

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

*На правах рукописи*



МИХАЙЛОВИЧ АННА ПАВЛОВНА

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА  
ПОПУЛЯЦИИ ЛИСТВЕННОЙ СИБИРСКОЙ НА ВЕРХНЕМ ПРЕДЕЛЕ  
ЕЕ ПРОИЗРАСТАНИЯ В НИЖНЕМ ТЕЧЕНИИ РЕК ЕНГАЮ И  
КЕРДОМАНШОР (ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ) В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ  
КЛИМАТА**

1.5.15 – экология (биологические науки)

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

Научный руководитель:  
доктор биологических наук, доцент  
Фомин Валерий Владимирович

Екатеринбург – 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1 Современное состояние исследований в области пространственно-временной динамики древесной растительности на верхнем пределе ее произрастания.....	15
1.1 Понятие границы древесной растительности .....	15
1.2 Метод наземного фотомониторинга .....	36
1.3 Анализ и аннотирование ландшафтных фотографий .....	41
2 Характеристика района исследований, объекты и методика исследований, объем выполненных работ.....	47
3 Исследование пространственно-временной динамики древесной растительности на верхнем пределе ее произрастания с использованием ландшафтных фотографий .....	64
3.1 Особенности наземных ландшафтных фотографий для анализа древесной растительности.....	64
3.2 Методика работы с ландшафтными фотографиями для формирования целостного представления об изучаемом пространстве .....	65
3.3 Определение характеристик местности, объектов и феноменов, отображенных на фотоснимке, с помощью геоинформационных слоев .....	75
4 Пространственные паттерны распределения деревьев лиственницы сибирской на верхнем пределе ее произрастания на Полярном Урале.....	84
4.1 Пространственные закономерности распределения деревьев и древесных остатков в экотоне верхней границы древесной растительности .	84
4.2 Методика автоматизированного выделения границ фитоценозов .....	90

4.3 Пространственные закономерности изменения границ фитоценозов на верхнем пределе их распространения во второй половине XX – начале XXI века.....	92
Заключение .....	103
Список литературы .....	106
Список сокращений и условных обозначений.....	132
Приложение А. Фрагмент аэроснимка (обязательное) .....	133
Приложение Б. Фрагмент космоснимка (обязательное) .....	134
Приложение В. Картограммы размещения лиственницы сибирской на пробных площадях и гистограммы распределения отдельных таксационных характеристик (обязательное).....	135
Приложение Г. Иллюстрации влияния ведущих экологических факторов на пространственное распределение древесной растительности, морфологическое строение и возобновление лиственницы сибирской в районе исследований (обязательное) .....	144

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы

Древесная растительность на верхнем и северном пределах ее распространения, как правило, произрастает в экстремальных почвенно-климатических условиях, поэтому даже незначительное улучшение климата может приводить к заметным изменениям в лесотундровых и лесных сообществах (Арефьев, 2015, 2016; Моисеев и др., 2004; Петров и др., 2015; Фомин, 2009; Шиятов, Мазепа, 2002; Шиятов, Мазепа, Чехлов, 2002; Шиятов, Терентьев, Фомин, 2005; Holtmeier, 2009; Kharuk et al., 2019; Körner, 1999; Kullman, 2001, 2003; Shiyatov, 1993). Многочисленные факты продвижения древесной растительности на север и вверх по склонам гор в XX – начале XXI веков установлены в разных регионах Земли: в Скандинавии (Kullman, 2002, 2003), на Урале (Капралов и др., 2006; Шиятов, Терентьев, Фомин, 2005; Шиятов и др., 2007), в Сибири (Плюснин и др., 2008; Харук и др., 2004, 2005а, б), Новой Зеландии (Walter, Post, Convey, 2002), Альпах (Krajick, 2004), Африке (Shugart et al., 2001), Северной Америке (Masek, 2001). Поэтому высокогорные и высокоширотные районы часто используются в качестве мониторинговых полигонов для исследования ранней реакции растительности на региональное и глобальное изменения климата.

Количественный анализ пространственного распределения древесной растительности в горах и на северном пределе ее распространения может дать ценную информацию о процессах, происходящих в растительных сообществах в ответ на изменение условий среды. При этом, несмотря на большое количество собранных и опубликованных к настоящему моменту данных, очень часто сравнительный анализ изменений положения границы древесной растительности и скорости этих изменений в разных районах исследований затруднен по ряду объективных и субъективных причин, связанных со спецификой древесной растительности и условий ее местопроизрастания; источников данных о ней,

отличающихся по пространственному и временному масштабам; различиям в методиках сбора, обработки и анализа данных, характеризующих пространственное положение растительных рубежей. Использование разных методик для оценки изменения пространственного положения границ растительного покрова может приводить к существенным отличиям в значениях сдвига границ и величине скорости таких сдвигов (Харук и др., 2005а).

Унификация подходов и методик к обработке и анализу данных, позволяющих уменьшить субъективность и повысить степень автоматизации определения местоположения границ растительного покрова, количественных оценок величин и скорости их сдвига, является актуальной задачей в рамках описанных выше направлений исследований.

При изучении реакции древесной растительности на изменения климата требуется совершенствование системы экологического мониторинга. Метод наземного фотомониторинга является одним из важных динамически развивающихся направлений научных исследований, открывающих возможность для получения качественных и количественных оценок изменений элементов ландшафта (Нестеров, Сарычев, 2006; Сарычев, 2006; Фомин, 2008; Фомин и др., 2008; Dahdouh-Guebas, Koedam, 2008; Hall, 2001; Hendrick, Copenheadver, 2009; Webb, Boyer, Turner, 2010). Решение задач, связанных с обработкой, количественным анализом и представлением наземных ландшафтных фотографий в информационных системах, позволит повысить информативность этого важного источника объективных данных о растительности, явлениях и процессах, которые происходят в растительных сообществах на исследуемых территориях.

### **Степень разработанности темы исследования**

Задаче картирования растительного покрова и выделения границ между относительно однородными его фрагментами, в частности определению границ древесной растительности, посвящено большое количество научных трудов. Формализация и унификация подходов к выделению границ высокогорной древесной растительности в рамках крупномасштабного картирования позволяют

повысить степень объективности и воспроизводимости результатов определения их местоположения. Необходимо отметить, что данные аспекты проблемы еще недостаточно глубоко проработаны и отражены в научной литературе.

Недостаточная проработанность отдельных аспектов проблемы выделения границ обуславливает появление сложностей при получении надежных количественных оценок изменения пространственного положения относительно однородных единиц растительного покрова и сравнение этих оценок, сделанных в разных регионах при помощи разных.

В научных публикациях, посвященных повторным ландшафтными фотографиям, как правило, наземные фотоизображения используются в качестве иллюстраций. Проработке методологических аспектов получения количественных данных с фотографий или их сопряжения с другими источниками данных посвящена только небольшая часть научных трудов. Эти причины ограничивают возможности применения ландшафтных фотографий при проведении экологических исследований.

Диссертация является законченным научным исследованием, в рамках которого были решены описанные выше проблемы.

### **Цель и задачи исследований**

Цель диссертационной работы – исследование особенностей пространственно-временной динамики популяции лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) в экотоне верхней границы древесной растительности в нижнем течении рек Енгаю и Кердоманшор (Полярный Урал) в условиях изменения климата.

#### **Задачи:**

1. Исследовать закономерности изменения пространственного положения деревьев лиственницы сибирской на верхнем пределе ее произрастания на основе количественных данных, характеризующих местоположение деревьев в прошлом и настоящем, с использованием комплекса оригинальных методик и современных методов пространственного анализа.

2. Разработать методику автоматизированного выделения границ основных типов фитоценозов<sup>1</sup> (лес, редколесье, редины и тундра с отдельно стоящими деревьями) на основе координат деревьев лиственницы сибирской на исследуемой территории и пороговых значений их густоты. Создать с использованием разработанной методики тематические карты размещения деревьев лиственницы сибирской в экотоне верхней границы древесной растительности (ЭВГДР) в нижнем течении рек Енгаю и Кердоманшор (Полярный Урал) в начале 1960-х годов и 2015 году и деревьев, произраставших в верхней части экотона и погибших в течение средневекового похолодания с конца XIII до конца XIX веков.

3. Разработать методику представления, обработки, автоматизированного анализа и аннотирования повторных фотографий, позволяющую устанавливать взаимосвязи между объектами и явлениями, изображенными на фотографиях, и данными, содержащимися в широком спектре геоинформационных слоев: от уровней действия экологических факторов до тематических слоев, характеризующих разные компоненты наземных экосистем.

### **Научная новизна**

Ниже приведены новые, впервые проведенные исследования:

1. Созданы карты, характеризующие распределение деревьев в экотоне верхней границы древесной растительности в нижнем течении рек Енгаю и Кердоманшор (Полярный Урал) в начале 1960-х годов и 2015 году. При этом были использованы географические координаты каждого распознанного на аэро- и космоснимках высокого пространственного разрешения дерева. По сочетанию уровня детализации и пространственного охвата карты превосходят существующие аналоги.

2. Создана картосхема размещения остатков деревьев, произраставших ранее в районе исследований в верхней части экотона верхней границы древесной

---

<sup>1</sup> Под фитоценозой понимается участок местности относительно однородный по одному или нескольким компонентам растительности и/или особенностям лесорастительных условий. В данном случае в качестве критерия выделения участков используется густота деревьев лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.)

растительности и погибших в течение средневекового похолодания, продолжавшегося с конца XIII до конца XIX веков. По пространственному охвату и количеству обнаруженных древесных остатков она превосходит существующие аналоги.

3. Разработана методика автоматизированного определения местоположения границы между основными типами фитоценозов (лес, редколесье, редины, тундра с отдельно стоящими деревьями) на основе координат каждого дерева, позволяющая повысить уровень объективности определения положения границы в пространстве, и создавать карты.

4. Предложен подход позволяющий соотносить объекты и структуры на наземной фотографии с участками местности, которые могут быть охарактеризованы набором пространственных данных в виде векторных и растровых геоинформационных слоев. Данный подход расширяет возможности изучения влияния экологических факторов на древесную растительность в экотоне верхней границы леса. На основе указанного подхода разработана и апробирована методика представления, анализа, автоматизированного аннотирования одно- и многократных фотографий, полученных в районе исследований в шестидесятых годах XX – начале XXI веков.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Границы растительного покрова - это упрощение, модель, применение которой обусловлено гносеологической необходимостью. Для эффективного применения этой модели необходимо сделать ее описание на естественном языке (дать определение), а затем выразить на формальном языке, т.е. представить в виде конкретной последовательности действий, обеспечивающих воспроизводимый результат (методики). Теоретическая значимость работы состоит в решении задачи формализованного нахождения границ между единицами растительного покрова на основе значений координат деревьев. Предложенная методика позволяет автоматизировать процесс поиска границ между разными типами фитоценозов и снизить его субъективность. Она обладает

высокой степенью универсальности и может применяться для выделения (разграничения) любых групп точечных объектов при наличии пороговых значения густоты точек, в соответствии с которыми каждая из них может быть отнесена к той или иной группе объектов.

Анализ изменения во времени пространственной структуры популяций древесных растений на верхнем пределе их произрастания с использованием разработанной методики позволяет получить надежные, по сравнению с существующими в настоящее время аналогами, количественные оценки параметров, характеризующих изменение положения деревьев в пространстве и скорости этих изменений, благодаря существенному снижению субъективности при определении местоположения границы.

Созданные в результате применения методики карты, характеризующие распределение основных типов фитоценозов в начале шестидесятых годов XX и начале XXI веков, позволили выявить изменения горизонтальной пространственной структуры популяции лиственницы сибирской в экотоне верхней границы древесной растительности и получить количественные оценки изменения значений площади участков, которые отнесены к лесу, редколесьям, редине и тундре с отдельно стоящими деревьями.

Предложенный подход к представлению, обработке, автоматизированному анализу и аннотированию ландшафтных фотографий и разработанная на его принципах методика открывают широкие возможности для использования одно- и многократных фотографий для изучения феноменов, обусловленных влиянием экологических факторов на древесную растительность на верхнем пределе ее произрастания. Сделанные в процессе исследований повторные фотографии позволили получить ценную информацию о процессах, которые произошли в экотоне верхней границы древесной растительности в условиях изменения климата за полувековой период.

### **Методология и методы исследования**

В основу исследований был положен комплекс оригинальных, современных и традиционных, хорошо апробированных методов на основе данных, полученных в ходе полевых исследований и обработки космо- и аэроснимков.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика нахождения границ между группами точечных объектов обладает высокой степенью универсальности и позволяет повысить объективность определения местоположения границ. С ее помощью возможно создание картографических материалов, характеризующих пространственное распределение основных типов фитоценозов в экотоне верхней границы древесной растительности.

2. Данные, полученные в результате дешифрирования аэро- и космоснимков высокого пространственного разрешения, свидетельствуют о продвижении деревьев в тундру и увеличении их густоты на ранее облесенных участках района исследований. Установлено почти двукратное увеличение количества деревьев в районе исследований за период с начала 1960-х годов до 2015 года.

3. Созданные карты современного местоположения деревьев и остатков деревьев, погибших в ходе средневекового похолодания, которое продолжалось с конца XIII до конца XIX веков позволили локализовать те участки, которые лиственница сибирская занимала в прошлом, но еще не достигла в настоящем, а также те участки, на которых густота деревьев лиственницы сибирской в современных условиях ниже, чем она была до гибели значительной части популяции, по причине похолодания. Карты основных типов фитоценозов в начале 1960-х годов и в 2015 году, созданные с использованием разработанной методики, позволяют выявлять пространственные закономерности изменения структуры популяции лиственницы сибирской в районе исследований за полувековой период, а также количественно оценить изменение площади участков леса, редколесий, редин и тундры с отдельными деревьями.

4. Методика представления, обработки и анализа однократных и повторных наземных фотографий позволяет формировать у исследователя целостное представление об изучаемом пространстве, соотносить объекты и феномены на фотографии с уровнями действия ведущих экологических факторов, представленных в виде геоинформационных слоев, создавать и дополнять традиционные текстовые описания фотоснимков, переносить данные с фотографии на карту, что открывает для него новые возможности для изучения пространственных закономерностей и взаимосвязей древесной растительности с окружающей средой.

#### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность полученных результатов, обоснованность и надежность полученных количественных оценок обеспечивается большим объемом собранных данных, использованием надежных методов их сбора, обработки, анализа и представления.

Основные результаты и положения работы докладывались и обсуждались на всероссийской конференции молодых ученых «Экология: сквозь время и расстояние» (Екатеринбург, 2011), международной конференции «ИнтерКарто/ИнтерГИС-22. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий в условиях глобальных изменений климата» (Протвино, 2016), VIII международной научно-практической конференции «Экология речных бассейнов» (Суздаль, 2016), VII международной научно-практической конференции «Экологическое равновесие: структура географического пространства» (Пушкин, 2016), 20th European Scientific Conference of Doctoral Students - PEFnet 2016 (Czech Republic, Brno, 2016), Четвертой международной конференции «Инновационные подходы к обеспечению устойчивого развития социо-эколого-экономических систем» (Уфа, 2017), IX международной научно-практической конференции «Экологическое равновесие: геоэкология, краеведение, туризм» (Пушкин, 2018), IX международной научно-практической конференции «Экология речных бассейнов» (Суздаль, 2018), XII международной

научно-технической конференции «Лесная наука в реализации концепции уральской инженерной школы: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса» (Екатеринбург, 2019), международной конференции EuroDendro 2019 (Czech Republic, Brno, 2019), международной научно-практической конференции «Экосистемные услуги и менеджмент природных ресурсов» (Тюмень, 2019), Вторых международных чтениях памяти Г. Ф. Морозова: к столетию памяти классика русского лесоводства 1920- 2020 гг. «Актуальные проблемы современного лесоводства» (Симферополь, 2020), 6th World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (Czech Republic, Prague, 2020), 7th World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (Czech Republic, Prague, 2021).

#### **Публикация результатов исследований**

По результатам исследований опубликовано 23 научных работы, включая одну монографию, 5 статей в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, из них три статьи по специальности 1.5.15 Экология (биологические науки), 7 публикаций, входящих в международные базы данных Web of Science и (или) Scopus.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка, состоящего из 230 источников, 108 из которых опубликованы на английском языке, и 4 приложения. Содержит 127 страниц текста, 19 рисунков и 1 таблицу.

#### **Личный вклад автора**

Все данные, использованные в ходе исследований, а также все выносимые на защиту результаты и положения получены лично автором или при его непосредственном участии.

**Работа выполнена** на кафедре лесных культур и биофизики Института леса и природопользования Уральского государственного лесотехнического университета в ходе выполнения следующих научно-исследовательских проектов:

- РФФИ 09-04-13850-офи-ц. Исследование изменений климата, климатогенной и антропогенной пространственно-временной динамики древесной растительности с использованием многоцелевой информационной системы. Период выполнения: 2009–2010 гг.;
- РФФИ № 09-04-01004-а. Климатогенная и антропогенная динамика древесной растительности в экстремальных условиях ее произрастания. Период выполнения: 2009–2011 гг.;
- РФФИ № 11-04-12114-офи-м. Оценка и прогнозирование динамики лесных ресурсов с использованием космических снимков. Период выполнения: 2011–2013 гг.;
- РФФИ № 15-04-05857 а. Пространственно-временная динамика древесной и кустарниковой растительности под влиянием изменений условий среды климатогенной природы и геоморфологических факторов на Полярном Урале в середине XX – начале XXI веков. Период выполнения 2015–2017 гг.;
- РФФИ № 15-29-02449 офи\_м. Климатогенные изменения структуры и биоразнообразия высокогорной растительности в южной части Уральских гор в последнем столетии. Период выполнения: 2015–2017 гг.;
- РФФИ № 17-14-01112. Климатогенная динамика древесной растительности в горах Субарктики России и ее влияние на изменение запасов углерода на локальном и региональном уровнях. Период выполнения: 2017–2019 гг.;
- РФФИ №8-34-00803 мол\_а. Пространственно-временная динамика древесной растительности и прогнозирование экспансии лиственницы сибирской в тундру на Полярном Урале во второй половине XX – первой половине XXI веков. Период выполнения: 2018–2019 гг.

**Автор выражает благодарность** д-ру биол. наук, профессору С. Г. Шиятову за возможность использовать уникальный архив ландшафтных фотографий и ценные консультации, канд. с-х. наук Д. Ю. Голикову – за помощь

в закладке пробных площадей и картировании древесных остатков, канд. с-х. наук Д. С. Капралову – за помощь в картировании древесных остатков, Е. М. Агапитову – за помощь в закладке пробных площадей и апробации методики распознавания деревьев по космическому снимку высокого пространственного разрешения.

# 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ВЕРХНЕМ ПРЕДЕЛЕ ЕЕ ПРОИЗРАСТАНИЯ

## 1.1 Понятие границы древесной растительности

Уникальность растительного покрова состоит в том, что он обладает свойствами прерывности и непрерывности одновременно. Научные представления о его характере за более чем 100-летний период преодолели путь между двумя полярными точками зрения: концепцией дискретности (или парадигмой Ф. Клементса) и концепцией континуума. Согласно первой точке зрения, между структурами, составляющими растительный покров, имеются реальные естественные границы. В рамках концепции континуума, объединяющей идеи Л.Г. Раменского и Г. Глизона (G. Gleason), расчленение растительного покрова является условным, выполняемым на основе выбранных исследователем критериев исходя из поставленной задачи (Заугольнова, 1999; Grossman et al., 1994; Puzachenko, 2008). В зависимости от приверженности исследователя к одному из двух подходов эти границы могут рассматриваться либо как нечто реально существующее в природе, либо как некоторая абстракция, обусловленная гносеологической необходимостью.

В большинстве случаев выделяемые исследователем единицы растительности разделены переходными зонами, называемыми экотонами. Появление резких границ является частным случаем концепции экотона и, как правило, связано с контрастными условиями окружающей среды. При этом даже исследователи, придерживающиеся концепции дискретности растительного покрова, признают тот факт, что выделяемые границы редко бывают резкими (Grossman et al., 1994). Кроме того, любая переходная зона, представляющая

собой полигональный объект, может быть сведена до границы, т. е. линейного объекта, если это упрощение позволяет глубже проникнуть в суть исследуемых явлений. По мнению В. И. Вернадского (1975), переход к символам и абстракциям, которые он называл «логически созданными отголосками реальности», является единственным способом, позволяющим «мыслящему человеку» исследовать природные объекты, явления и процессы. Характеристики экотона в значительной степени зависят от уровня детализации, на котором он изучается (Gosz, 1993; Fortin et al., 2000; Hufkens, Scheunders, Ceulemans, 2009). Это обусловлено свойствами растительности, которая представляет собой сложное многомасштабное явление. Учет этой особенности в экологических исследованиях, в том числе с помощью абстрагирования, имеет решающее значение для понимания закономерностей и процессов, связанных с растительностью (Bateson, 1979; Grossman et al., 1994; Holtmeier, Broll, 2017).

