics in Polar Urals Due to Modern Climate Change / A. Mikhailovich, V. Fomin // Forests. – 2023. – Vol. 14, No. 12. – Art. 2340.

Moiseev, P. A. 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 [et al.] //

Forests. – 2022. – Vol. 13. – No. 254.

Moiseev, P. A. Tree Stands and Their Productivity Dynamics at the Upper Growing Limit in Khibiny on the Background of Modern Climate Changes / P. A. Moiseev, A. A. Galimova, M. O. Bubnov [et al.] // Russian Journal of Ecology. – 2019. – Vol. 50. – P. 431–444.

Moskalenko, N. G. Impact of climate warming on vegetation cover and permafrost in West Siberia northern taiga / N. G. Moskalenko // Natural Science. – 2013. – № 5. – P. 144–148.

Paris Agreement under the Framework Convention on Climate Change. – UN, 2015. – 32 p.

Popescu, D. New trends in detection of harmful insects and pests in modern agriculture using artificial neural networks. a review / D. Popescu, A. Dinca, L. Ichim, N. Angelescu // In Frontiers in Plant Science. – 2023. – Vol. 14. No. 12. – Art.68167.

Pospelova, E. B. Climate Change in Eastern Taimyr over the Last 80 Years and the Warming Impact on Biodiversity and Ecosystem Processes in its Territory / E. B. Pospelova, I. N. Pospelov, M. V. Orlov // Nature Conservation Research. – 2017. – Vol. 2, No. 3. – P. 48–60.

re3data.org: NOAA National Centers for Environmental Information - Paleoclimatology Data [website]. Editing status 2025-03-26. re3data.org – Registry of Research Data Repositories (date of accessed: 15.02.2026).

Shiryayev, A. G. Relationship between species richness, biomass and structure of vegetation and mycobiota along the altitudinal transect in the Polar Urals / A. G. Shiryayev, U. Peintner, V. V. Elsakov, S. Yu. Sokovnina [et al.] // Journal of Fungi. – 2020. – Vol. 6(4). – P. 353.

Shiyatov, S. G. Spatiotemporal dynamics of forest–tundra communities in the Polar Urals / S. G. Shiyatov, M. M. Terent'ev, V. V. Fomin // Russian Journal of Ecology. – 2005. – Vol. 36, № 2. – P. 69–75.

Shrestha, A. Evaluating a Novel Approach to Detect the Vertical Structure of Insect Damage in Trees Using Multispectral and Three-Dimensional Data from Drone Imagery in the Northern Rocky Mountains, USA / A. Shrestha, J. A. Hicke, A. J. Meddens [et al.] // Remote Sens. – 2024. – Vol. 16.. – №1365.

Sizykh, A. Structural-dynamic organization of forests under different physical-geographic conditions in pre-Baikal (East Siberia) / A. Sizykh, A. Gritsenyuk, A. Shekhovtsov // *International Journal of Ecosystems and Ecology Science*. – 2020. – Vol. 10, № 2. – P. 367–374.

Svendsen, J. I. Glacial and vegetation history of the Polar Ural Mountains in northern Russia during the Last Ice Age Marine Isotope Stages 5–2 / J. I. Svendsen, L. C. Krüger, J. Mangerud [et al.] // *Quat. Sci. Rev.* – 2014. – Vol. 92. – P. 409–428.

Usery, E. Topographic mapping evolution: From field and photogrammetric data collection to GIS production and Linked Open Data / E. Usery, D. E. Varanka, L. Davis // *Cartographic Journal*. – 2019. – Vol. 55, № 4. – P. 378–390.

Usoltsev, V. A., Stand Biomass Dynamics of Pine Plantations and Natural Forests on Dry Steppe in Kazakhstan / V. A. Usoltsev, J. K. Vanclay // *Scandinavian Journal of Forest Research*. – 1995. – Vol. 10. – P. 305–312.

Valdayskikh, V. Some characteristics of forest-tundra (West Siberia) soil groups distinguished on the basis of thermal properties / V. Valdayskikh, O. Nekrasova, J. Jouzel, A. Uchaev, T. Radchenko // *Prace Geograficzne*. – 2013. – Vol. 135. – P. 73–86.

Wong, C. M. Errors in estimating tree age: implications for studies of stand dynamics / C. M. Wong, K. P. Lertzman // *Can. J. For. Res.* – 2001. – № 31. – P. 1262.–1271.

Yang, J. Diamonds, native elements and metal alloys from chromitites of the Ray-Iz ophiolite of the Polar Urals / J. Yang, F. Meng, X. Xu [et al.] // *Gondwana Research*. – 2015. – Vol. 27. – P. 459–485.

Zhu, H. Intelligent agriculture: deep learning in UAV-based remote sensing imagery for crop diseases and pests detection / H. Zhu, C. Lin, G. Liu [et al.] // *Front. Plant Sci.* – 2024. – Vol. 15. – No.15. – Art.1435016. – № 1435016.

Приложение А

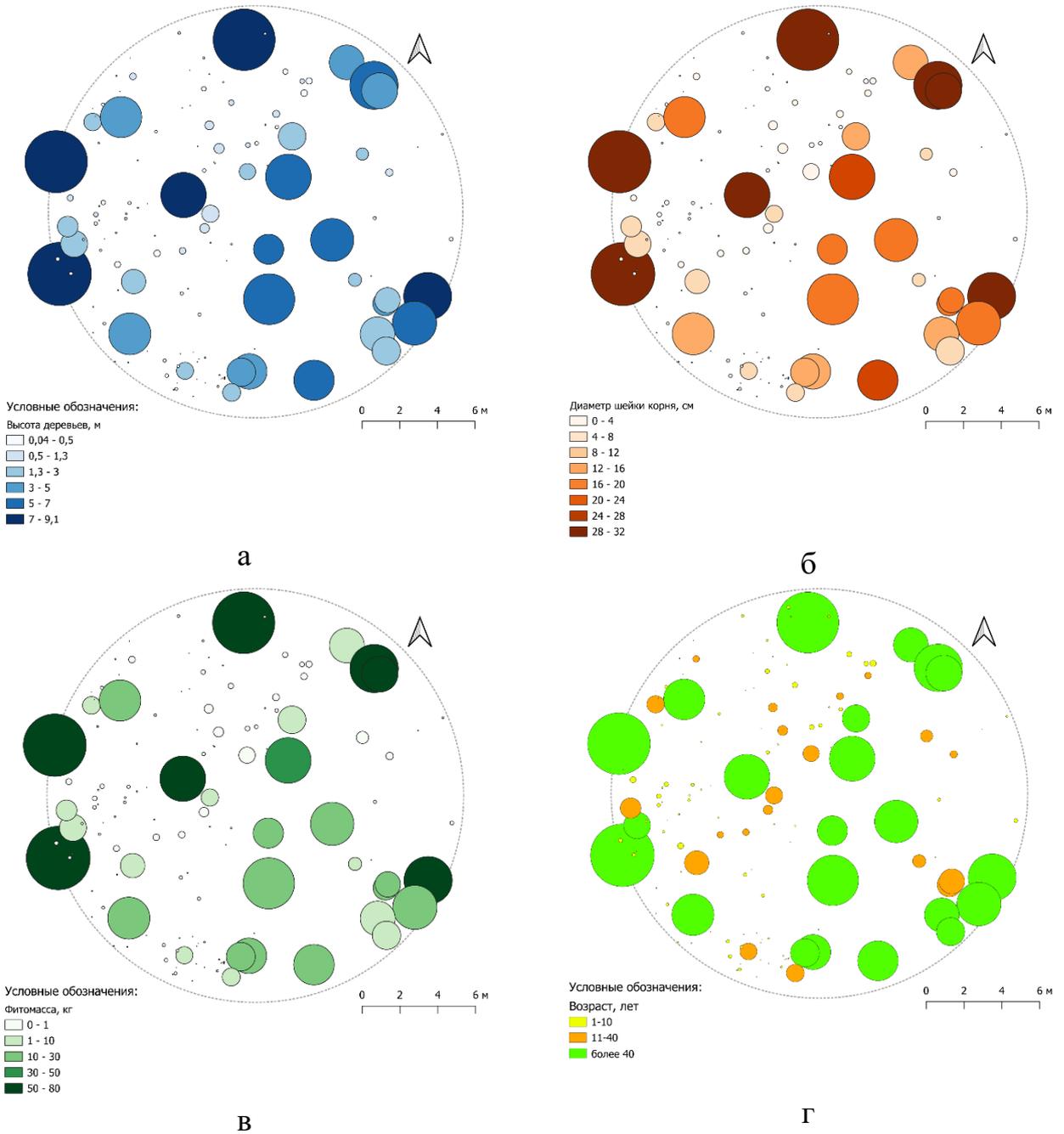


Рисунок А.1 – Картосхемы экземпляров лиственницы сибирской на пробной площади №1 с обозначением их отдельных характеристик по интервалам: высота (а), диаметр шейки корня (б), фитомасса (в), возраста (г)