Существует мнение, что термин «граница» («edge», «boundary») используется при описании изменений в растительном покрове, обусловленных его антропогенным происхождением, а «экотон» – когда речь идет о естественных переходах между экологическими системами (Hufkens, Scheunders, Ceulemans, 2009). Оно не вполне справедливо, так как ширина экотона определяется прежде всего величиной градиентов экологических факторов, а не их природой (Austin, Smith, 1989). Тем не менее следует отметить, что границы, возникшие в результате хозяйственной деятельности человека, могут быть более выраженными по сравнению с границами между ненарушенными (интактными) экологическими системами (Holtmeier, 2009).

В процессе познания реального мира исследователь применяет такие методы, как моделирование и формализация. Границы являются модельным представлением о структуре растительного покрова. Для эффективного практического применения моделей такого рода необходимо выполнить две задачи: сделать описание на естественном языке, иными словами дать

определение, а затем формализовать, т.е. выразить на формальном языке (Villa, Athanasiadis, Rizzoli, 2009), алгоритмизировать.

Растительный покров может быть рассмотрен с точки зрения общей теории систем (Bertalanffy, 1968), так как представляет собой «множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которое образует определённую целостность, единство» (Система, 2003), т.е. систему. При изучении она может быть разделена на системы более низкого уровня (подсистемы) различными способами в зависимости от того, как интерпретируются системные связи и трактуется системная организация (Сочава, 1978).

Выделяя растительные системы, исследователи руководствуются определёнными логическими схемами, лежащими в основе объяснений выбора характеристик исследуемых систем. С.В. Осипов (2002) разделяет все типы объяснений на две группы – на основе внутренних и внешних по отношению к рассматриваемой системе процессов.

К объяснениям на основе внутренних процессов относятся популяционное и ценоотическое. В популяционном объяснении в качестве критерия связности растительной системы используются количество общих видов растений и их численность. Ранг границы между участками тем выше, чем больше различие в количестве видов, встречающихся на этих участках.

В основе ценоотического объяснения лежит взаимодействие главным образом между эдификаторными элементами растительного покрова. О силе взаимодействия растений судят по сомкнутости их надземной и подземной частей: чем она выше, тем взаимодействие более интенсивное. Границы растительных систем проводят в тех местах, где отмечается значимое с точки зрения исследователя изменение характеристик растительного покрова, преимущественно характеристик эдификаторов.

Б.Н. Норин (1987) в качестве меры, позволяющей оценить силу взаимодействия, предложил использовать различные показатели состояния

растений. Он считал, что взаимодействие между особями становится существенным, когда у испытывающих воздействие растений изменяются состав и обилие (масса, степень развития и количество особей, количество продуцируемых ими семян).

Объяснения на основе внешних для растительной системы процессов сводятся к экотопическим и биотопическим. Ведущими факторами организации растительности являются абиотические условия и биотическая среда соответственно (Осипов, 2002). Области (зоны), в которых происходит изменение набора экзогенных процессов, их интенсивности или смены преобладающего процесса, называются границами.

Таким образом, исследование пространственной структуры растительности и поиск растительных рубежей может рассматриваться на основе двух взаимосвязанных аспектов: функционального и геометрического. Функциональный аспект заключается в изучении взаимодействия элементов (особей, популяций, синузид и т.п.) друг с другом и со средой, геометрический – в анализе размещения элементов в пространстве (Заугольнова и др., 1988). В.Б. Сочава (1963, с. 6) писал, что «сообщество организмов не может быть отделимо от занимаемого им пространства, и изучение сообщества должно начинаться с определения геометрических параметров, внутри которых действуют специфичные для него соотношения между организмами, а также между биотой и средой».

Учитывая дуальность природы растительного покрова, В.Б. Сочава (1972) предлагает выделять «два ряда таксономии растительности»: ряд фитоценомеров и ряд фитоценохор. Однако в основе этой двухрядной системы классификации лежит фитоценоз (Холод, 2015). Термин «фитоценоз», впервые предложенный И.К. Пачоским (Миркин, Розенберг, Наумова, 1989), сегодня имеет более полутора десятков определений, каждое из которых содержит различные признаки фитоценоза. Большинство ученых относит к ним в том числе внешность фитоценоза (Быков, 1978), оцениваемую исходя из субъективного ее восприятия

исследователем. Например, в «Словаре понятий и терминов современной фитоценологии» (Миркин, Розенберг, Наумова, 1989) под фитоценозом понимается «условно ограниченный и однородный (на глаз) контур растительности». Приводя определение лесного фитоценоза, Н.А. Луганский, С.В. Залесов и В.Н. Луганский (2010), указывают, что он «в границах легко вычленяется визуально». Таким образом, положение границы фитоценоза зависит от индивидуальных особенностей зрительного восприятия исследователя, его квалификации и опыта.

В общем случае фитоценохоры представляют собой территориальные сочетания фитоценозов. В частном случае при выделении элементарной фитоценохоры ее границы могут совпадать с границами фитоценоза (Дедю, 1990). Ряд фитоценомеров включает следующие подразделения фитосферы, приведенные в порядке подчиненности: свиты (группы) типов растительности, типы растительности, фратрии классов формаций, классы формаций, региональные конгломерации групп формаций, группы формаций, формации, субформации, классы ассоциаций, группы ассоциаций и ассоциации.

Ряд фитоценохор состоит из фитоценохор планетарного порядка (геоботанических поясов, групп геоботанических областей, геоботанических областей), регионального порядка (геоботанических зон, геоботанических подзон, геоботанических провинций, геоботанических округов или макрофитоценохор), геоботанических районов, также называемых топофитоценохорами, включающих мезо- и микрофитоценохоры (Сочава, 1972). Фитоценохоры – хорологические «территориальные неоднородности растительности надфитоценотического уровня» (Миркин, Розенберг, Наумова, 1989). Их также называют «комбинациями растительности» (Намзалов, 1996). Основными признаками гетерогенных территориальных единиц растительности (ТЕР), как правило, являются их состав и структура, а в качестве дополнительных признаков используют экотопологические условия (Полежаев, 2013). Поэтому пространственная дифференциация фитоценохор тесно связана с классификацией форм рельефа по

размеру: микрокомбинации – с формами микрорельефа и почвенными неоднородностями, мезокомбинации – с мезорельефом и сменой материнских пород, макрокомбинации – с макрорельефом и характером подстилающих пород (Кузнецова, 2013).

ТЕР принято отображать на картах соответствующего масштаба. Так, например, микрофитоценохоры представляют на картах масштаба от 1:10 000 до 1:50 000, мезофитоценохоры – от 1:50 000 до 1:250 000, макрофитоценохоры – от 1:250 000 до 1:1 000 000 (Самойленко, Шепелева, Шепелев, 2009). Фитоценохоры часто используются для картографирования территорий, в пределах которых гетерогенность растительного покрова, связанная неоднородностью физико-географической среды, выражена особенно резко, например таких, как болота, тундры, поймы (Холод, Юрковская, 1994).

Классификация ТЕР, предложенная в работе А.Ю. Королюка (1999), основана на закономерностях их пространственной структуры. Согласно этой классификации, различают фоновые ТЕР, как правило, соответствующие зональному типу растительности, и сопутствующие ТЕР, соответствующие азональным и интразональным ландшафтам. Фоновые ТЕР более континуальны, стабильны во времени, им свойственна большая пространственная выровненность экологических условий, большая протяженность контуров, их ограничивающих. Они характеризуются большим количеством видов на единицу площади (альфа-разнообразии). В отличие от них сопутствующие ТЕР имеют четкую внутреннюю структуру. Они более динамично изменяются во времени и находятся в условиях воздействия экологических факторов большей контрастности. Для них характерно интенсивное изменение видового состава растительности в направлении ведущих комплексных градиентов условий среды (бета-разнообразии). Выделение границ между фоновыми ТЕР затруднено, тогда как сопутствующие ТЕР имеют резкие границы, которые могут быть дешифрированы по рисунку на аэро- и космоснимках, обладающему характерным набором дешифровочных признаков.

Задача выделения границ актуальна и в лесном хозяйстве. Она решается в контексте классификаций типов леса. В XX веке в России сформировалось несколько крупных научных направлений в области лесной типологии: эколого-лесоводственное Е. В. Алексеева – П. С. Погребняка; фитоценотическое В. Н. Сукачева; динамическое И. С. Мелехова и генетическое Б. А. Ивашкевича – Б. П. Колесникова (Погребняк, 1955, 1968; Сукачев, 1957, 1972; Мелехов, 1961; Колесников, 1961; Колесников и др., 1974; Смолоногов, 1998). Классификации, создаваемые в рамках первых двух из перечисленных выше направлений, называются естественными. В них в тип леса объединяются участки, однородные по комплексу характеристик компонентов лесного биогеоценоза, т. е. наибольшее значение имеет однородность компонентов лесного биогеоценоза в пространстве. В рамках генетических классификаций, к которым относятся два последних из приведенных выше направлений, при объединении лесных участков в тип леса однородность участков леса по происхождению, процессам развития и динамике имеет приоритет по сравнению с их однородностью по составу, строению и общему облику.

Тип леса в генетических типологиях выделяется в пределах типа лесорастительных условий (Фомин, Иванова, Михайлович, 2020; Фомин и др., 2021), которые определяются по комплексу характеристик: генезису и форме элементов рельефа, световым условиям, физико-химическим свойствам материнских почвообразующих горных пород и почвы, водному режиму, водно-минеральному питанию растений. Тип леса в рамках генетического подхода является этапом лесообразовательного процесса, а типы насаждений (типы фитоценозов) – этапами развития типа леса. Это означает, что в пределах типа лесорастительных условий лесные фитоценозы могут сменять друг друга во времени, при этом внешний облик, состав и структура фитоценозов могут значительно отличаться друг от друга, но все они будут принадлежать к одному и тому же типу леса (Колесников, Зубарева, Смолоногов, 1974; Смолоногов, 1998). Тип леса в генетической классификации складывается из серии типов насаждений

(типов лесных биогеоценозов), другими словами, «тип насаждения является формой существования типа леса, а этот последний представлен генетическим рядом типов насаждений, сменяющих друг друга во времени» (Колесников, Зубарева, Смолоногов, 1974). Тип леса характеризуется определенным ходом роста древостоя, образованного определенными лесообразующими древесными породами.

Генетические классификации всегда являются строго региональными и могут применяться только в пределах территорий, однородных по комплексу климатических, орографических и почвенно-гидрологических условий, для которых они составлены (Фомин и др. 2020). Это еще одно из принципиальных отличий генетических классификаций от естественных, в которых нет строго фиксированных рубежей (Колесников, Зубарева, Смолоногов, 1974). Для того чтобы подчеркнуть региональную специфику генетических классификаций, часто их еще называют географо-генетическими.

Идеи основоположников генетического подхода к классификации типов леса Б.А. Ивашкевича – Б.П. Колесникова получили широкое распространение в СССР. С пятидесятих годов XX века началось интенсивное использование генетических типологий при проведении лесоустроительных работ в разных регионах Советского Союза (Бахсолиани, Сванидзе, 1973; Колесников, 1967; Колесников, Зубарева, Смолоногов, 1974; Каразия, 2009; Рыжкова, Корец, Данилова, 2009; Седых, 2005; Смолоногов, 1995а, б).

Несмотря на то, что с начала 90-х годов XX века наблюдался некоторый спад в области разработки и совершенствования лесных типологий, который был обусловлен рядом социальных и экономических причин, тем не менее лесотипологические исследования, в том числе в рамках генетического подхода к классификации типов леса, продолжались и проводятся в настоящее время.

Тип леса в трактовке С. Н. Санникова с соавторами (2014) отличается от характерных для ранних этапов развития генетической типологии представлений о типе леса как одном монолинейном восстановительно-возрастном ряде

сукцессий биогеоценозов в пределах типа лесорастительных условий. По их мнению, тип леса можно представить в виде множества альтернативных хронологически обособленных рядов (пучка) их дивергенции и конвергенции, каждый из которых периодически реализуется под влиянием катастроф.

После сплошной рубки возможны многочисленные варианты траекторий восстановительно-возрастной динамики формирующихся насаждений, для которых сложно создавать упорядоченные схемы лесохозяйственных решений. Поэтому необходимо проведение систематизации насаждений на основе принципа гомогенности динамических рядов возникновения, развития и становления древостоев. Однородность таких рядов развития древостоев обеспечивается в первую очередь единообразием лесовозобновительного процесса (Цветков, 2009).

Единообразие развития насаждений, которое может быть представлено в виде динамических рядов на основе сходства стартовых условий (наличие и состояние подроста предварительной генерации, характер почвенно-напочвенного субстрата исходного типа насаждения и степень нарушений субстрата при лесоразработках, обеспеченность источниками обсеменения), определяется не только сходством лесорастительных условий, но и однородностью этих условий. Свойства насаждений, сформированных по одному типу генезиса в разных, но экологически близких исходных типах леса могут быть более близкими, чем у насаждений, сформированных в одном типе леса, но по разным типам фитоценогенеза (Цветков, 2009).

К аналогичному выводу пришли С.Н. Санников с соавторами (2014), анализируя возобновление на вырубках. Они установили, что различий по факторам среды, численности и росту всходов хвойных видов на участках вырубки с ненарушенной грубогумусной подстилкой и участках с обожженной или минерализованной поверхностью почвы значительно больше, чем между смежными типами леса.

Разнообразие границ растительного покрова очень велико. Рассмотреть все определения границ растительности в рамках одной работы затруднительно, потому сосредоточим свое внимание на понятии «граница леса», которое непосредственно относится к объекту исследования. В качестве характеристик, на основании которых исследователи отделяют лесные сообщества от нелесных, используют высоту деревьев (Kullman, 1991), сомкнутость крон (Bakker, Olivera, Hooghiemstra, 2008; Kharuk, Im, Dvinskaya, 2010), сомкнутость корневых систем (Санников и др., 2014), форму ствола и кроны (Szeicz, Macdonald, 1995), площадь островков леса (Bryn, 2008) или различные сочетания перечисленных критериев (Wiegand et al., 2006; Camarero, Gutierrez, Fotin, 2006). Пороговые значения этих характеристик у разных авторов различаются (Harsch, Bader, 2011). Как следствие, отличаются и определения границы леса.

Различия в терминологии и смысловом содержании терминов приводят к недопониманию между исследователями и могут стать препятствием для сравнения результатов, полученных разными авторами. Например, трудно использовать границу леса как индикатор реакции древесной растительности на изменения климата, сравнивать изменения ее пространственного положения в разных районах, если в публикациях не уточняется, что их авторы понимали под границей леса (Chiu et al., 2014). При этом ряд исследователей считает, что термин «граница леса» интуитивно понятен и не нуждается в пояснении. E.G. Jobbagy и R.B. Jackson (2000), сравнивая данные о границе леса, приведенные в различных публикациях, вынуждены были исключать из рассмотрения работы, в которых не было четкого определения этого понятия. Такой подход является обоснованным, потому что различаются не только характеристики и их критические (пороговые) значения, необходимые для проведения границ, но и само понимание того, что собой представляет граница.

Термин “treeline” может обозначать переходную зону (эктон), простирающуюся от границы сомкнутого леса до физиологического предела роста деревьев (Chiu et al. 2014; Holtmeier, Broll, 2017), одну из границ

переходной зоны (Smith et al., 2003) или линию, занимающую промежуточное положение между верхней границей сомкнутого леса и верхней границей произрастания древесных видов (Körner, 1998).

Обобщению практики использования терминов, обозначающих виды границ леса, посвящено много работ (Горчаковский, Шиятов, 1985; Bryn, Potthoff, 2018; Chiu et al., 2014; Holtmeier, 2009; Hustich, 1953; Körner, 1998; Smith et al., 2003), однако F.-K. Holtmeier (2009) с сожалением констатирует, что дать определения, отвечающие всем аспектам их использования, вряд ли возможно. Поэтому целесообразно избрать следующий путь: не пытайтесь унифицировать термин «граница леса», в каждом конкретном случае уточнять, что, по мнению исследователя, его использующего, он обозначает.

Наличие определения границы – необходимое, но недостаточное условие для того, чтобы избежать двусмысленности. Руководствуясь только определением, два исследователя проведут границы по-разному. Чтобы однозначно определить местоположение границы, нужно описать метод (методику) выделения границы, т.е. конкретную последовательность этапов, позволяющую получать воспроизводимый результат.

Границы и экотоны – это пространственные явления, описание и исследование которых осуществляются с использованием картографического метода, который представляет собой совокупность знаний, приемов, необходимых для составления и использования карт, систематизации, хранения и передачи информации с помощью графического языка (Карпенко, 1972; Frolov, 1978). Важнейшим инструментом реализации картографического метода являются геоинформационные системы (ГИС). Благодаря повышению доступности и росту производительности персональных компьютеров, появившиеся в начале 60-х годов XX века ГИС к 1990-м годам позволили осуществлять пространственный анализ, обработку изображений, статистический анализ и моделирование не только картографам, но и специалистам из других областей, в том числе экологам, геоботаникам, ландшафтоведом (DeMers, 2009).

Определение местоположения экотонов и их границ всегда связано с идентификацией пространственно однородных областей и участков, которые их разделяют. Выделяют два семейства методов, используемых для решения этой задачи: алгоритмы кластеризации, которые формируют однородные по выбранному критерию группы (области), и методы обнаружения границ, которые определяют области изменений значимых с точки зрения исследователя параметров растительного покрова (Jain, Murty, Flynn, 1999). При использовании методов кластеризации границы формируются как побочный продукт между выбранными участками и принадлежат к разным пространственным кластерам. Реализация методов определения областей изменений может включать анализ первой и (или) второй частной производной измеренных переменных по пространственным координатам (Fortin, 1993). Значительная часть алгоритмов поиска границ разработана и используется при анализе цифровых изображений (Fortin, Drapeau, 1995; Gonzalez, Richard, Woods, 2018).

В зависимости от охвата различают методы выделения границ, основанные на сплошном и выборочном наблюдении. Одним из самых распространенных выборочных методов является метод пробных площадей и его частный случай – метод трансект (профилей). Данные, используемые для определения местоположения границ, могут быть получены как в процессе полевых, так и камеральных исследований при анализе аэро- и космоснимков.

Неотъемлемым этапом выделения границ по аэро- и космоснимкам является процедура их дешифрирования. Она состоит в разделении всех элементов изображения (пикселей) на несколько групп, которые затем относятся к тем или иным объектам. При визуальном дешифрировании необходимо обращать внимание на следующие признаки: рисунок (текстура), форма, размер, тени, отбрасываемые объектами, имеющими высоту (Jensen, 2007).

Развитие геоинформационных технологий позволило в значительной степени раскрыть до недавнего времени нереализованный потенциал автоматизированного выделения типов лесорастительных условий, заложенный

создателями генетического подхода к классификации типов леса (Fomin et al., 2017). Моделирование в геоинформационных системах параметров топографического положения лесных участков для оценки характеристик местообитаний достаточно давно и широко используется в экологических исследованиях (Davis', Goetz, 1990; Guisan, Zimmermann, 2000; Hong et al., 2004; Klinge, Böhner, Erasmi, 2015; Mackey et al., 1994; Ray, Broome, 2003; Rich, Fu, 2000).

Так как в генетической типологии лесов форма рельефа, к которой приурочен тип леса, является одним из важнейших показателей, его характеризующих (Колесников, 1961), разработке подходов и методик автоматизированного выделения типов лесорастительных условий и типов леса, а также картографирования лесного покрова с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР) и данных дистанционного зондирования уделяется большое внимание (Данилова, Рыжкова, Корец, 2010; Рыжкова, Корец, Данилова, 2009; Седых, 2005; Фарбер, 2014; Фомин, Голиков, Капралов, 2013; Фомин, Залесов, 2013; Фомин, Залесов, Магасумова, 2015). Одной из наиболее удачных современных разработок в этой области является методика автоматизированного картографирования восстановительной динамики лесной растительности на основе сопряженного анализа данных ЦМР, мультиспектральной съемки и наземных обследований лесных участков (Рыжкова, Корец, Данилова, 2009; Ryzhkova, Danilova, Korets, 2011). В основе методики лежит создание на основе цифровой модели рельефа слоя ЦМР-композиата, содержащего значения абсолютной высоты, уклона и кривизны поверхности. С использованием алгоритмов автоматизированной классификации и операций пространственного анализа на основе данных мультиспектральной съемки и ЦМР-композиата производится выделение участков леса с однородными условиями местопроизрастания и формируется карта восстановительной динамики растительного покрова.

Данная методика успешно апробирована на территории района общей площадью исследований свыше 1000 км<sup>2</sup> в Среднем Приангарье (Восточная Сибирь. Российская Федерация). При создании карты восстановительной динамики растительности Среднего Приангарья была использована ЦМР SRTM90, спутниковые снимки Landsat ETM+, фондовые и литературные данные, а также результаты полевых исследований равнинной и горной частей района исследований (Данилова, Рыжкова, Корец, 2010; Рыжкова, Корец, Данилова, 2009).

Стремясь к однозначности и объективности процедуры выделения границы, важно помнить, что «геоботаническая карта представляет собой модель, которая графически отражает авторскую концепцию растительного покрова той или иной территории» (Полежаев, 2009). Роль исследователя велика на всех этапах составления карты, но особенно она заметна при проведении генерализации объектов на карте. Различают географическую и геометрическую генерализацию. При географической обобщение осуществляется за счет перехода к таксономическим единицам более высокого ранга, устранения переходных категорий растительного покрова и отбора тех, которые занимают наибольшие площади и наилучшим образом характеризуют соответствующий участок местности. Геометрическая генерализация заключается в обобщении очертаний контуров и объединении нескольких контуров в одно целое (Грибова, Исаченко, 1972). Форма границы в значительной степени зависит от их генерализации (Сочава, 1978).

Кроме методики выделения границ, немаловажное значение имеют методики количественной оценки их динамики. Одна из методик оценки динамики границы леса предложена В.И. Харуком с соавторами (2004). Для ее реализации необходимо иметь дешифрованные аэро- и космоснимки разных лет, т.е. представленные на снимках территории должны быть классифицированы на лесные территории и нелесные (фон). Среди лесных территорий могут быть выделены подклассы (редины, редколесья, древостои). В качестве меры,

характеризующей изменения растительного покрова, используются площади классов и подклассов. Чтобы от площадей перейти к линейным величинам, предлагается два подхода: первый основан на понятии «радиус круга эквивалентной площади», второй – на понятии «сторона прямоугольника эквивалентной площади».

Первый подход предполагает, что, зная площадь класса или подкласса, можно найти радиус окружности, имеющей такую же площадь, что и соответствующий класс и/или подкласс. Разность таких радиусов, полученных для разновременных данных, и будет количественной оценкой сдвига границы. Хотя эта оценка и дает представление о динамике границы, она является результатом значительного абстрагирования от реального объекта исследования.

Второй подход предполагает, что экотон может быть аппроксимирован прямой линией. Длина этой линии принимается равной одной из сторон прямоугольника эквивалентной площади. Зная площадь класса и/или подкласса, длину одной из сторон прямоугольника, можно найти ширину прямоугольника, т.е. той стороны, которая ориентирована по направлению продвижения границы. Разность определенных таким образом величин по снимкам разных лет и будет характеризовать сдвиг. Использование этой меры ограничено значительным количеством допущений, которые исследователь должен сделать: в частности, масштаб рассмотрения должен позволять переходить к линейной аппроксимации экотона, направление продвижения древесной растительности должно быть перпендикулярно линии экотона.

Величины сдвига, основанные на радиусе круга эквивалентной площади и на стороне прямоугольника эквивалентной площади, отличаются в 2–5 раз, что, по мнению авторов подходов, позволяет осуществить интервальное оценивание. От оценки величины сдвига, располагая сведениями о датах получения снимков, послуживших исходными источниками информации, можно перейти к оценкам скорости сдвига.

Участники исследовательского коллектива, работавшего под руководством С. Г. Шиятова (2007), В.В. Фомин и Н.Е Циммерман предложили определять изменение положения границы леса с помощью пространственного моделирования в ГИС, независимо оценивая горизонтальный и вертикальный сдвиги. Статистические распределения значений высотного положения границ получают в результате выполнения следующих действий:

- 1) создание двух растеризованных слоев границ, сформировавшихся к началу и окончанию анализируемого периода;
- 2) наложение этих слоев на цифровую модель рельефа в целях получить значения высоты над уровнем моря для ячеек растровых слоев границ;
- 3) вычисление медианы для каждого из двух распределений; мерой вертикального сдвига является разность медиан распределений высотного положения границ.

Совмещая слой, содержащий буферные области, построенные вокруг границы леса в начале анализируемого периода, и растеризованный слой границы в конце анализируемого периода, можно получить распределение значений горизонтального сдвига. За меру горизонтального сдвига принимают медиану этого распределения.

Подход к оценке вертикального сдвига предлагает А. Ameztegui с соавторами (2015). Он может применяться, когда граница образована дискретными объектами – точками или ячейками. Для каждой точки, принадлежащей к границе, сформированной к началу анализируемого периода, определяют ближайшую по евклидовому расстоянию точку, принадлежащую границе в конце периода. Вертикальный сдвиг – разность между соответствующими парами точек. В зависимости от величины сдвига можно отмечать отступление границы, отсутствие сдвига, умеренное продвижение и значительное продвижение границы. Если изменение высотного положения границы не превышает по модулю половины стороны ячейки, то сделать однозначное заключение о том, что произошло с границей, нельзя, поскольку

такие изменения находятся в пределах неопределенности результатов, полученных с помощью методики.

Растительность высокогорных и высокоширотных районов, как правило, произрастающая в экстремальных почвенно-грунтовых и климатических условиях, – чувствительный индикатор изменений климата (Галазий, 1954; Моисеев и др., 2004; Тихомиров, 1941; Шиятов, Мазепа, Чехлов, 2002; Шиятов, Терентьев, Фомин, 2005; Holtmeier, 2009; Körner, 1999; Kullman, 2001; 2003; Shiyatov, 1993; Mamet, Brown, Trant et al., 2019). Одним из важных направлений исследования реакции растительности на эти изменения является изучение пространственно-временной динамики древесной растительности. Из-за труднодоступности и непривлекательности для сельскохозяйственной деятельности высокогорные районы в большинстве случаев не подвержены существенному влиянию антропогенных факторов. Это обстоятельство является еще одной причиной, по которой такие районы выбирают в качестве территорий для мониторинга реакции растительности на изменение климата. Эффективный мониторинг этих областей имеет решающее значение для оценки воздействия, понимания ключевых процессов, лежащих в основе изменений (Gartzia 2013).

К настоящему времени накоплены многочисленные свидетельства изменения положения границы лесной растительности в XX и начале XXI века, зарегистрированные в различных частях земного шара: в горах Сибири (Плюснин и др., 2008; Kirilyanov et al., 2012), высокогорьях Швеции (Kullman, 2002, 2003), Альп (Krajick, 2004; Leonelli, Pelfini, 2013), в горах Канады (Dufour-Tremblay, Lévesque, Boudreau, 2012) и США (Elliott, 2011, 2012; Millar, Westfall, Delany 2015), в Новой Зеландии (Walter, Post, Convey, 2002), в Гималаях (Gaire et al., 2013; Schickhoff, Bobrowski, Böhner, 2015), на Тибетском нагорье (Chen et al., 2018), на Аляске (Dial et al., 2007), а также в Африке (Shugart et al., 2001).

Пространственные модели являются основой современных экологических исследований (Buckley, Case, Ellison, 2016), часть которых направлена на выявление закономерностей пространственного распределения древесной

растительности (Holtmeier, 2012; Kharuk et al., 2017). Однако большинство работ, посвященных этой теме, носит ретроспективный характер, т.е. ставит своей целью выявить закономерности реакции растительности на изменения климата, которые произошли в прошлом. Значительно меньше исследований посвящено прогнозированию положения границы древесной растительности, а также динамике возрастной и пространственной структуры древостоев, вызванной потеплением. Для создания моделей, выполняющих не только объясняющую функцию, но и обладающих предсказательными возможностями, требуется большой объем данных необходимого пространственного и временного разрешения. Сбор этой информации сопряжен со значительными трудозатратами, но благодаря развитию геоинформационных технологий, автоматизации сбора метеоданных, появлению беспилотных летательных аппаратов гражданского назначения ее доступность повышается. Тем не менее сегодня говорить о достаточности информации, особенно из горных районов, чтобы сделать достоверные прогнозы относительно направлений и величины эффектов, в большинстве случаев преждевременно (Greenwood, Jump, 2014). В этом отношении район исследований, представленных в настоящей работе, является исключением, так как его мониторинг, начатый в 60-е годы XX века С.Г. Шиятовым, непрерывно продолжается до настоящего времени.

Следует отметить, что прогнозирование поведения экосистем в горных регионах представляет собой особую сложность, поскольку их разнообразная топография может привести к тому, что экосистемы будут демонстрировать широкое разнообразие ответов на относительно небольшой территории (Greenwood, Jump, 2014). Несмотря на всю сложность задачи прогнозирования пространственно-временной динамики растительности, посвященных ее решению работ становится все больше (Camarero et al., 2017; Kruse et al., 2016).

Работы по изучению растительности на верхних и полярных пределах ее распространения в Уральском регионе во второй половине и особенно в конце XX – начале XXI века ведутся очень интенсивно (Горчаковский, 1954, 1966, 1975;

Горчаковский, Шиятов, 1973; Капралов и др., 2006; Моисеев и др., 2004, 2008; Растительность..., 1982; Тихомиров, 1959; Фамелис, 1977; Фомин, 2009; Шиятов, 1964, 1967а, 1967б, 1970, 2000; Шиятов и др., 2001, 2007; Шиятов, Мазепа, 2002; Шиятов, Мазепа, Чехлов, 2002; Шиятов, Терентьев, Фомин, 2005). Одним из объективных источников данных о продвижении древесной растительности в горы являются ландшафтные фотоснимки, сделанные в XX – начале XXI века в высокогорьях Полярного, Приполярного, Северного и Южного Урала (Михайлович, Шиятов, Фомин, 2016; Фомин, 2008б; Moiseev, Shiyatov, 2003).

Вертикальный и горизонтальный сдвиги растительных рубежей на горных вершинах Урала обусловлены потеплением и увлажнением климата (Моисеев и др., 2004; Шиятов и др., 2005; Фомин, 2009; 2011; Shiyatov, 2003). Древесно-кольцевой анализ лиственницы сибирской позволил установить несколько периодов изменения климата (Шиятов, 1967а). Период с конца XIII до начала XX века получил название «малого ледникового». За это время верхний предел распространения лесов на Полярном Урале сместился вниз до 270 м над ур. м. (Шиятов, Мазепа, 2002). Только в 20-х годах XX века эта тенденция изменилась на противоположную в связи с очередным потеплением климата Арктики (Мазепа, Шиятов, 2015). Потепление климата способствовало смещению верхней границы леса вверх по горным склонам (на Полярном Урале в XIII в. – с 300 до 340 м над ур. м, в XX в. – до 60–80 м по высоте и 0,5–2,0 км в горизонтальном направлении). В эти периоды наблюдалось увеличение приростов древесины и возрастание сомкнутости крон деревьев (Ваганов и др., 1998; Влияние..., 2006; Шиятов, 2000; Шиятов и др., 2001; Шиятов, Мазепа, 2002; Шиятов, Мазепа, Чехлов, 2002).

В периоды похолодания происходило снижение высотного положения границы леса (Шиятов, 1967а). Установлено цикличное изменение вертикального положения границы леса в районе исследования за последние 1150 лет (Shiyatov, 2003). Продолжительность одного цикла, оказывающего наиболее сильное влияние на возрастную структуру древостоев, составляет примерно 140–160 лет.

В него входят как периоды потепления (60–70 лет), так и похолодания (70–80 лет).

Отечественные исследователи выделяют две классификации верхней границы леса — экологическую и физиономическую (Галазий, 1954; Горчаковский, 1954, 1966; Сочава, 1930; Станюкович, 1960; Тихомиров, 1941; Шиятов, 1970). В экологической классификации типы границ леса определяются по действию ведущего лимитирующего фактора среды, который препятствует дальнейшему продвижению древесной растительности выше в горы. Физиономические типы устанавливаются в зависимости от состава и структуры лесных сообществ, произрастающих на верхнем пределе (Горчаковский, Шиятов, 1970, 1973).

При определении положения верхней границы леса сложно решить следующие вопросы: во-первых, о форме представления границы (линия или полоса); во-вторых, о критериях, руководствуясь которыми следует проводить границу; в-третьих, о методике, в процессе реализации которой будет проведена граница. При проведении сравнительного анализа высотного положения древесной растительности необходимо обеспечить единство методических подходов, в противном случае полученные оценки будет трудно сравнивать между собой.

Выделяют два основных типа продвижения деревьев в тундру: распространение от стены леса на величину радиуса разлета семян и расселение при достижении новым поколением деревьев возраста плодоношения. Расселение второго типа формирует «диффузную» границу леса (Харук и др., 2004). Второй тип продвижения деревьев обусловлен распространением семян птицами и мелкими млекопитающими, что приводит к появлению отдельно стоящих деревьев в тундре, которые могут находиться на расстоянии до 1–3 км от материнского древостоя. Источником распространения древесной растительности могут также стать сохранившиеся в период похолодания островки леса в

относительно защищенных от действия неблагоприятных факторов участках местности (Харук и др., 2004).

Для описания древесной растительности на верхнем пределе ее распространения проф. С.Г. Шиятовым введен термин экотон верхней границы древесной растительности (ЭВГДР) — полоса склона, на которой произрастает древесная растительность от границы сомкнутого леса до одиночных деревьев в тундре включительно (Шиятов, Терентьев, Фомин, 2005; Шиятов и др., 2007). В указанных работах приведены количественные критерии, необходимые для выделения участков сомкнутого леса, редин и редколесий по густоте и сомкнутости крон. Ширина экотона может колебаться от десятков до нескольких сотен метров. Информация о величине и скорости сдвига верхней границы леса позволяет оценить интенсивность процессов, происходящих в экотоне верхней границы древесной растительности.

Данные наблюдений показывают, что граница произрастания некоторых видов растений может передвигаться вверх по склонам Альп со скоростью 1 – 4 м за десятилетие (Изменение климата. Комплект..., 2003). В результате проведения сравнительного анализа аэро- и космоснимков были получены оценки горизонтальных сдвигов древесной растительности самого северного в мире лесного массива «Ары-Мас» в районе р. Хатанга (Харук и др., 2004, 2005а). Значения скорости сдвигов редколесий, редин и древостоев лежат в интервале 3 – 1 м в год. Авторы отмечают, что в зависимости от используемого метода оценки скорости сдвигов могут отличаться в 2 – 5 раз. Оценки величин вертикального и горизонтального сдвигов границы редколесий и лесов для горных массивов Полярного, Северного и Южного Урала, полученные с использованием оригинальных методик (Фомин и др., 2007; Фомин, 2008б; Шиятов и др., 2007), лежат в диапазонах 3 – 18 и 18 – 82 м за десятилетие соответственно (Фомин, 2009). В большинстве литературных источников, за редким исключением (Фомин и др., 2007; Фомин, 2008б; Фомин 2009; Харук и др., 2004; Харук и др., 2005б; Шиятов и др., 2007), приводятся только качественные описания смещений границ

либо количественные оценки без детального описания методики, по которой получены соответствующие оценки.

Разность методических подходов при оценке сдвигов растительных рубежей затрудняет проведение сравнительного анализа изменений местоположения древесной растительности высокогорий в разных регионах Земли в условиях глобального и регионального изменений климата.

## 1.2 Метод наземного фотомониторинга

Наземные аналоговые фотографии и цифровые изображения являются объективным источником данных о местности. Это вместительные и относительно дешевые хранилища большого объема информации (Dahdouh-Guebas, Koedam, 2008). В соответствии с классификацией, предложенной А. М. Берлянтом (1995), наземные фотографии относятся к классу фотографических геоизображений. Интенсивное развитие аппаратной базы и программного обеспечения в начале XXI века привело к значительному вытеснению традиционной фотографии, под которой понимается процесс получения стойких изображений объектов на чувствительных к свету материалах (Микулин, 1969). При этом не каждый способ регистрации изображения на светочувствительном материале может быть назван фотографическим (Чибисов, Щеберстов, Слуцкий, 1988). Существует несколько разных одно- или двухступенчатых способов получения фотографического изображения. Как правило, наиболее широко при получении фотографий использовался двухступенчатый негативно-позитивный фотографический процесс (Бунимович, 1968).

Строго следуя приведенным выше определениям, изображения, полученные без химико-фотографической обработки светочувствительного слоя, фотографиями называть нельзя. Необходимо отметить, что фотографическому способу создания изображения предшествовала стадия фотосъемки – получения с

помощью фотоаппарата скрытого изображения снимаемого объекта (Микулин, 1969). На уровне пользователя эта стадия практически ничем не отличается как при использовании аналоговых (пленочных) фотоаппаратов, так и цифровой аппаратуры. Кроме того, замена светочувствительных материалов ПЗС-матрицами не изменяет содержания метода регистрации изображения – получения наглядных образных копий объектов путем регистрации их собственного или отраженного излучения. Данный факт также хорошо согласуется с исходным переводом термина «фотография» – «светопись».

Приведенные выше причины, по-видимому, способствовали наряду с более точным термином «цифровое изображение» широкому использованию в научных публикациях терминов «цифровая фотография», «цифровое фотографическое изображение», «цифровое фотоизображение», либо просто «фотография» или «фотоизображение», если цифровая технология их получения задается непосредственно описанием или контекстом. В данной работе слова «фотография», «фотоснимок», «снимок», «фотоизображение», «изображение» используются как синонимы.

Метод наземного фотомониторинга (МНФМ) может заключаться либо в сравнении ранее сделанной фотографии с тем, что наблюдается в полевых условиях, либо в сравнении двух и более фотографий с одной и той же точки фотосъемки, полученных в разное время для обнаружения изменений. Первыми научное применение методу нашли гляциологи: в 1888 г. Себастьян Финстервальдер (Sebastian Finsterwalder) начал проводить исследования горных ледников в Тирольских Альпах, сопоставляя старые фотографии с более новыми, полученными с той же камеры. В настоящее время метод широко применяется в естественных и даже общественных науках для решения широкого круга задач, адаптируется к потребностям различных ученых, заинтересованных в оценке темпов изменений (Webb, Boyer, Turner, 2010). МНФМ очень чувствителен к следующим факторам, которые необходимо учитывать при его использовании: техническим характеристикам оборудования, времени года и погодным условиям,

точности определения мест повторной фотосъемки. Исходя из целей фотомониторинга, определяются точки, с которых производится фотографирование, и время фотосъемки (Hall, 2001). Исследователи отмечают, что именно определение точки фотосъемки и положения камеры является самой трудной задачей. Например, только для 55 из 237 фотографий (23 %), сделанных в 1880 г. Д.К. Портером (J.C. Porter), удалось сделать парную фотографию в 2008 г. (Hendrick, Copenheaver, 2009).

Уточнить место фотосъемки помогают сведения в дневниках и путевых заметках. Сведения о способе перемещения экспедиции, а следовательно, и о примерной скорости движения тоже помогают сузить район поиска. Важным источником информации могут стать беседы с местными жителями. Для определения положения камеры следует ориентироваться на характерные формы рельефа, очертания суши. Однако произвести повторную фотосъемку не всегда оказывается возможным. Среди основных препятствий выделяют:

- исчезновение исторических маршрутов (дорог, железнодорожных станций) в результате современной деятельности человека;
- появление новых объектов или значительное увеличение размеров объектов, которое может лишить смысла повторную фотосъемку;
- отсутствие характерных элементов на фотографии и дополнительных сведений.

В настоящий момент координаты новых точек фотосъемки или точек, местоположение которых было реконструировано в ходе исследования с использованием МНФМ, могут определяться с помощью спутниковой системы навигации (GPS).

Фотографии, сделанные в целях изучения изменений, несколько отличаются от традиционной пейзажной фотографии. Данные МНФМ представляют прежде всего научную, а не художественную ценность. Поэтому при фотографировании не следует избегать попадания в кадр дорог, линий электропередач и указателей, которые могут испортить фотографию с эстетической точки зрения. При

проведении фотосъемки для научных целей камера должна беспристрастно запечатлеть все, что видит исследователь, без предварительных оценок красоты пейзажа. В то же время к выбору расположения точек и направлению фотосъемки нельзя подходить только с формальной позиции. Например, неудачным оказался опыт разбиения исследуемого района на квадраты со стороной 100 м и выполнение фотосъемки в четырех взаимно перпендикулярных направлениях. Это привело к тому, что в кадр не попали важные элементы пейзажа, которые были интересны с исследовательской точки зрения и необходимы для облегчения задачи получения повторных фотографий (Puschmann, Dramstad, 2002). В случаях, когда для реализации МНФМ используются старые архивные фотографии, нередко оказывается, что исследуемый район запечатлен на фотографиях неравномерно: есть точки, для которых имеется множество фотографий, а есть отдаленные и труднодоступные области, которые совсем не попали в кадр.

В общем виде определение оптимального количества фотографий, необходимых для того, чтобы охватить весь район исследования, является трудноформализуемой задачей. Набор точек фотосъемки и количество фотографий будут зависеть от цели фотомониторинга, сложности пейзажа и тех явлений, изменение которых исследуется и документируется (Puschmann, Dramstad, 2002).