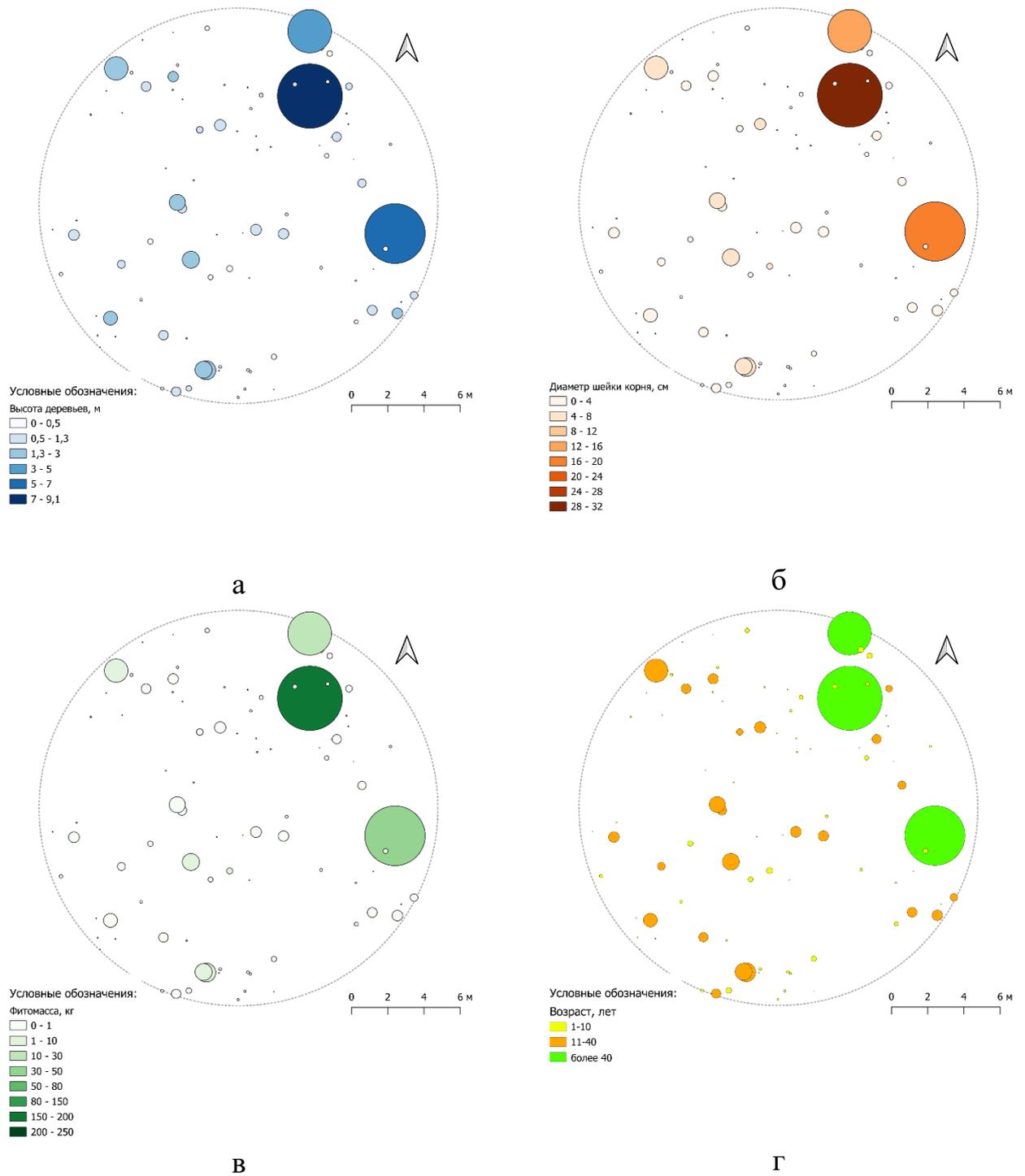


Рисунок А.2 – Картосхемы экземпляров лиственницы сибирской на пробной площади №2 с обозначением их отдельных характеристик по интервалам: высота (а), диаметр шейки корня (б), фитомасса (в), возраста (г)