Сложность применения МНФМ возникает из-за того, что редко имеется возможность использовать одно и то же оборудование для первичного и повторного фотографирования, так как интервал между фотосъемкой довольно протяженный – может быть 100 лет и более. Нередки случаи, когда первичная и повторная фотосъемки выполняются разными исследователями, и восстановить информацию о фотокамере, с помощью которой были получены фотографии несколько десятков лет назад, невозможно. Стремительное развитие технологий получения наземных изображений, в результате которого происходит быстрая смена видов и моделей фотоаппаратов, также является причиной того, что

повторная фотосъемка ведется, как правило, фотоаппаратами, которые значительно отличаются друг от друга по своим техническим характеристикам.

Еще одна трудновыполнимая задача при проведении повторной фотосъемки – точность воспроизведения условий съемки: времени года, условий освещения, погоды, загрязненности воздуха. Сложность состоит и в том, чтобы определить условия съемки первоначального снимка (к сожалению, это не всегда возможно из-за несовершенства технологии получения фотоизображений и степени сохранности фотографий), и в том, чтобы воспроизвести эти условия при повторной фотосъемке (Hall, 2001).

Данные МНФМ, которые, кроме собственно фотографий, включают описание мест фотосъемки, сведения о положении точек фотосъемки, планируемые даты повторной съемки, другую дополнительную информацию, должны быть систематизированы и храниться в виде, удобном для использования исследователем (Hall, 2001). В настоящее время в большинстве случаев хранение данных МНФМ организовано в базах данных (Puschmann, Dramstad, 2002).

МНФМ может дополнять метод, основанный на анализе таких повторных данных дистанционного зондирования, как аэро- и космоснимки (Lee, Limb, Paik, 2010; Marignani, Rocchini, Torri, 2008; Southworth, Munroe, Nagendra, 2004; Walstra et al., 2004), а также картографические материалы различного времени создания (Niederost, 2004). Иногда разные типы изображений используются совместно (McLure, Griffiths, 2002). Данные, полученные с использованием наземного фотомониторинга, могут быть полезны при дешифрировании космических снимков (Clay, Marsh, 2001). Наземные фотографии позволяют запечатлеть изменения местоположения и состояния исследуемых объектов на земной поверхности раньше, чем эти изменения можно заметить на космических снимках. При пространственном анализе данных, полученных в ходе фотомониторинга, их обобщение и нанесение на карту могут проводиться в удобном для восприятия и анализа виде (Bauer, Yuan, Sawaya, 2003, Михайлович, 2011).

### 1.3 Анализ и аннотирование ландшафтных фотографий

Очень часто анализ повторных фотографий ограничивается их визуальным сравнением. Однако этого не всегда достаточно, потому что в результате анализа нужно не просто констатировать факт изменений, но и охарактеризовать эти изменения количественно, определить скорость, с которой произошли изменения, и выявить факторы, их вызвавшие. Один из подходов, позволяющих получить количественные оценки изменений и оценить статистическую их значимость, состоит в сопоставлении площадей объектов на фотографии (Hendrick, Copenheadver, 2009).

Получение количественных оценок размеров, формы и местоположения объектов на изображении возможно с использованием либо ручных методов выделения и измерения объектов, либо специализированных систем автоматизированного анализа изображений. Устранение дефектов, присутствующих на старых фотографиях, обусловленных несовершенством технологий их создания или хранения, а также обработка изображения для улучшения его визуального восприятия человеком являются задачами, которые могут быть успешно решены с использованием таких систем. С их помощью возможно получение общей информации об изображении, например о его цветовых характеристиках, размерах изображения в пикселях, размере дискового пространства, необходимого для его хранения. Важно отметить, что файлы цифровых изображений, полученные с использованием современных устройств, могут содержать набор метаданных, характеризующих изображение, дату и время их получения, координаты точки фотосъемки, размер в пикселях и ряд других.

При разработке алгоритмов автоматизированного анализа изображений необходимо учитывать, что восприятие изображения человеком отличается от того, что «видит» компьютер. Мозг способен осуществлять процесс неосознанной коррекции зрительных образов, причем не всегда точно и адекватно тому, что

есть в действительности. В результате этого возникают так называемые оптические иллюзии. Человек, глядя на изображения, одинаковые области может видеть по-разному, потому что они окружены разным фоном: чем ярче окружающий фон, тем темнее кажется область. Это явление называют контрастом цветов (Блинов, 2004). Мозг человека интерпретирует изображение, учитывая расположение источников света. Наиболее привычной для восприятия является ситуация, когда сцена освещается сверху. Если изменить освещение, изменится и восприятие изображения (Lotto, Purves 1999). Часть оптических иллюзий воспроизводится в лабораторных условиях при просмотре специально созданных изображений, некоторые проявляются при восприятии реальных объектов (Lotto, Williams, Purves, 1999).

С точки зрения психологии бессознательный характер процессов восприятия является преимуществом: не зная механизмов формирования образов, человек не подвергает сомнению информацию, полученную через органы чувств. Ведь постоянные сомнения в подлинности сенсорных данных действовали бы деструктивно. Сами процессы восприятия остаются недоступными человеку, осознаются только их результаты (Бейтсон, 2007). Поэтому реализовать эти процессы в виде программных алгоритмов в настоящее время не представляется возможным. Такие параметры изображения, как резкость, контраст, насыщенность, могут быть получены инструментально. Однако с точки зрения восприятия изображения наблюдателем они не являются определяющими. Механизмы анализа, который производится в мозгу человека, сложны и связаны с его развитием, обучением, опытом, стоящими перед ним задачами (Блинов, 2004). Контекст играет решающую роль в понимании сцены. Для понимания содержания изображения требуется не только обнаружение отдельных объектов, но и определение их взаимного положения (Hoiem, Efron, Hebert, 2008).

Автоматический и даже автоматизированный анализ изображений предполагает наличие ряда ограничений, накладываемых как на сам объект анализа, так и на окружающие условия. Как правило, они касаются требований к

освещению и позиционированию объектов. Однако реальный мир демонстрирует чрезвычайную изменчивость. Вид объекта на изображении может значительно меняться при изменениях освещенности или в присутствии других объектов. Серьезно затрудняет распознавание трехмерных объектов проблема загромождения объектов друг другом (Шапиро, Стокман, 2006). В некоторых областях применения анализа изображений (например материаловедение) требования к входному изображению сформулировать и выполнить относительно просто. В большинстве случаев анализа ландшафтных фотографий сделать этого нельзя. Один и тот же объект на изображении может выглядеть совершенно по-разному в зависимости от того, на каком плане он находится. В качестве примера можно привести травянистый покров на ближнем и дальнем плане. Благодаря умению находить линию горизонта, сравнивать величины объектов, анализировать текстуры, человек правильно распознает этот объект (Блинов, 2004), чего нельзя ожидать от современных систем анализа изображений.

Сегментация – процедура разделения изображения на составляющие его области или объекты. Она является одной из самых сложных и нетривиальных задач анализа изображений. Традиционно выделяют два подхода к сегментации изображения. Один из них состоит в поиске на изображении резких изменений сигнала, например перепадов интенсивности (яркости). Другой подход основывается на выделении областей, однородных по какому-либо критерию, например областей, соответствующих определенному диапазону интенсивности (яркости). Предполагается, что выбранный признак внутри каждой области меняется незначительно, но в разных областях принимает существенно разные значения.

В настоящий момент разработано большое количество различных алгоритмов, позволяющих сегментировать изображения на интересующие исследователя объекты (Гонсалес, Ту, 1978; Гонсалес, Вудс, 2005; Форсайт, Понс, 2004), но все они имеют ограниченные области применения, предназначены для анализа узкого класса изображений. Универсальных методов обработки

изображений, сравнимых по эффективности с интеллектуальными возможностями человека, еще не найдено (Попова, Датъев, Шишаев, 2008).

Широкое распространение также получили алгоритмы, основанные на методах статистической классификации (Wang, Li, 2002). В основе статистических методов лежит аналогия между изображениями и системами, рассматриваемыми в статистической физике. Положение пикселя изображения сравнивается с положением атомов в кристаллической решетке. Эта модель называется марковской моделью изображения (Geman S., Geman D., 1984).

Следует отметить, что не всегда целью анализа изображений являются выделения объектов. Иногда, для того чтобы судить о наличии изменений при анализе повторных фотографий, используют интегральные характеристики изображения, например спектральный отклик (spectral response). Этот подход был применен в исследовании роста и старения леса (Clay, Marsh, 2001).

На бинарных изображениях, созданных путем сегментации исходного изображения, возможно получение значений количественных параметров, определяющих размеры, протяженность и форму исследуемых объектов: площадь объекта (объектов), периметр, радиус эквивалентного круга, факторы формы, доля фазы (Гонсалес, Вудс, 2005). Получение значений перечисленных выше параметров, характеризующих объекты исследований, изображенные на повторных исторических фотографиях, позволяют проводить сравнительный количественный анализ изменений их размеров, формы или местоположения. Кроме того, использование этой информации в запросах позволит повысить эффективность поиска изображений в базе данных.

При анализе изображений естественных и искусственных ландшафтов достаточно часто сегментирование изображений сопряжено с задачей их аннотирования. Под аннотированием изображения обычно понимается определение отличительных особенностей и содержания изображения. В дальнейшем аннотации используются для поиска изображений. Значительное количество публикаций, посвященных способам автоматизированного

аннотирования изображений, обусловлено необходимостью повышения эффективности поиска изображений в сети Интернет. Большинство существующих на данный момент поисковых систем осуществляют поиск изображений по текстовым описаниям (англ. Description-Based Image Retrieval, DBIR). При этом такие системы уже не могут в полной мере удовлетворить потребности человека. Поэтому возрастает количество исследований (Попова, Датьев, Шишаев, 2008), посвященных разработке алгоритмов аннотирования изображений, соответствующих их содержанию (англ. Content-Based Image Retrieval, CBIR).

Перечисление объектов на изображении человеком – самый простой, но трудоемкий способ аннотирования. При существующем большом объеме графической информации возникает необходимость автоматизировать процесс аннотирования изображений (Carneiro et al., 2007). Задача аннотирования изображений тесно связана с задачей распознавания образов. С точки зрения автоматизации данная задача является чрезвычайно сложной. Обусловлено это несколькими причинами. Одна из них связана с тем, что информация, которую получает человек, «читающий» изображение, не равна числу объектов, показанных на нем. Количество графических образов, которые способен сформировать человек, превосходит количество объектов (Берлянт, 1995). Кроме того, фиксация графического образа и его содержательная интерпретация зависят от цели «читателя», которая может быть выражена четко или интуитивно, но всегда присутствует в процессе чтения.

Аннотирование изображений – это не обязательно всестороннее его описание. Прежде всего это функциональность, позволяющая связать изображение и текст, тем самым расширяющая возможности анализа изображений и их поиска в базе данных.

В настоящее время разработано большое количество методов аннотирования, которые можно разделить на методы, предполагающие контролируемое и неконтролируемое «обучение» информационной системы.

Первая группа методов основана на наличии набора тренировочных или обучающих изображений, содержащих интересующие объекты, используемые исследователем для построения классификатора. Затем классификатор применялся к изображениям из базы данных. Процедура аннотирования, таким образом, состоит в том, чтобы определить, имеются ли интересующие объекты из набора тренировочных изображений на изображениях из базы. Вторая группа методов используется, когда отсутствует какая-либо дополнительная обучающая информация об изображении для аннотирования. Обучаемая система должна сама выявить признаки полезные для распознавания и установить связи между ними, т.е. создать классификацию.

Существует также множество других подходов к систематизации большого разнообразия методов распознавания и аннотирования изображений (Попова, Датъев, 2007; Armi, Fekri-Ershad, 2019; Dutt, Chaudhry, Khan, 2012; Jain, Duin, Mao, 2000; Rao, Reddy, 2011).

## 2 ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ, ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ, ОБЪЕМ ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ

Район исследований – участок юго-восточного макросклона горного массива Рай-Из (Полярный Урал), расположенный между левым берегом реки Енгаю и правым берегом впадающей в нее реки Кердоманшор. Географические координаты правого нижнего и левого верхнего углов района – 66.7933° с. ш., 65.6545° в. д. и 66.8371° с. ш., 65.5044° в. д. соответственно, высота над уровнем моря находится в пределах от 110 до 313 м (Рисунок 1). Его площадь составляет 862,5 га. Территория относится к естественным ландшафтам, практически не подверженным антропогенному влиянию, хозяйственная деятельность ограничивается многолетним выпасом оленей (Андреяшкина, 2014), сбором грибов и ягод (Фомин, 2011). Рельеф района исследований и прилегающей к нему территории сформирован под влиянием ледника в ходе последнего глобального горно-долинного оледенения. Ледниковые отложения образовали большое количество гряд, бугров и впадин. В пределах района встречается много ручьев и небольших озер (Шиятов, Терентьев, Фомин, 2005). Преобладающие горные породы – основные (габбро) и ультраосновные (перидотиты). Почвенный покров сложен и неоднороден, достоверный почвенно-картографический материал для выбранного района отсутствует (Фирсова, Дедков, 1983).

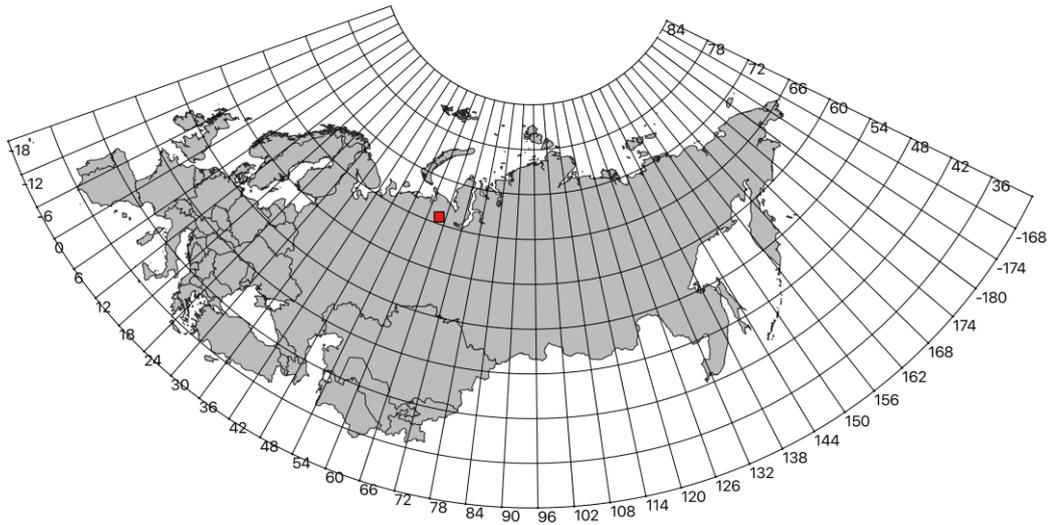
Район включает следующие высотные пояса растительности: горные лиственничные леса предлесотундрового типа и подгольцовые лиственничные редколесья (Фирсова, Дедков, 1983). Древостои состоят главным образом из лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Lebed.), изредка встречается ель сибирская (*Picea obovata* Lebed.). Подлесок образован карликовой березой (*Betula nana* L.) (Фирсова, Дедков, 1983), ивой сизой (*Salix glauca* L.) (Ваганов, Круглов, Васильев, 2008), ольховником (*Alnus fruticosa* Rupr.) и можжевельником сибирским (*Juniperus sibirica* L.) (Панова и др., 2003). В травяно-кустарничковом ярусе наиболее часто встречаются багульник болотный (*Ledum palustre* L.),

водяника (*Empetrum* L.), толокнянка альпийская (*Arctous alpina* (L.) Niedenzu), толокнянка обыкновенная (*Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng.), подбел (*Andromeda polifolia* L.), голубика (*Vaccinium uliginosum* L.), морошка (*Rubus chamaemorus* L.), пушица (*Eriophorum vaginatum* L.), кровохлебка (*Sanguisorba polygama* Nyl.), камнеломка (*Saxifraga hirculus* L., *Saxifraga caespitosa* L.), хвощ лесной (*Equisetum sylvaticum* L.). В напочвенном покрове преобладают зеленые мхи и лишайники (Панова и др., 2003).

Особенность климата – поступление малого количества тепла и избыточное увлажнение, источником которого являются талые и дождевые воды. Ближайшая к району исследования метеостанция Салехард расположена в 55 км от него на юго-восток. Инструментальные наблюдения на метеостанции ведутся с 1882 г. Временные ряды средней температуры и суммарного количества осадков представлены на Рисунках 2 – 4. Средняя температура воздуха летних месяцев (с июня по август) возросла на 1,2 °С: в 1883–1916 гг. она составила 10,3 °С, а в 1924–2015 гг. – 11,5 °С. Средняя температура воздуха холодного периода (с ноября по март) увеличилась на 1 °С (с -20,7 °С в 1883–1916 гг. до -19,7 °С в 1924-2015 гг.), а зимних месяцев (с декабря по февраль) – на 0,8°С (с -23,1 °С в 1883–1916 гг. до -22,3 °С в 1924–2015 гг.). В конце 60-х годов XX века отмечается локальный минимум значений этого показателя. В период с 1891 г. по 2015 г. количество осадков в холодные месяцы возросло на 0,5 мм ежегодно, а в летние – на 0,4 мм (оценка выполнена по линии тренда).

Важную информацию о климате в более ранние периоды позволяет получить древесно-кольцевой, или дендрохронологический, анализ. С его помощью можно с точностью до года или даже сезона реконструировать климатические условия, сложившиеся сотни и тысячи лет назад (Горчаковский, Шиятов, 1985). Особенностью исследованной территории является большое количество остатков погибших деревьев. Самая древняя древесина принадлежит деревьям, появившимся в середине VIII в. (Шиятов, Мазепа, 2007).

а)



б)

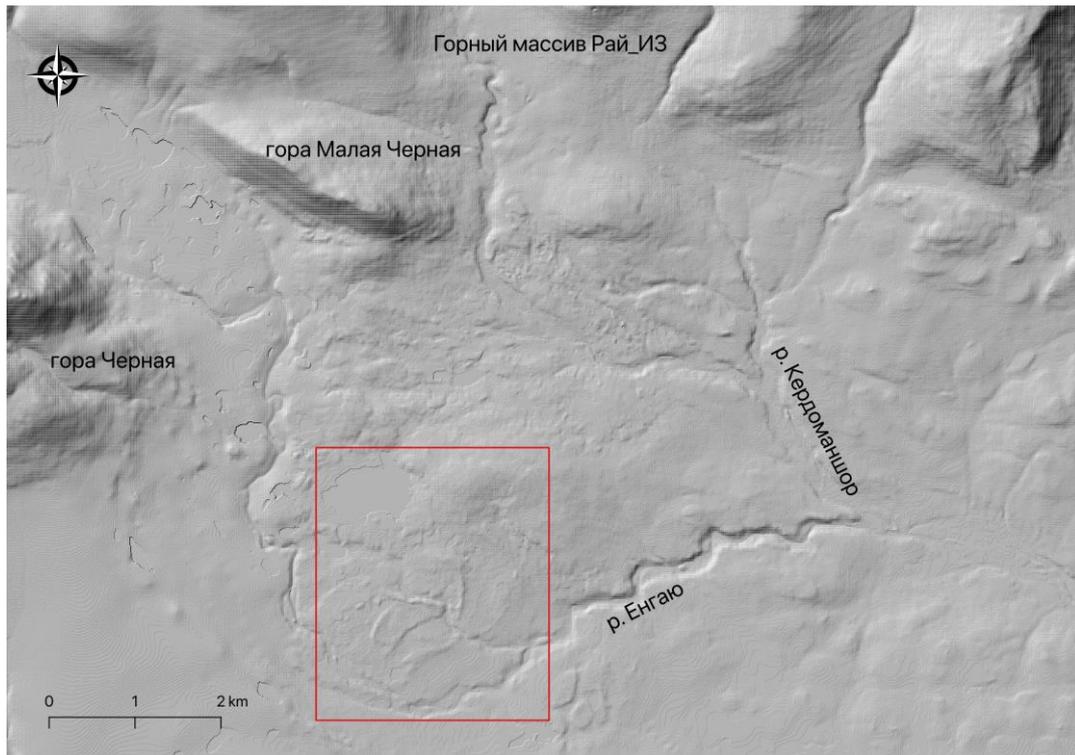
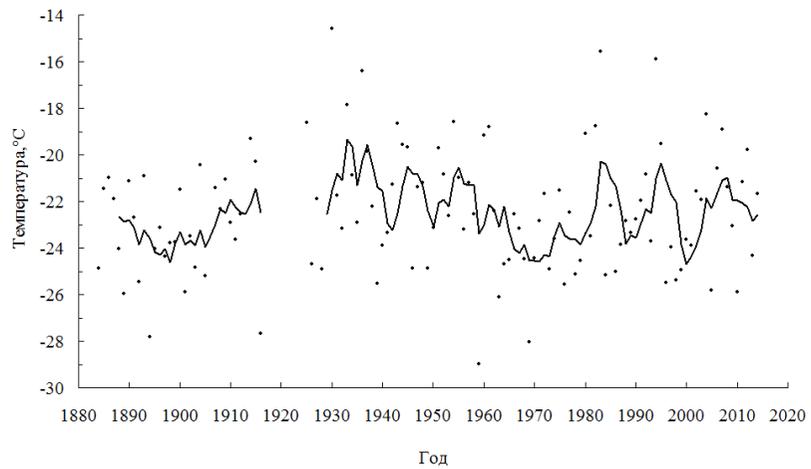
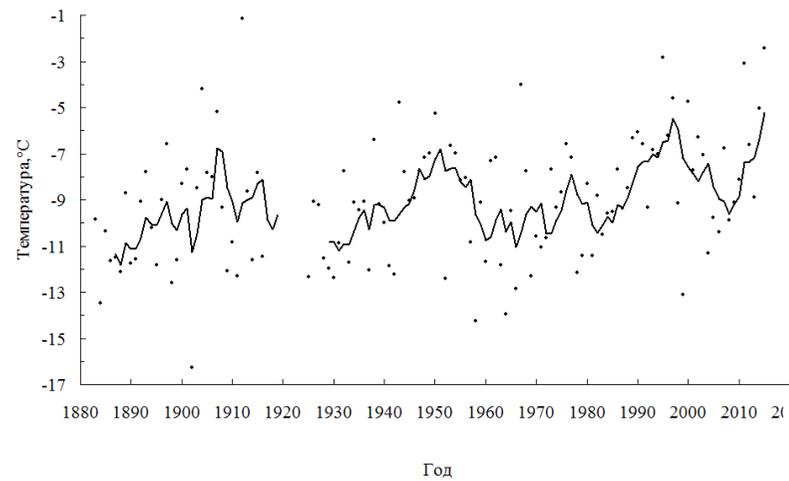


Рисунок 1 – Местоположение района исследований на картосхеме государств бывшего СССР и Европы (а); теневая модель исследуемой территории и прилегающей к нему территории (б). Район исследований обозначен рамкой красного цвета

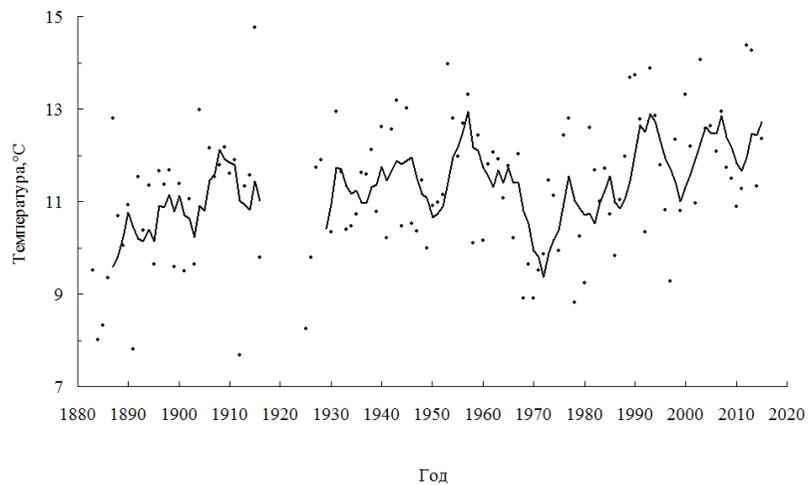
а)



б)



в)



г)

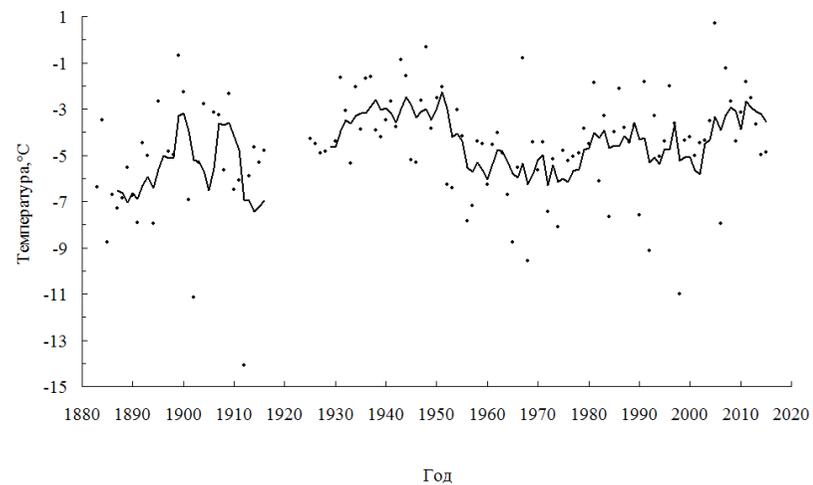


Рисунок 2 – Временные ряды средней температуры в зимние (а), весенние (б), летние (в) и осенние (г) месяцы

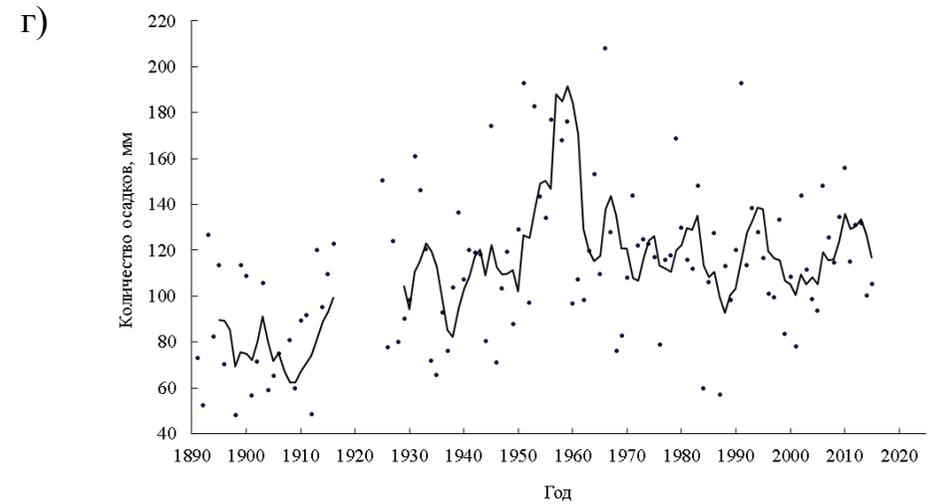
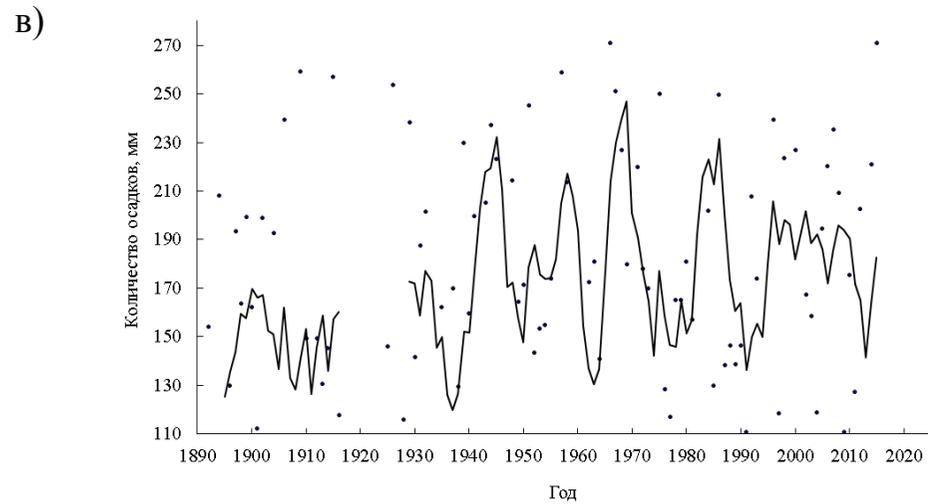
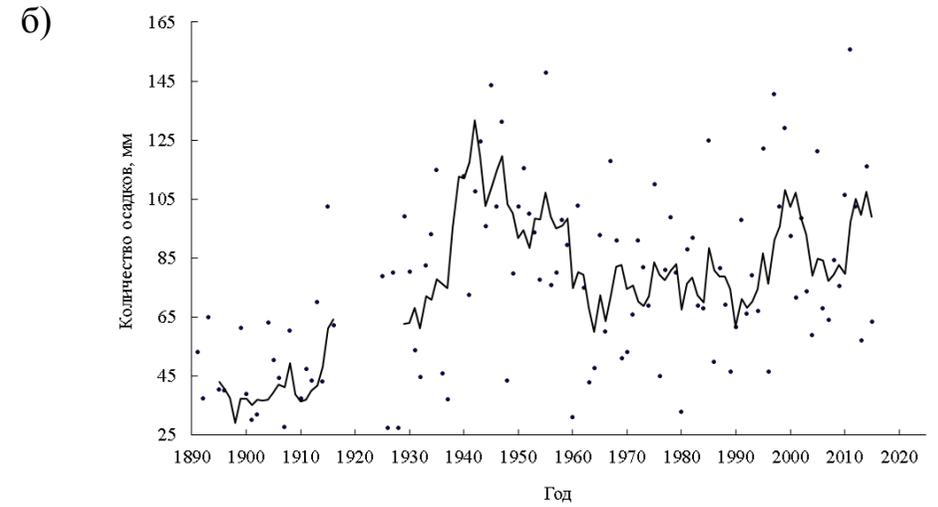
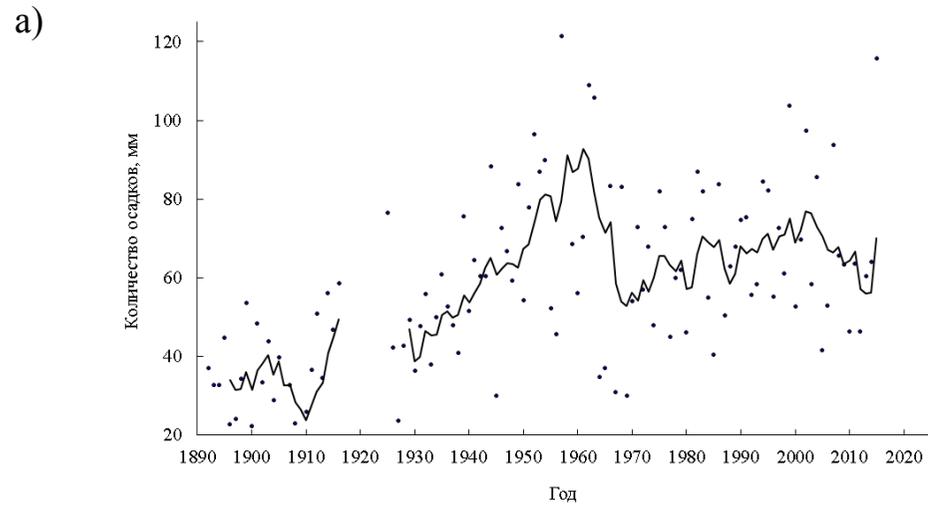


Рисунок 3 – Временные ряды суммарного количество осадков в зимние (а), весенние (б), летние (в) и осенние (г) месяцы

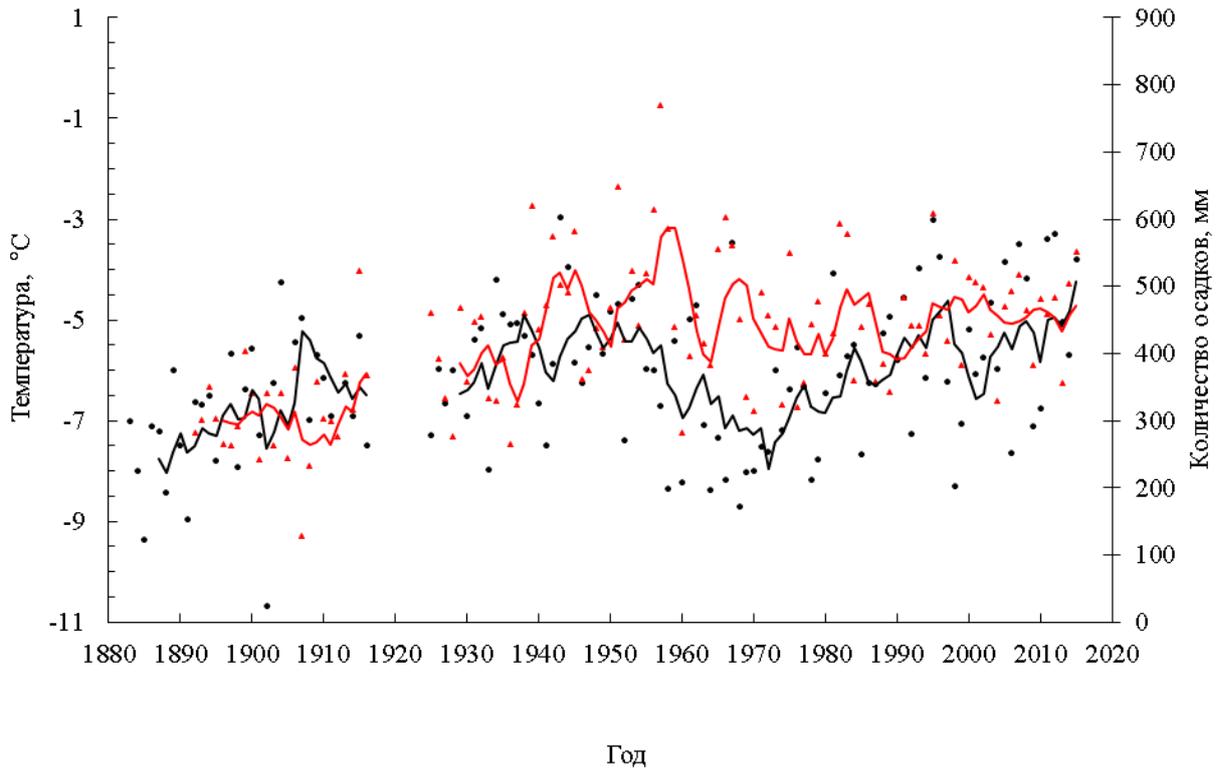


Рисунок 4 – Временные ряды среднегодовых температур (черная линия) и суммарного количества осадков (красная линия)

С помощью дендрохронологического метода установлено, что похолодание в Северной Евразии, называемое малым ледниковым периодом, сменившее средневековое потепление климата, началось в районе исследования в самом конце XIII века и продолжалось вплоть до начала XX века (Мазепа, Шиятов, 2015).

Снежный покров распределен неравномерно, что обусловлено сложным рельефом и особенностями ветрового режима на разных участках исследованной территории. На значительной части района снег сходит в конце мая – начале июня. На отдельных участках (с подветренных сторон склонов или лесных полос), где глубина снежного покрова достигает 5–6 м и более, снег может сохраняться вплоть до середины июля–начала августа (Рисунок 5), что сказывается на сроках начала вегетационного периода (Горчаковский, Шиятов, 1985).



Рисунок 5 – Вид снежника 19 июля 2017 г. Фотография А.П. Михайлович

Объект исследований – лиственничные (*Larix sibirica* Ledeb.) редины и редколесья. Для оценки пространственно-временной динамики деревьев с начала шестидесятых годов XX века до начала XXI века были использованы полутонные аэроснимки 1962/1964 гг. и космический снимок высокого пространственного разрешения 2015 г., полученный с использованием интернет-сервиса Яндекс.Карты ([maps.yandex.ru](https://maps.yandex.ru)). Данные аэро- и космоснимки имеют высокое пространственное разрешение, позволяющее определять местоположение дерева (Приложения А и Б). Все снимки были геопривязаны в географической информационной системе QGIS. На их основе цифрованием созданы векторные точечные слои, каждая точка которых соответствует местоположению дерева в 1962/1964 и 2015 гг.

Несмотря на интенсивное развитие компьютерных систем, позволяющих выполнять автоматизированный анализ изображений, «ручное» дешифрирование снимков является по-прежнему востребованным при проведении анализа

растительного покрова. Это связано, в первую очередь, сложностью автоматизированного распознавания объектов на таких изображениях. Причины, которые обуславливают сложности при создании алгоритмов автоматизированного анализа следующие: большое разнообразие объектов растительного покрова, которые могут незначительно отличаться друг от друга по форме, размеру, цвету и текстуре; особенностями сезонной динамики растительности; условиями освещения (сезонными и суточными), отличия в характеристиках съемочной аппаратуры, влияющими на количественные и качественные характеристики изображений.

Человек обладает универсальной и более совершенной (по сравнению с существующими в настоящий момент компьютерными аналогами) системой распознавания объектов на изображениях. Поэтому привлечение операторов для решения задач, связанных с дешифрированием объектов на аэро- и космоснимках, является оправданным. При этом необходимо учитывать специфику изображений и объектов, которые приведены на них. Перед обучением операторов для дешифрирования объектов требуется предварительное изучение изображений для формализации этапов методики. Это необходимо делать для каждого класса изображений, в который относят снимки по совокупности всех отличающих их от других изображений параметров.

На Рисунке 6 представлен космоснимок района исследований и его увеличенный фрагмент, на котором хорошо заметны выпуклые области, соответствующие деревьям.

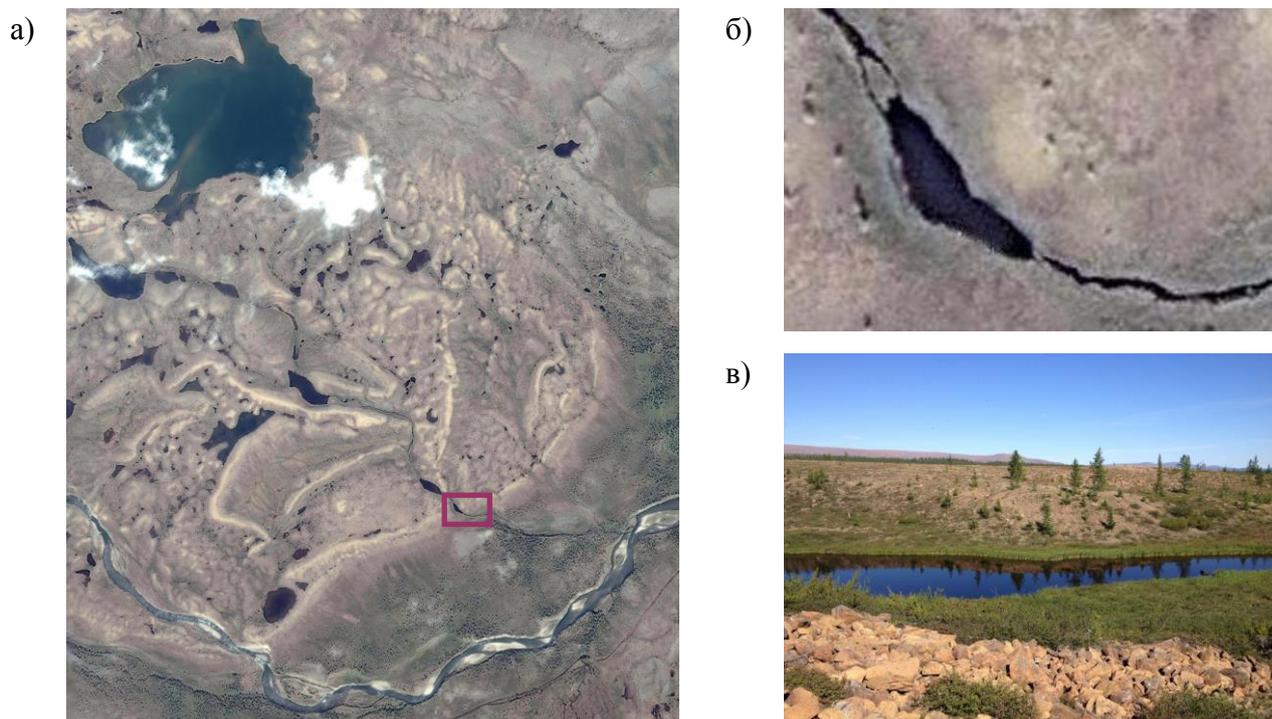


Рисунок 6 – Космический снимок района исследований 2015 (а). Рамкой обозначен фрагмент, увеличенное изображение которого приведено на рисунке 6,б. Соответствующая ему ландшафтная фотография представлена на рисунке 6,в

Для оценки качества дешифрирования снимков и определения порогового значения высоты дерева, которое распознается оператором устойчиво, в разных частях района исследования закладывались круговые пробные площади с радиусом 11 м. Расположение пробных площадей показано на Рисунке 7, а количество деревьев на каждой пробной площади – в Таблице 1. Картосхемы размещения лиственницы сибирской на пробных площадях и гистограммы распределения отдельных таксационных характеристик представлены в Приложении В.