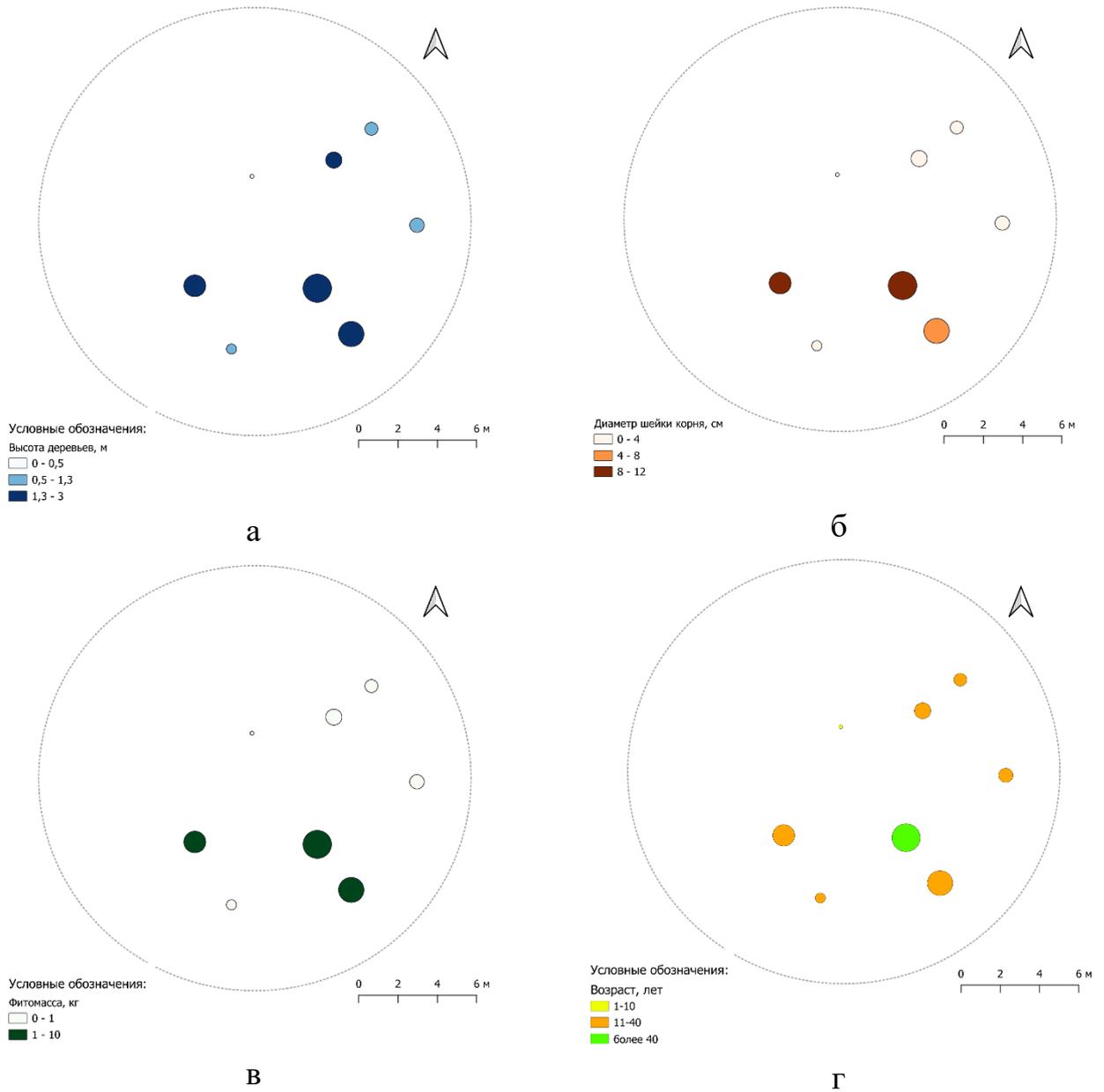


Рисунок А.3 – Картограммы экземпляров лиственницы сибирской на пробной площади №3 с обозначением их отдельных характеристик по интервалам: высота (а), диаметр шейки корня (б), фитомасса (в), возраста (г)