Таблица 1 – Количество деревьев лиственницы сибирской на пробных площадях

№ пробной площади	Общее количество деревьев, шт.	Количество деревьев высотой, шт.		
		до 2 м	2–4 м	более 4 м
1	137	112	8	17
2	89	85	3	1
3	8	5	3	0
4	112	88	17	7
5	101	83	14	4
6	23	21	1	1
7	268	260	2	6
8	119	108	9	2
9	52	49	1	2

Местоположение каждого экземпляра лиственницы сибирской (от всходов до взрослого дерева) на пробной площади определяли относительно ее центра, географические координаты которого были определены с использованием GPS-приемника Etrex 10 (Etrex Inc.). Координаты каждого дерева рассчитывали с использованием тригонометрических формул по значению угла (от направления на север) линии, соединяющей центр пробной площади и местоположение дерева, и расстояния между центром пробной площади и деревом. Для измерения угла использовали буссоль AP-1 (АО «ВОМЗ», Россия). У каждого дерева измеряли диаметр у шейки корня и на высоте 1,3 м (если высота дерева превышала этот порог), высоту и проекцию диаметра кроны в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Для каждой пробной площади в географической информационной системе QGIS были созданы точечные векторные слои, каждая точка которого

соответствует местоположению дерева. Атрибутивная таблица каждого слоя содержит биометрические характеристики каждого экземпляра лиственницы. Также были созданы векторные полигональные слои с кронами деревьев. Крона каждого дерева в данных слоях представлена окружностью. Радиус окружности кроны определяли по среднему радиусу, рассчитанному по данным прямых измерений проекции кроны в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Геопривязку космического снимка производили в QGIS, сшивку и геопривязку снимков, полученных при помощи дрона, была выполнена с использованием программы Photoscan (Agisoft, Россия).

Каждой пробной площади соответствует фрагмент космического снимка и снимок (мозаика из снимков), полученных с дрона. Данные пробных площадей были разделены на обучающую и тестовую выборки. В первую выборку попали 3 пробные площади, во вторую — 6.

К дешифровочным признакам, по которым можно отличить кроны деревьев лиственницы сибирской (*Larix sibirica* L.) от других древесных видов, на снимках с дрона относятся: цвет (светло-зеленый), наличие теней от стволов деревьев (при проведении аэрофотосъемки в солнечный день), более размытая текстура кроны (менее выраженные отличия между светлыми и темными элементами в пределах кроны). Наличие тени от ствола дерева позволяет определить местоположение дерева лиственницы на фоне растительного покрова из карликовой березы (*Betula nana* L.), а текстурные характеристики позволяют отличить лиственницы от можжевельника сибирского (*Juniperus sibirica* burgsd.). Деревья на спутниковом снимке характеризуются хорошо выраженным градиентом интенсивности и выглядят как выпуклые объекты с тенями.

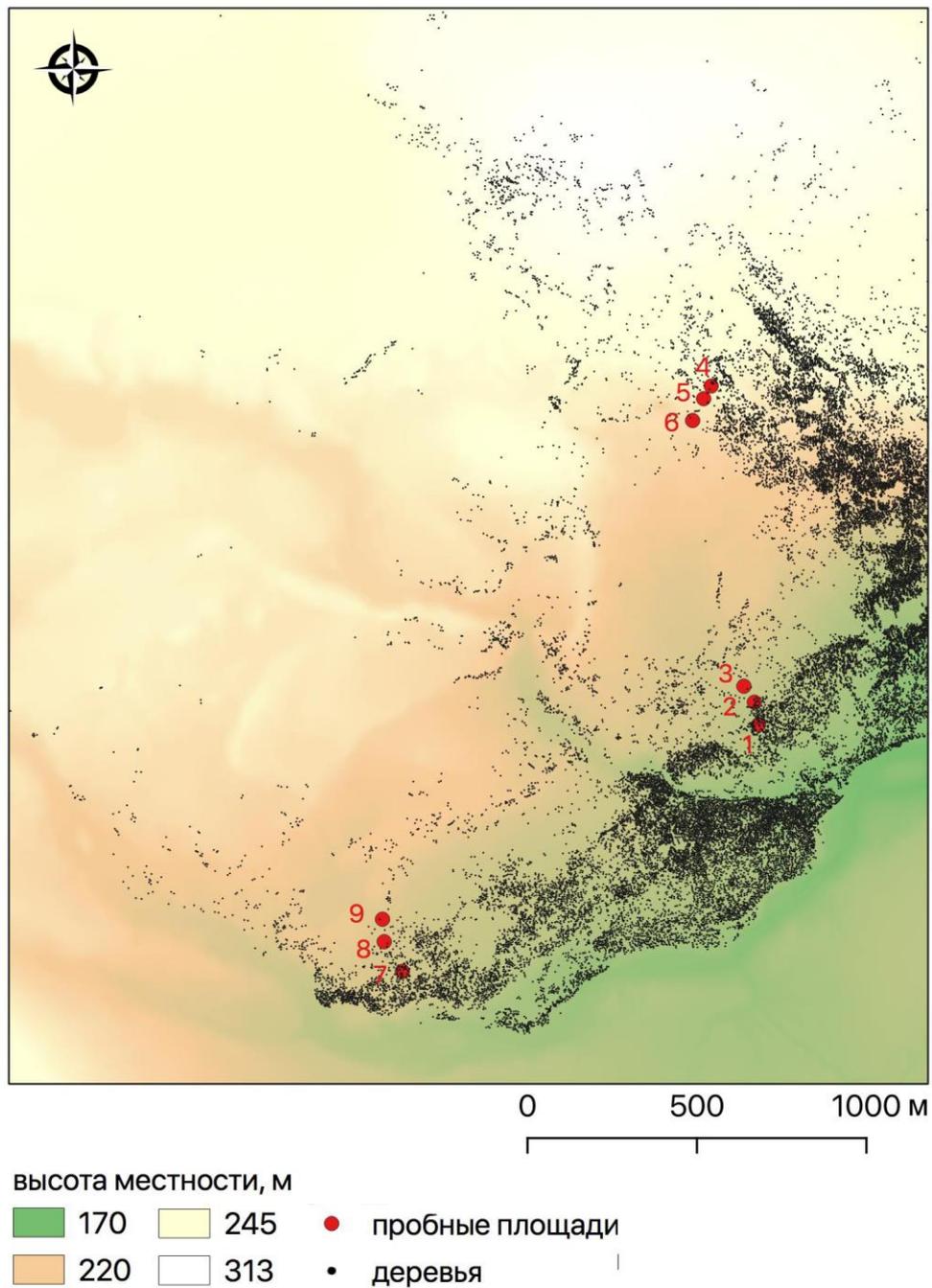


Рисунок 7 – Картограмма расположения пробных площадей в районе исследований. Черными точками обозначено местоположение деревьев в 2015 г.

На Рисунке 8 представлены два изображения пробной площади № 2: в виде космоснимка и снимка, сделанного беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) DJI Phantom 4 Advanced с высоты 50 м. На каждом из них окружностями обозначены кроны деревьев. Диаметр окружностей равен среднему значению

диаметров, измеренных в натуре у каждого дерева в двух взаимно перпендикулярных направлениях при закладке пробных площадей.

Сопоставление результатов дешифрирования аэро- и космоснимка с наземными измерениями и изображениями с БПЛА путем наложения полигонального слоя крон деревьев на спутниковое изображение и снимки, полученные с использованием дрона, позволили установить пороговые значения (нижнюю границу) значений высоты дерева и размера его кроны, которые можно уверенно различить на снимках этих двух классов. Для спутникового снимка минимальное значение высоты дерева и диаметра кроны, попавших в выборку составили 2,3 и 1,4 метра соответственно. Для снимка, полученного при помощи беспилотного летательного аппарата, величины этих параметров совпали — 0,2 метра.

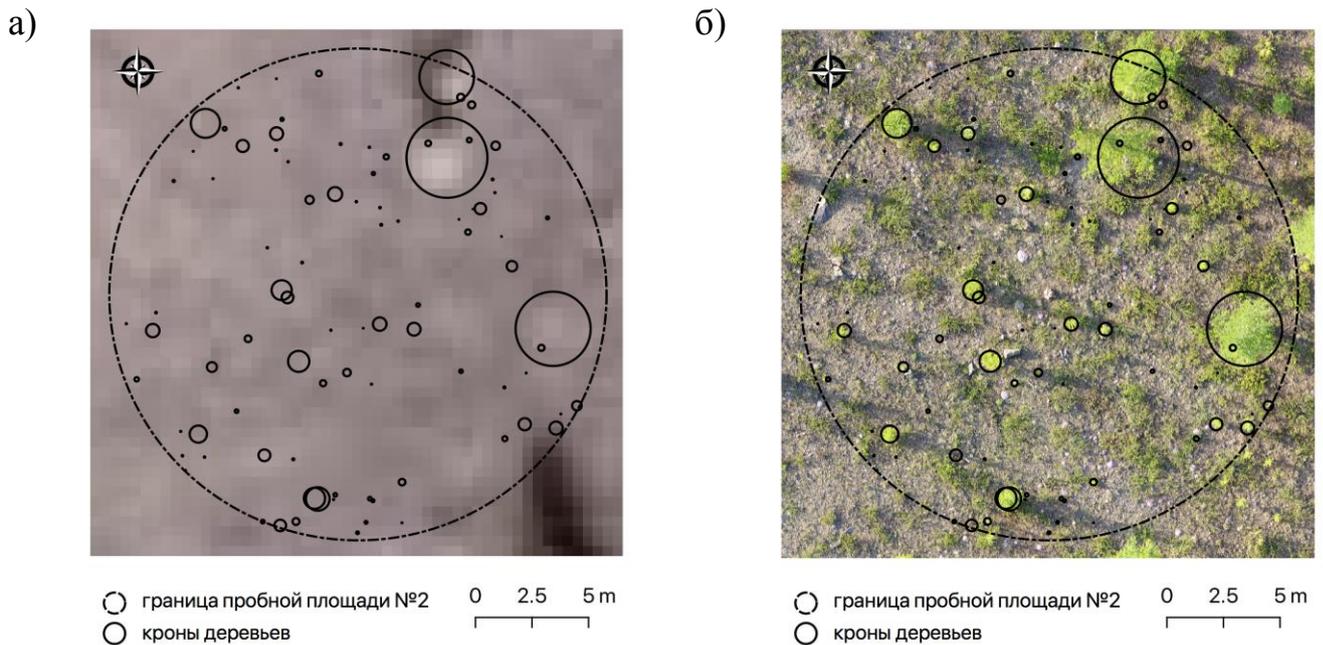


Рисунок 8 – Картосхемы, характеризующие размещение деревьев на пробной площади № 2, наложенные на космический снимок (а) и снимок, полученный с помощью беспилотного летательного аппарата (б). Местоположение каждого дерева и размеры его кроны были рассчитаны на основе данных, полученных в ходе закладки пробной площади

Для проведения оценки качества распознавания лиственницы сибирской на изображениях были привлечены 4 оператора (Fomin et al., 2022). После тренировки на обучающей выборке каждый из них выполнил распознавание деревьев на снимках пробных площадей для тестовой выборки по ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002.

Данный вид анализа предполагает расчет двух статистик Манделя:  $h$  – согласованность результатов распознавания объектов, полученных разными операторами и  $k$  – совместимость результатов, полученных одним оператором. При оценке результатов распознавания используются два критических уровня, приведенных в таблице в приложении к стандарту. Если расчетное значение тестовой статистики меньше 5%-ого критического значения, тестируемую позицию признают корректной. Если оно больше 5%-ого критического значения и

меньше 1%-ого, то тестируемую позицию признают квазивыбросом, т.е. подозрительным результатом, требующим внимания и объяснения. Если значение меры больше 1%-ого критического значения, то соответствующую позицию признают выбросом.

В целом анализ совместимости подтвердил согласованность полученных оценок операторами. Они стабильно распознают одинаковое в пределах естественной изменчивости количество деревьев при повторных экспериментах, а различия между оценками операторов можно считать незначительными. Некоторые особенности их работы могут быть компенсированы, с помощью корректирующих мероприятий, например, путем проведения периодического обучения, чтобы предотвратить выход тестовых статистик за установленные пределы в будущем.

Полученные в ходе исследований данные свидетельствуют о том, что указанные выше характеристики объектов на мозаиках района исследований позволяют дешифровать на них деревья лиственницы сибирской. Выбранная методика, при обучении операторов, позволяет эффективно распознавать деревья *Larix sibirica* Ledeb. произрастающих в ЭВГДР на Полярном Урале.

С использованием карты Госгисцентра масштаба 1:25 000, полученной из открытого источника, цифрованием были созданы следующие геоинформационные слои: изолинии высот местности, отметки высот, гидрологическая сеть, озера. В географической информационной системе ARC/INFO с использованием алгоритма TOPOGRID была создана гидрологически корректная цифровая модель рельефа (ЦМР) с пространственным разрешением 5 м. На ее основе были рассчитаны следующие производные растры: поступление прямой солнечной (Guisan, Zimmermann, 2000) и рассеянной солнечной радиации с использованием геоинформационной системы QGIS ([www.qgis.org](http://www.qgis.org)), топографический индекс влажности СТИ ([www.biology.ualberta.ca](http://www.biology.ualberta.ca)), теневая отмывка рельефа (теневая модель), уклон

склона. Для получения трех последних из перечисленных выше растров были использованы функции ГИС теневая модель и крутизна склона.

Климатические условия на Полярном Урале способствовали сохранению фрагментов стволов и корней деревьев, произраставших на исследуемой территории и погибших в ходе средневекового похолодания с конца XIII до конца XIX века, получившего название малый ледниковый период (Мазепа, Шиятов, 2015; Hagedorn et al., 2014; Matthews, Briffa, 2005).

Методика картирования древесных остатков состояла в определении их местоположения на местности и записи координат с использованием следующих специализированных устройств или устройств общего назначения, обладающих GPS-приемниками: Garmin Etrex 10 (Garmin Inc., ), iPhone 5, iPhone 4S (Apple Inc., США). Точность определения местоположения древесных остатков составляла 3 м. При определении местоположения с помощью iPhone 4S и iPhone 5 применено программное обеспечение maps.me (maps.me, Россия).

В 2016 и 2017 гг. были проведены работы по определению местоположения 7860 древесных остатков в верхней части экотона. Использование наземного метода картирования древесных остатков вместо дистанционных методов их поиска, например при помощи малоразмерного беспилотного летательного аппарата, обусловлен трудностью обнаружения с воздуха на участках с густыми зарослями карликовой березы (*Betula nana* L.).

В 2016 г. в районе исследований были проведены следующие работы: повторное фотографирование элементов ландшафта с 68 точек, на которых в 1960 – 2005 гг. фотографии были получены профессором С. Г. Шиятовым, и фотографирование ландшафтов с 121 новой точки; определение местоположения древесных остатков – корней и стволов деревьев, которые произрастали ранее в данном районе и погибли в результате похолодания в период с XIII по XIX век включительно; определение направления флагообразности крон деревьев в разных частях района исследований; закладка пробных площадей в разных частях района исследований для определения густоты деревьев.

Разработка методики обработки и анализа повторных ландшафтных фотографий и методики определения границ между группами точечных объектов являлась задачей диссертационной работы. Их описанию и применению посвящены отдельные главы диссертации.

В результате снеговой корразии ветви деревьев, находящиеся выше уровня снега и обращенные в сторону, с которой дуют преобладающие ветры, отмирают. Живыми остаются ветви, обращенные в сторону направления преобладающих ветров. Кроны деревьев приобретают характерную флагообразную форму. Эта особенность формы кроны позволила определить с помощью геодезического компаса направление преобладающих ветров в зимний период. Дополнительно определяли направление упавших деревьев в результате ветровала.

Для оценки распределения снега в начале теплого периода года использовали космический снимок интернет-ресурса [maps.bing.com](http://maps.bing.com) (Microsoft Inc., США). В результате применения функции пороговой сегментации были выделены области района исследований, покрытые снегом.

Уровень ветрового воздействия оценивали с помощью теневой модели в геоинформационной системе. Цифровая модель рельефа «освещалась» искусственным источником света. В качестве значения горизонтального угла направления освещения выбрано среднее значение, рассчитанное по величинам углов направления преобладающих ветров в местах нахождения деревьев с флагообразной кроной или деревьев, поваленных ветром. Значение вертикального угла составляло  $30^\circ$ . Такая модель позволяет в первом приближении качественно оценить уровень ветрового воздействия на различные участки поверхности исследуемой территории. Затененным областям соответствуют участки района, находящиеся в ветровой тени, а хорошо освещенным – ветроударные части склонов. При обработке пространственных данных использовался специально разработанный программный комплекс (Свидетельство №2016662558).

### **3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ВЕРХНЕМ ПРЕДЕЛЕ ЕЕ ПРОИЗРАСТАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАНДШАФТНЫХ ФОТОГРАФИЙ**

#### **3.1 Особенности наземных ландшафтных фотографий для анализа древесной растительности**

Трудности в применении автоматизированного анализа ландшафтных фотографий для получения количественных параметров изучаемых объектов и феноменов связаны с неоднородностью масштаба в пределах изображения, разными условиями освещения, сезонными изменениями растительности, а также погодными условиями и большим разнообразием сочетаний объектов, отображаемых на снимке. Конкретизируя перечисленные выше проблемы, возникающие при обработке, анализе и представлении ландшафтных фотографий, можно представить их в виде следующего списка:

- 1) необходимость формирования исследователем целостного представления изучаемого пространства в виде взаимосвязанного набора наземных ландшафтных изображений;
- 2) определение или получение характеристик местности, объектов и феноменов, отображенных на фотоснимке;
- 3) создание новых или пополнение существующих текстовых описаний и аннотаций к наземным ландшафтным изображениям;
- 4) использование однократных и многократных ландшафтных фотоснимков для создания тематических геоинформационных слоев, картосхем или тематических карт;

5) определение количественных данных, характеризующих как снимки в целом, так и объекты и феномены, отображенные на них, с использованием алгоритмов автоматизированного анализа изображений.

### **3.2 Методика работы с ландшафтными фотографиями для формирования целостного представления об изучаемом пространстве**

При создании методики был использован архив фотографий природных ландшафтов района исследований, созданный С.Г. Шиятовым и дополненный автором данной диссертации, а также другими исследователями (Фомин, Михайлович, Шиятов, 2015; Михайлович, Шиятов, Фомин, 2016; Михайлович, Фомин, 2016а, 2017б; Михайлович, Фомин, 2018).

Решение проблемы формирования целостного представления об изучаемом пространстве у наблюдателя иллюстрируют фотографии и картосхемы, приведенные на Рисунках 9 и 10. На трех парах повторных фотографий, которые были сделаны С.Г. Шиятовым в 1962, 1977 и 2004 гг. на юго-восточном макросклоне горного массива Рай-Из на точках фотосъемки с номерами 54, 247 и 248 соответственно, можно видеть один и тот же небольшой участок исследуемой территории. Используя только фотографии, представленные на Рисунке 9, невозможно определить, где находится данный участок. Картосхемы, изображенные на Рисунке 10, позволяют установить, на каких частях снимков он отображен.

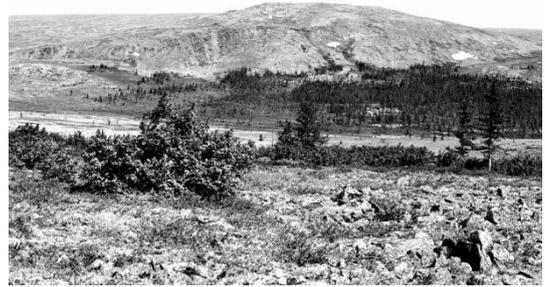
Участок исследуемого района, представленный на каждом снимке из пары повторных фотографий, показан на Рисунке 10 в виде полигонального слоя, представляющего собой сектор, состоящей из областей, соответствующих участкам местности, видимым на этих снимках. Сектор ограничивают два луча, исходящие из точки фотосъемки, соответствующие правой и левой сторонам ландшафтной фотографии. Угол между лучами зависит от оптических характеристик фотоаппарата. Протяженность сектора, как правило, определяется границами района исследований и зависит от направления оптической оси

фотоаппарата в вертикальной плоскости, рельефа местности и наличия крупных объектов вблизи наблюдателя (на ближнем и среднем планах изображения).

а)



б)



в)



г)



д)



е)



Рисунок 9 – Повторные ландшафтные фотографии юго-восточного склона горного массива Рай-Из и прилегающей к нему территории, сделанные С.Г. Шиятовым: а, б – вид на юго-восточный склон горного массива с точки фотосъемки № 54 в 1962 и 2004 гг. соответственно; вид на нижнюю, пологую часть склона данного массива в 1960 (в) и 2004 гг. (г) из точки № 247 при направлении фотосъемки на юго-восток; вид на среднюю и нижнюю части склона массива в юго-западном направлении из точки фотосъемки № 248 в 1977 (д) и (е) 2004 гг. соответственно

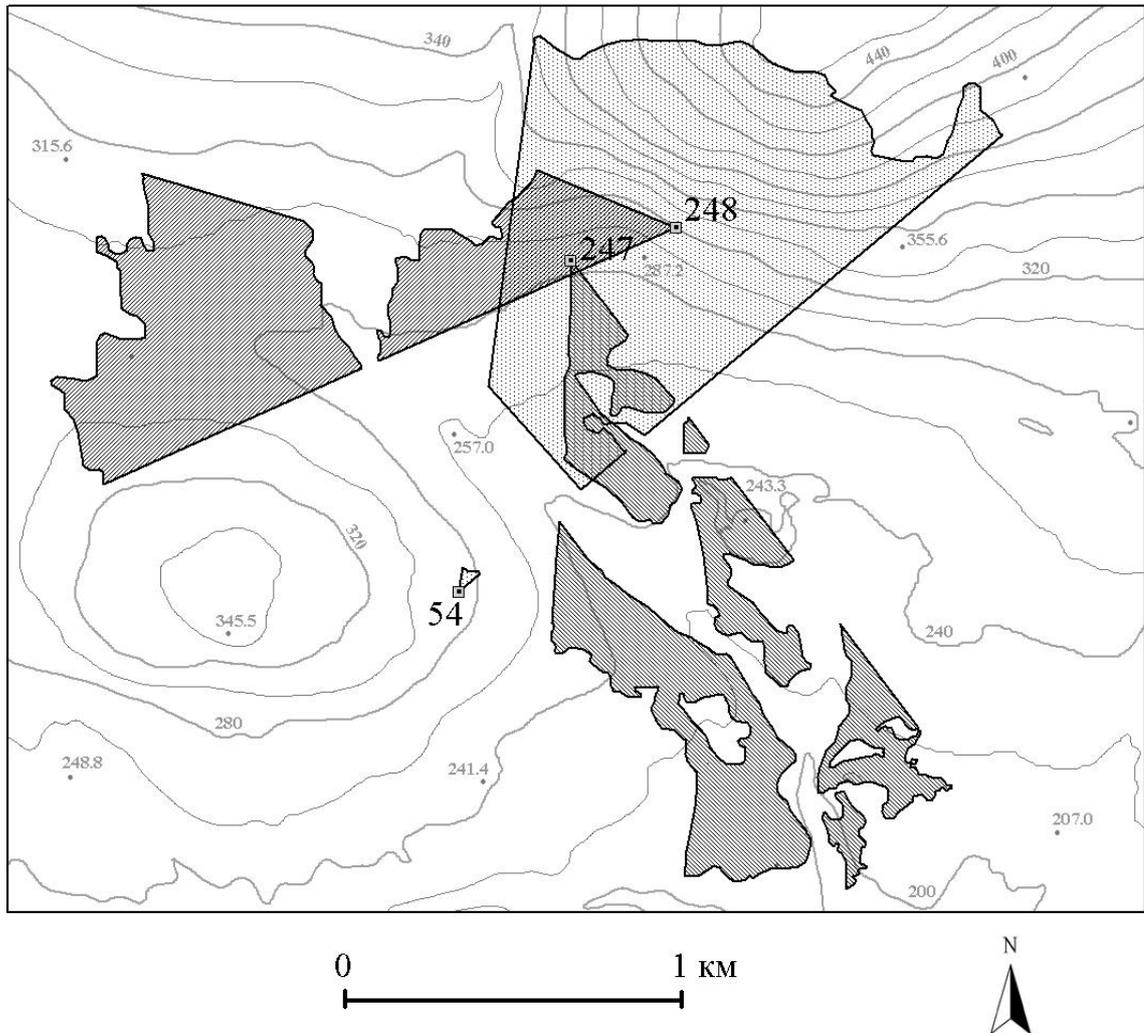


Рисунок 10 – Точки фотосъемки № 54, 247 и 248 и соответствующие им секторы с областями видимости

По мере удаления от наблюдателя масштаб на изображении изменяется от крупному к мелкому. Это выражается в том, что одинаковым по площади участкам на фотографии вблизи наблюдателя и на удалении от него будут соответствовать разные по площади участки местности – меньшие вблизи него и большие по площади на удалении.

Расчет областей видимости производится в ГИС в пределах сектора с использованием цифровой модели рельефа района исследований и функций анализа видимости. В данной работе была использована ГИС ARC/INFO и ArcView GIS (ESRI Inc., США).

На Рисунке 11 приведена картосхема, иллюстрирующая область видимости из точек фотосъемки, которая велась с начала 1960-х годов, когда С.Г. Шиятовым выполнялось первичное фотографирование ландшафтов, по 2016 год. Повторные фотографии с данных точек в разные годы были получены В.С. Мазепой, В.В. Фоминым и А.П. Михайлович.

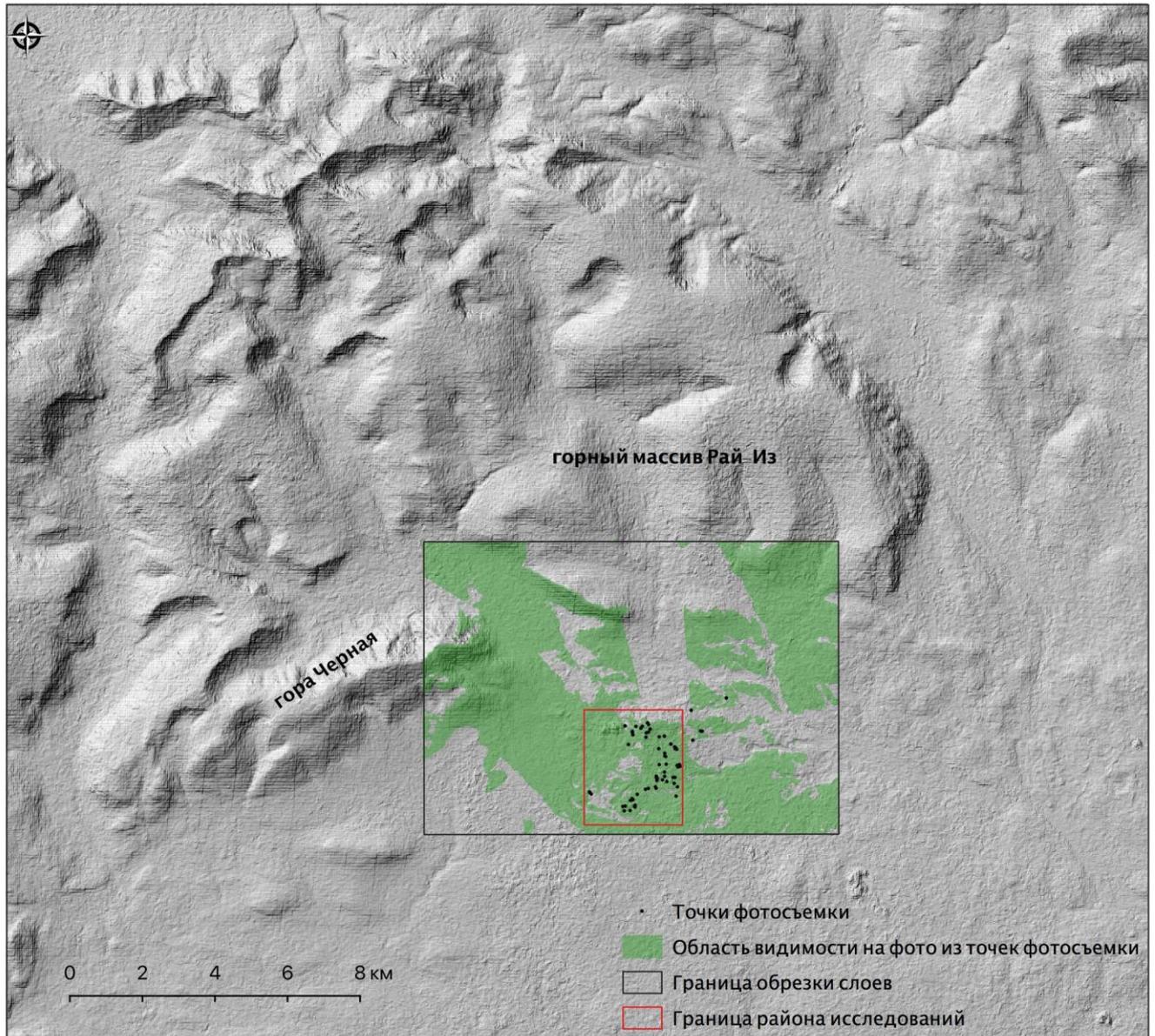


Рисунок 11 – Область видимости на фотографиях, на которых проводилось первичное и повторное фотографирование С.Г. Шиятовым, В.С. Мазепой, В.В. Фоминым и А.П. Михайлович в период с начала 1960-х до 2016 года

Функция векторного оверлея “Объединение” (Union) в ГИС позволяет производить топологическое наложение слоев, результатом которого является слой с сеткой границ, полученных из всех исходных слоев. В качестве иллюстрации на Рисунке 12 приведена картосхема с областями видимости и сеткой границ, полученные с использованием функции для секторов видимости 12 ландшафтных фотографий. Они представлены на Рисунке 13 (сделаны С.Г. Шиятовым в начале 1960-х годов и на Рисунке 14 (повторная фотосъемка выполнена Михайлович А.П.)

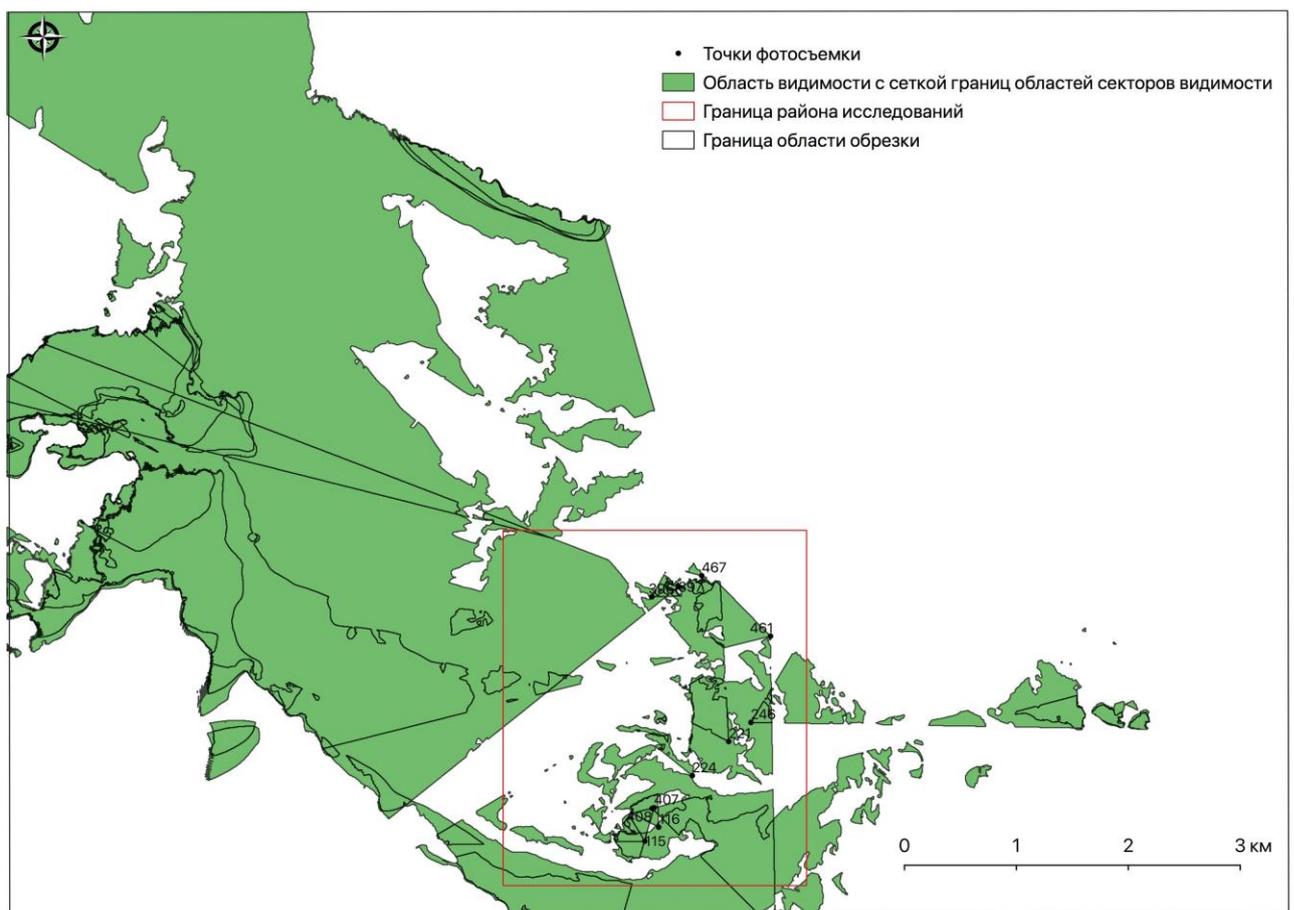


Рисунок 12 – Картосхема с областями видимости и сеткой границ, полученных в результате топологического наложения слоев секторов видимости для 12 ландшафтных фотографий (см. Рисунок 13 и Рисунок 14)



115



116



221



224



246



396



397



407



408



460



461



467

Рисунок 13 – Ландшафтные фотографии, сделанные С.Г. Шиятовым в районе исследований в начале 1960-х годов. Номерами обозначены точки фотосъемки, приведенные на Рисунке 12

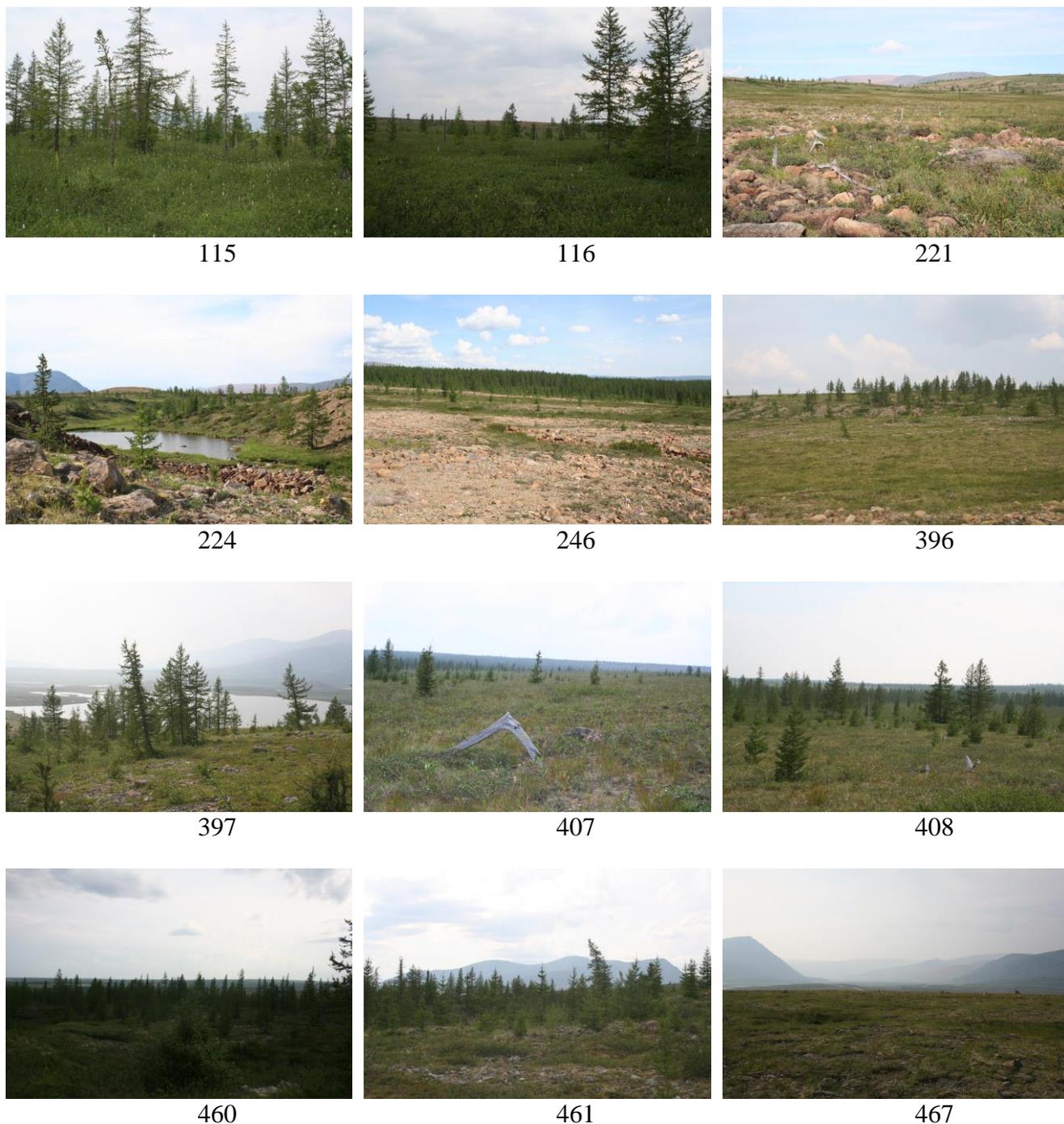


Рисунок 14 – ландшафтные фотографии, сделанные А.П. Михайлович в районе исследований в 2016 году. Номерами обозначены точки фотосъемки, приведенные на Рисунке 12 и Рисунке 13

Результирующий слой, полученный с использованием векторного оверлея слоев секторов видимости, открывает дополнительные возможности работы с ландшафтными фотографиями. Например, можно осуществлять их поиск по

запросу для интересующей области района исследований на карте путем наведения курсора и нажатия на левую кнопку мыши (или нажатием пальца в случае использования сенсорного экрана). По результату такого запроса производится выделение полигона и выведение информации о номерах точек фотосъемки и фотографиях, которые были с них сделаны. На Рисунке 15 приведена картосхема, иллюстрирующая один из возможных вариантов данного запроса. Можно видеть, что выделенный желтым цветом участок района исследований был отображен на 3 фотографиях, полученные с точек фотосъемки с номерами 115, 407 и 460. Данный участок наиболее полно представлен на фотоснимке, сделанном с точки номер 115.

Необходимо отметить, что выделение области на фотографии, которая соответствует фрагменту местности (участка в пределах сектора с областью видимости) на исторических ландшафтных фотографиях, является достаточно трудоемким занятием. Как правило, возможно примерное определение местоположение участка местности на фотоснимке. Чем более выраженным являются особенности рельефа (перепады высот, складки местности, наличие водных объектов), тем более точно можно соотнести участок местности с фрагментом изображения.

Интенсивное развитие технологий получения изображений с использованием портативных устройств (фотокамер, смартфонов и малоразмерных беспилотных летательных аппаратов – БПЛА) открывают новые возможности для аннотирования фотографий, в том числе с попиксельной координатной привязкой цифровой модели рельефа и цифрового изображения – ландшафтной фотографии. Необходимые условия для этого в виде готовых технологий уже существуют: сенсоры, позволяющие получать данные о пространственной ориентации фотоаппарата (в том числе направления оптической оси фотокамеры в пространстве); портативные лидары; приборы высокоточного позиционирования устройств (10 см); программное обеспечение для обработки и анализа данных дистанционного зондирования.