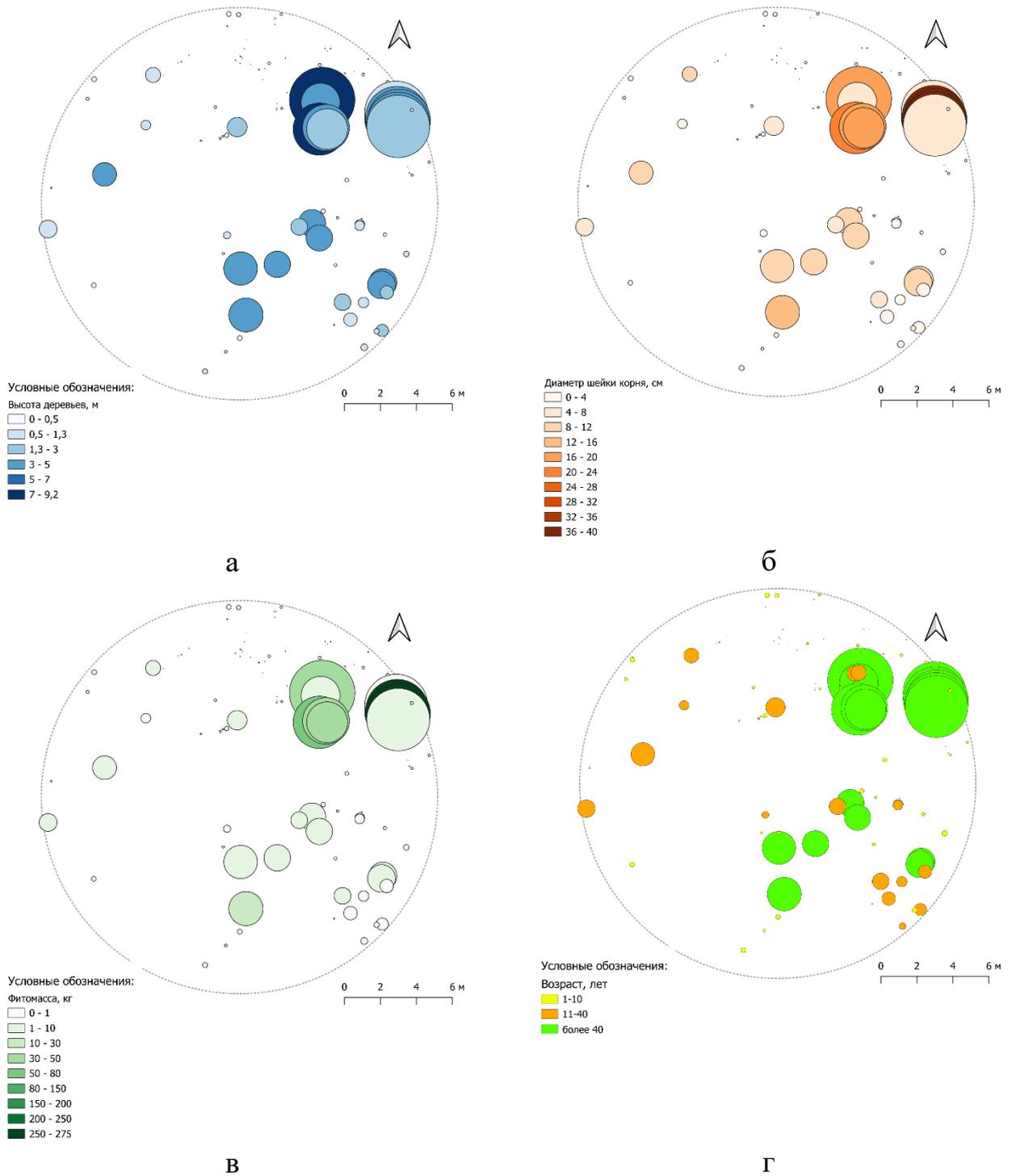


Рисунок А.4 – Картосхемы экземпляров лиственницы сибирской на пробной площади №4 с обозначением их отдельных характеристик по интервалам: высота (а), диаметр шейки корня (б), фитомасса (в), возраста (г)

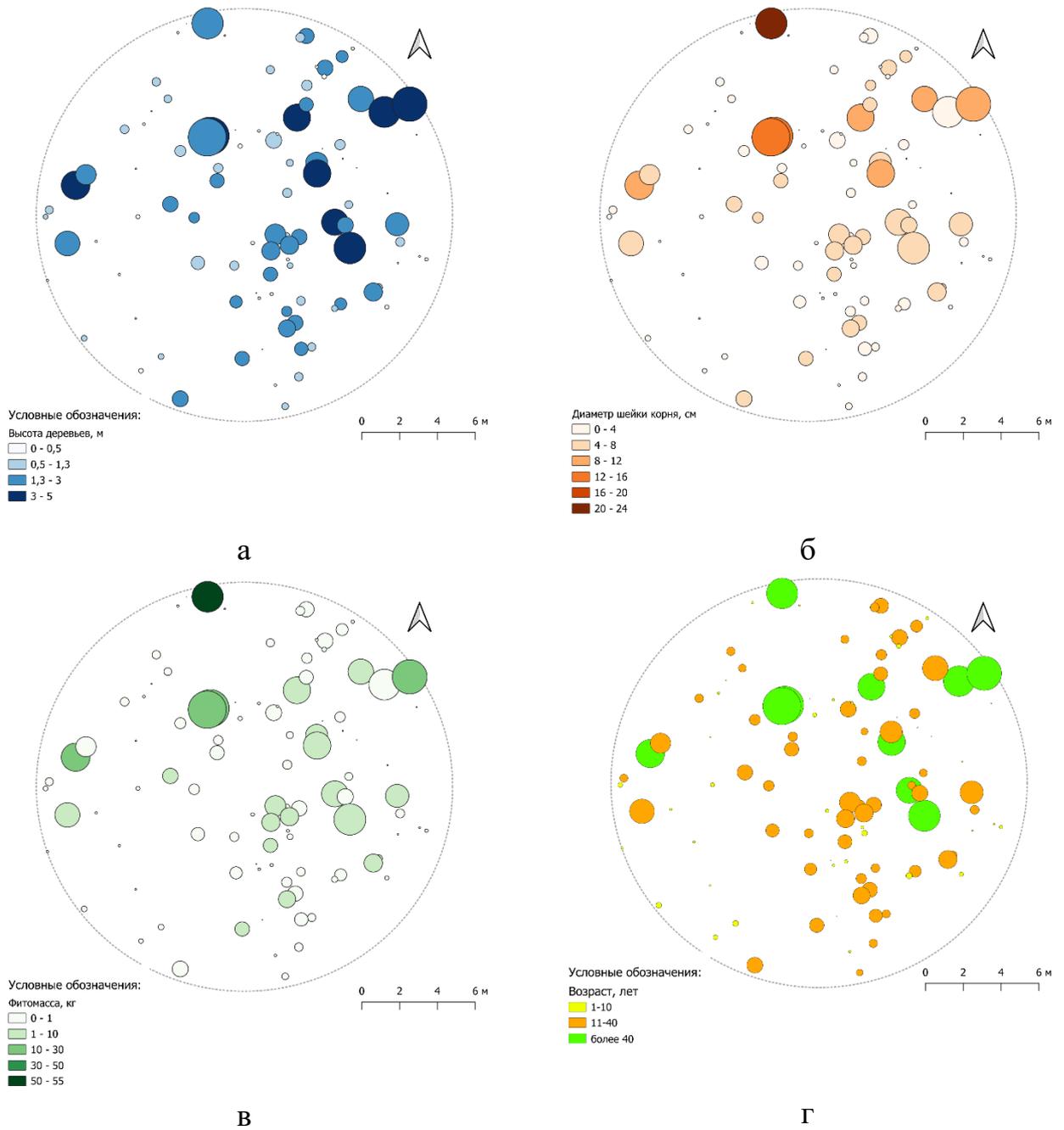


Рисунок А.5 – Картосхемы экземпляров лиственницы сибирской на пробной площади №5 с обозначением их отдельных характеристик по интервалам: высота (а), диаметр шейки корня (б), фитомасса (в), возраста (г)

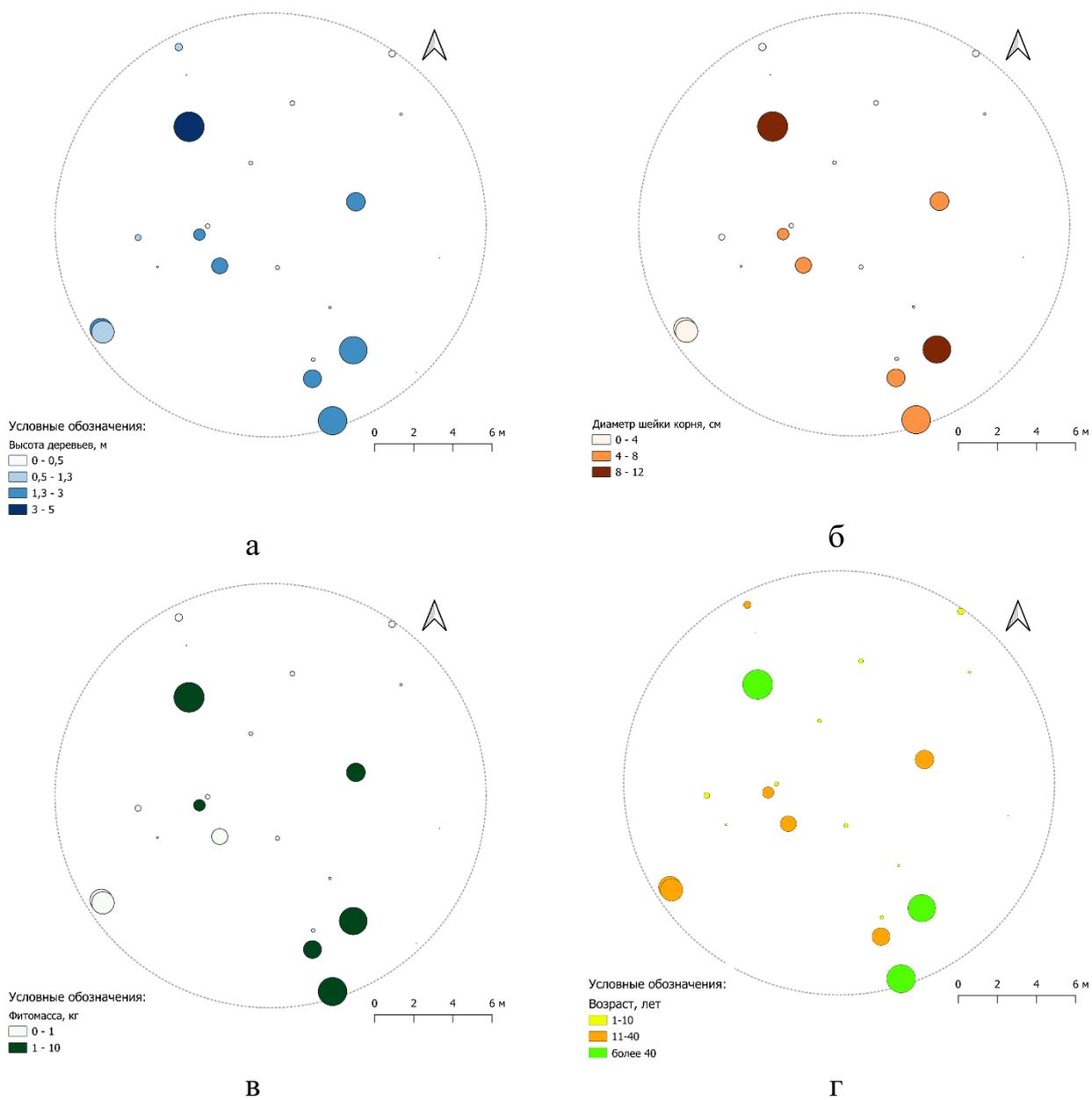


Рисунок А.6 – Картосхемы экземпляров лиственницы сибирской на пробной площади №6 с обозначением их отдельных характеристик по интервалам: высота (а), диаметр шейки корня (б), фитомасса (в), возраста (г)

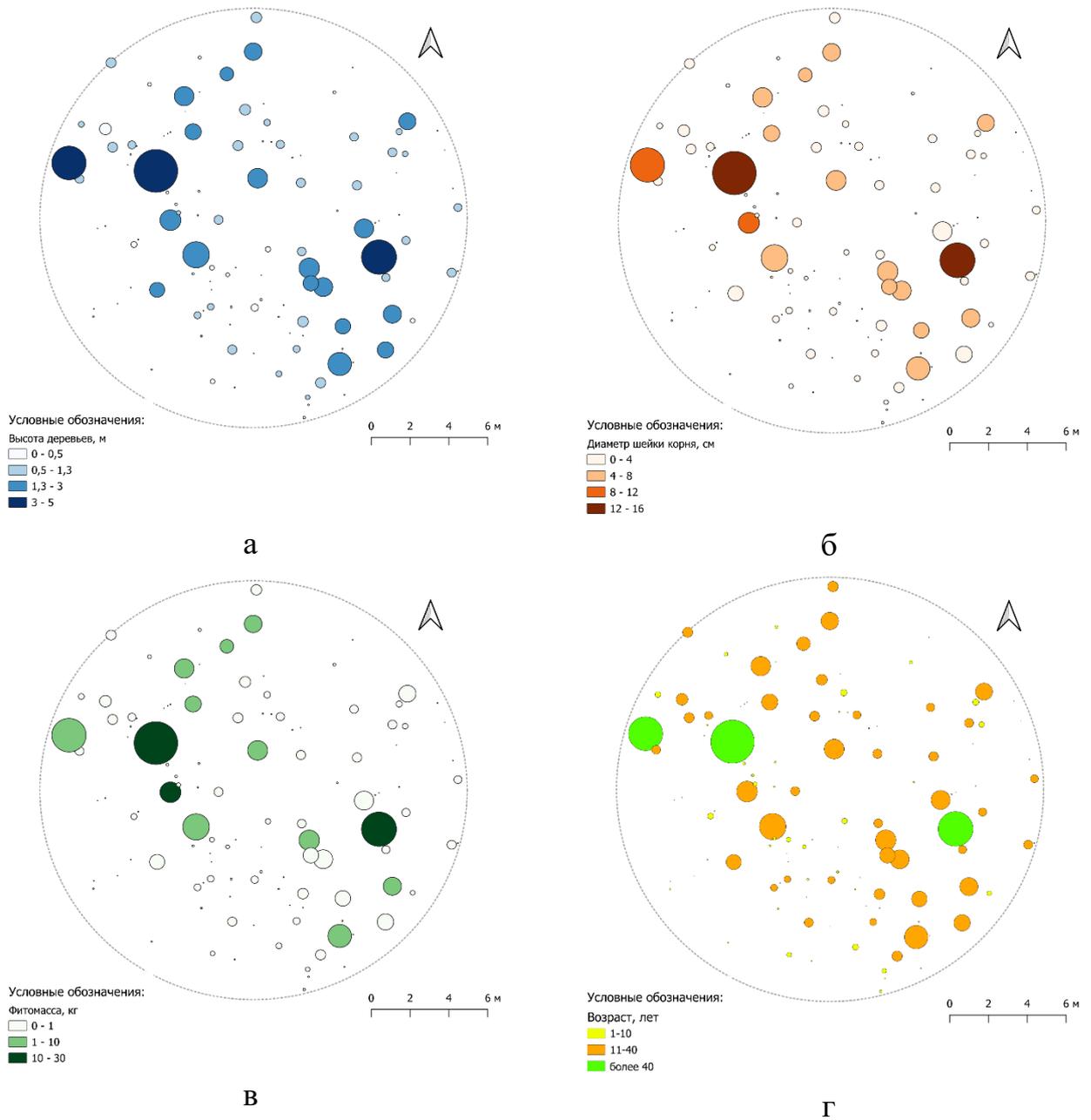


Рисунок А.8 – Картосхемы экземпляров лиственницы сибирской на пробной площади №8 с обозначением их отдельных характеристик по интервалам: высота (а), диаметр шейки корня (б), фитомасса (в), возраста (г)

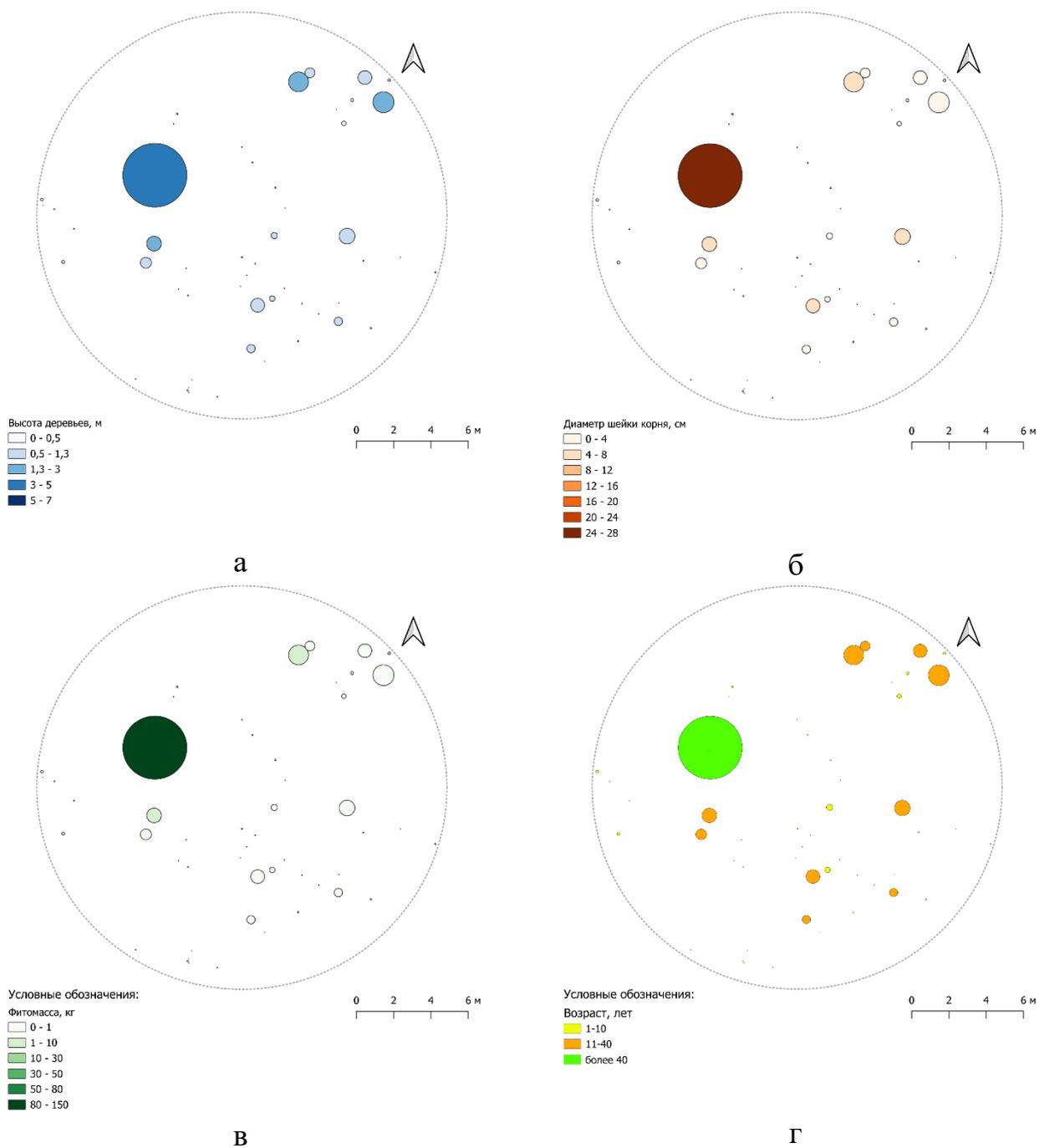


Рисунок А.9 – Картосхемы экземпляров лиственницы сибирской на пробной площади №9 с обозначением их отдельных характеристик по интервалам: высота (а), диаметр шейки корня (б), фитомасса (в), возраста (г)