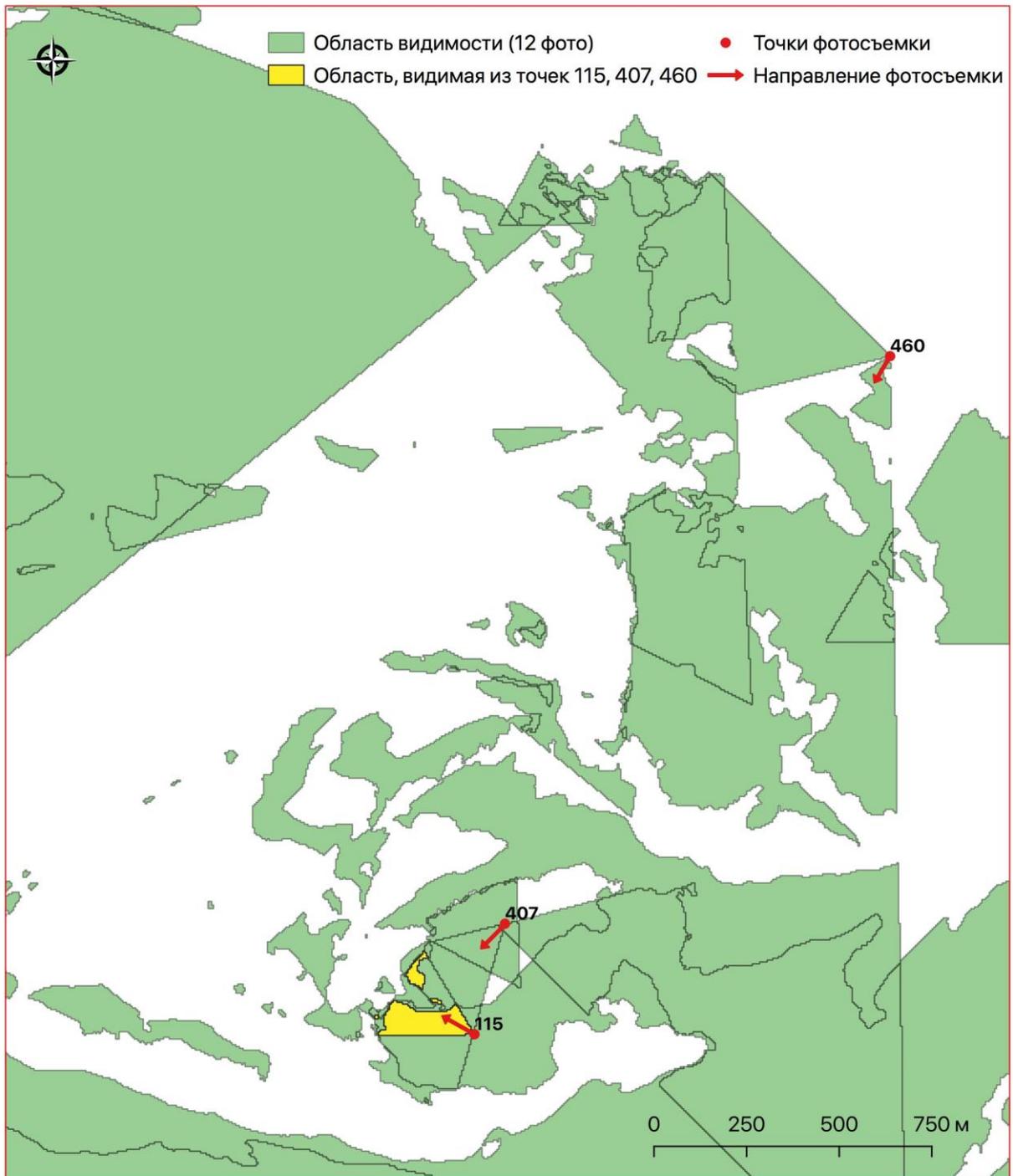


Рисунок 15 – Картограмма, иллюстрирующая поисковый запрос фотографий, на которых можно видеть участок района исследований, выделенный желтым цветом. Данный участок отображен на фотоснимках, сделанных С.Г. Шиятовым в начале 1960-х годов с точек фотосъемки с номерами 115, 407 и 467. Красные стрелки показывают направление фотографирования

Первым условием является наличие высоко детализированной цифровой модели местности. Создание таких моделей местности для районов, аналогичных рассматриваемому в данной работе, возможно с использованием БПЛА, оснащенного фотокамерой, позволяющей получать изображения сверхвысокого пространственного разрешения, лидаром, а также прибором высокоточного позиционирования. Вторым условием является высокоточное позиционирование наблюдателя в точке фотосъемки и высокоточное позиционирование оптической оси фотокамеры. При соблюдении данных условий метод представления ландшафтных фотографий, представленный в данной главе, может быть доработан в части автоматизированного попиксельного аннотирования фотографий данными об объектах местности.

Секторы с областями видимости, представленные на Рисунке 11, Рисунке 12 и Рисунке 15, рассчитаны с использованием цифровой модели рельефа. Они очень хорошо подходят для представления фотографий, сделанных в начале 1960-х и в 1970-х годах, так как точки фотографирования выбирались С.Г. Шиятовым таким образом, чтобы деревья, которые находятся вблизи точки фотографирования не перекрывали область фотосъемки. В результате климатогенно обусловленной экспансии древесной растительности на слабо облесенные и необлесенные участки района исследований, а также увеличения размеров деревьев, которые в начале 1960-х годов присутствовали в виде подроста, область видимости территории на некоторых современных фотографиях сократилась. Например, на точках 115, 116, 460 и 461 (Рисунок 13 и Рисунок 14). Для того чтобы учесть данную особенность представления ландшафтных фотографий, необходимо производить расчет областей видимости с использованием цифровой модели местности, в которой принимается во внимание древесная растительность (Михайлович, Фомин, Шиятов, 2016).

Визуальное наложение друг на друга секторов видимости, которые соответствуют разным точкам фотосъемки, позволяет соотнести ландшафтные фотографии друг с другом и составить более полное представление об

исследуемом пространстве, т. е. данный способ представления фотографий и секторов видимости позволяет решить первую из описанных в разделе 3.1 проблем.

### **3.3 Определение характеристик местности, объектов и феноменов, отображенных на фотоснимке, с помощью геоинформационных слоев**

Предложенная методика представления и анализа ландшафтных фотографий позволяет каждому набору повторных снимков, сделанных с одной и той же точки фотосъемки в одном и том же направлении, поставить в соответствие полигональный слой – сектор с областями видимости (сектор видимости).

Для облегчения процедуры соотнесения участка местности с объектами на ландшафтном снимке и картосхеме на фотоснимок с заданным шагом накладываются вертикальные линии. Например, на Рисунке 16 расстояние между линиями составляет 10% от ширины фотографии. На сектор видимости также наносятся лучи, исходящие из точки фотосъемки (вершины сектора). Угол между соседними лучами в этом случае будет составлять 10% от величины угла сектора (Рисунок 17).

Картосхемы в пределах сектора видимости могут быть составлены из разных геоинформационных слоев, в том числе тематических. Например, это могут быть производные от ЦМР слои, полученные в результате использования функций морфометрического анализа поверхности (крутизна и экспозиция склона), функции векторного оверлея (расчет концентрических буферных областей от заданной точки) или модели, позволяющие количественно оценить влияние некоторых ведущих экологических факторов, например модель расчета топографического индекса влажности TCI (Evans, 2003).

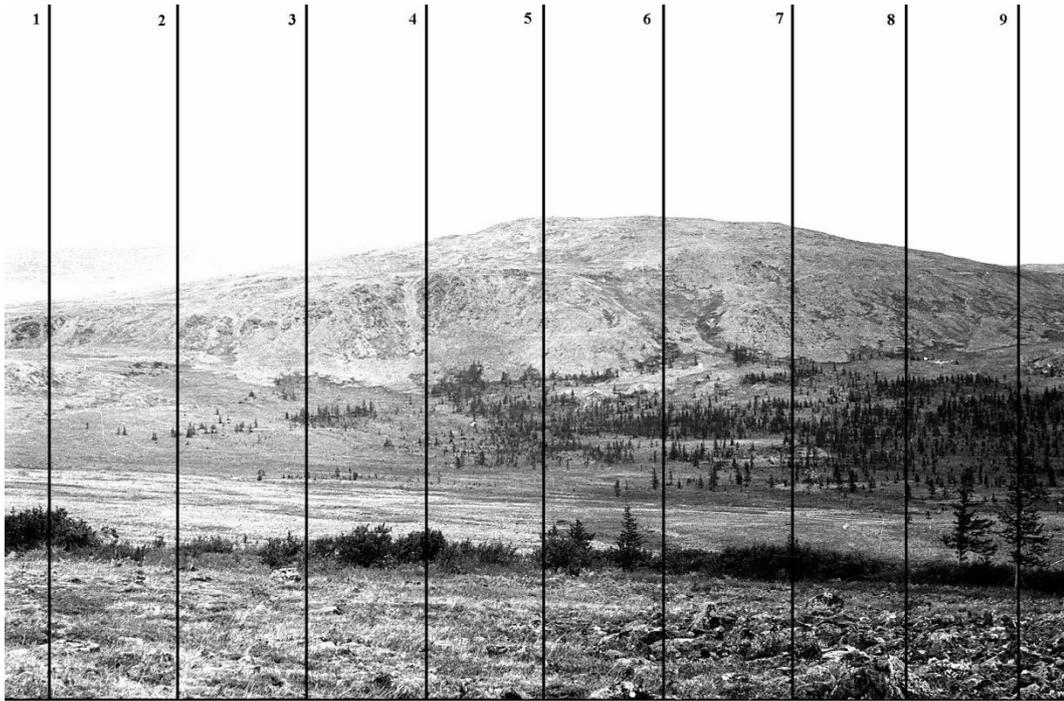
В данной работе были использованы следующие векторные и растровые геоинформационные слои: цифровая модель рельефа; спектрональный аэроснимок 2003 г. с высоким пространственным разрешением; векторный слой с

точками, соответствующими местоположению деревьев в 2003 г.; векторный слой с точками фотосъемки; векторный линейный слой с изолиниями высот; векторный точечный слой с отметками высот; линейный слой речной сети; набор производных от ЦМР растровых слоев — крутизна и экспозиция склона.

Геоинформационный слой или картосхема, сделанная для сектора видимости, могут быть использованы в качестве интерфейса поиска и представления ландшафтных изображений в информационных системах. Предлагаемый способ позволяет установить взаимосвязь между ландшафтными фотографиями и проводить анализ феноменов по снимкам, полученным с разных точек фотосъемки.

Функция топологического наложения в ГИС позволяет формализовать процедуру сбора информации, относящейся к разным геоинформационным слоям. При использовании данной функции производится пересечение полигонов секторов видимости, относящихся к разным точкам фотосъемки. Атрибутивная таблица результирующего полигонального слоя, полученного в результате топологического наложения исходных слоев, будет содержать набор данных, зависящий от количества таких слоев: это может быть номер точки фотосъемки, название файлов с фотографиями, даты съемки. Например, по запросу к слою, являющемуся результатом пересечения секторов видимости для точек фотосъемки № 54 и 248, из атрибутивной таблицы данного слоя будут получены данные о том, что фрагмент местности, которому соответствует данный полигон, может быть виден на снимках, сделанных с этих точек.

а)



б)

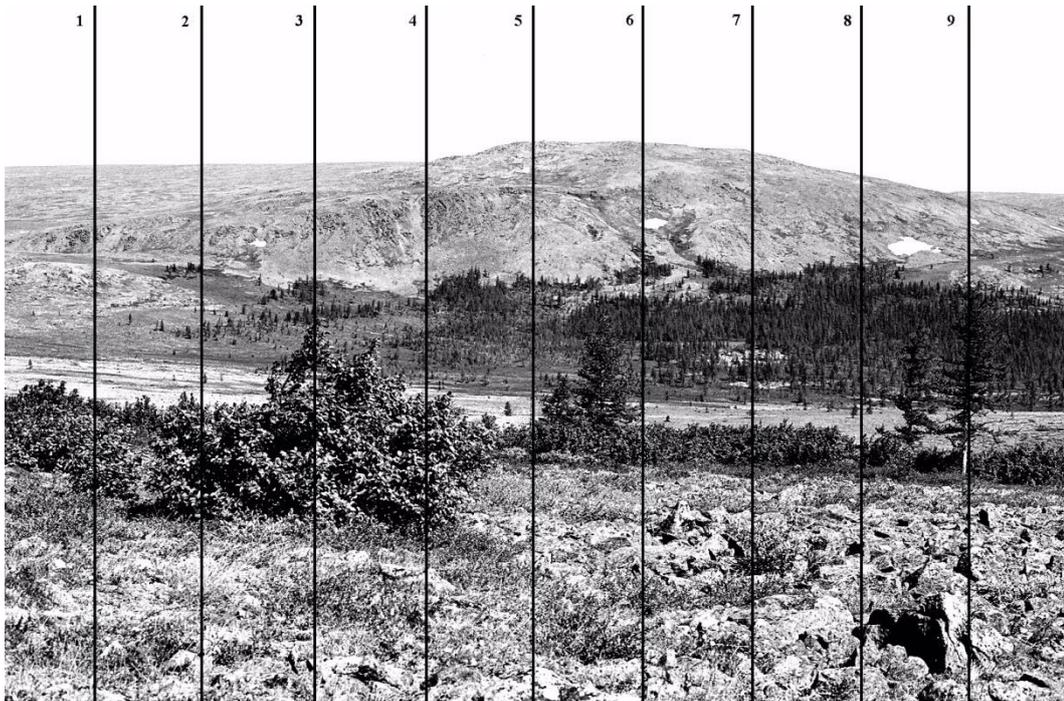


Рисунок 16 – Повторные ландшафтные фотографии с нанесенными на них линиями для облегчения идентификации объектов на местности. Снимки сделаны С.Г. Шиятовым в 1962 (а) и 2004 (б) гг. с точки съемки № 54

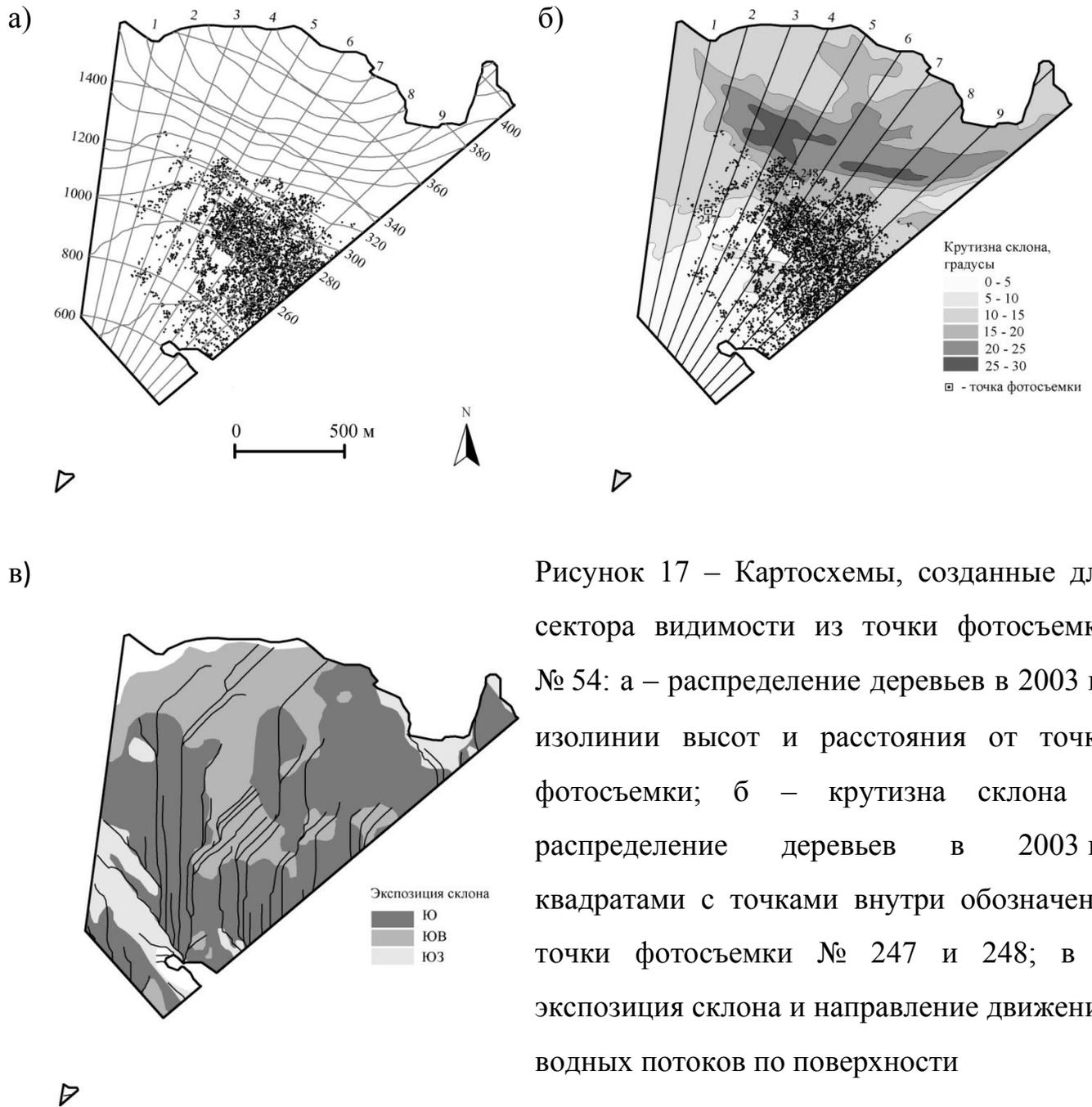


Рисунок 17 – Картограммы, созданные для сектора видимости из точки фотосъемки № 54: а – распределение деревьев в 2003 г., изолинии высот и расстояния от точки фотосъемки; б – крутизна склона и распределение деревьев в 2003 г., квадратами с точками внутри обозначены точки фотосъемки № 247 и 248; в – экспозиция склона и направление движения водных потоков по поверхности

На фотографии могут быть отображены участки исследуемой территории, которые находятся на разном удалении от наблюдателя. Поэтому данные, которые можно получить с использованием ландшафтного фотоснимка, могут относиться к разным пространственным масштабам. Например, общие закономерности в распространении (появлении) деревьев, которые хорошо устанавливаются на дальнем плане на фотографиях, полученных с точки № 54 (см. Рисунок 9, а, б), могут быть дополнены информацией, полученной на ближнем плане по снимкам,

сделанным с точки с № 247 (см. Рисунок 9, в, г). Анализ размещения деревьев на дальнем плане ландшафтных фотоснимков позволяет установить факты их появления на участках склона выше тех мест, которые они занимали в прошлом, и изменения густоты древостоев, а на ближнем плане фотографии, которая получена с другой точки фотосъемки, но на которой виден исследуемый участок местности (на дальнем плане), можно оценить особенности возобновления древесной растительности: ее видовой состав, наличие и жизнеспособность подроста.

В качестве иллюстрации данного подхода приведем следующий пример. В левой части фотографий с точки фотосъемки № 54, представленных на Рисунке 9, а и 9, б, можно видеть полосу деревьев, на Рисунке 9, г видны взрослые деревья и подрост этой полосы. В верхней части некоторых крупных деревьев можно видеть участки стволов, частично или почти полностью лишенные ветвей. Данный эффект обусловлен снеговой корразией, когда кристаллики льда, сдуваемые с поверхности снегового покрова, обдирают кору и ветви деревьев с наветренной стороны. Нижний край лишенной ветвей части ствола соответствует уровню снегового покрова на данной части склона. Накопление снега может приводить к угнетению и гибели подроста из-за сокращения вегетационного периода в результате длительного таяния снега на заснеженных участках по сравнению с таковым на участках с меньшей глубиной снежного покрова. На скорость таяния снега также влияет количество поступившей на фрагмент местности солнечной энергии, которая зависит от экспозиции и крутизны склона.

Предлагаемый подход к представлению ландшафтных фотографий позволяет решить проблему формирования целостного представления об изучаемом пространстве при их использовании исследователем.

Для решения проблемы получения дополнительной информации о местности, отображенной на снимке, а также для создания и пополнения описаний и аннотаций к ландшафтным фотографиям предлагается использовать пространственные данные, в том числе полученные в результате моделирования в

географической информационной системе с последующим их наложением в виде условных знаков на сектор видимости. На Рисунке 16 приведены две повторные ландшафтные фотографии, которые сделаны с точки фотосъемки с № 54. Каждая из них разбита вертикальными линиями на сегменты, как описано выше. На Рисунке 17 изображены картосхемы для сектора видимости, созданные с использованием геоинформационных слоев. Каждая их картосхем соответствует паре повторных фотоснимков, сделанных с данной точки. На Рисунке 17, а отображены слои изолиний высот, изолиний расстояний от точки фотографирования, а также точками обозначено местоположение деревьев в 2003 г. С помощью этих картосхем можно оценить высоту появления деревьев на верхней части склона и удаленность некоторых участков местности от точки наблюдения.

Использование слоев с лучами и значениями крутизны склона позволяет облегчить решение задачи соотнесения фрагментов ландшафтной фотографии с областями на карте. С помощью картосхемы (см. Рисунок 17, б) и фотоснимков с нанесенными на них вертикальными линиями можно оценить местоположения исследуемых объектов на снимке и карте.

Экспозиция склона в сочетании с данными моделирования топографического индекса влажности позволяет исследователю получить данные, косвенно характеризующие поступление прямой солнечной радиации и гидрологический режим соответственно (см. Рисунок 17, в). Наложение пространственных данных на сектор видимости позволяет оценить пространственные закономерности количественных характеристик участков местности, которые отображены на снимке. Такой методический прием расширяет возможности исследователя по созданию и пополнению текстовых описаний ландшафтных фотографий и аннотаций к ним. Приведенные на Рисунке 17 картосхемы иллюстрируют эту возможность.

Технология пространственного наложения геоинформационных слоев на сектор видимости открывает возможности для автоматизированного или

автоматического создания текстовых описаний и аннотаций на естественном языке с использованием заранее подготовленных текстовых шаблонов. В них можно автоматически вставлять фрагменты текста (слова, словосочетания, фразы и предложения), числовые значения или их диапазоны. Такая технология является очень важной, если необходимо описывать большое количество (тысячи или десятки тысяч) ландшафтных фотографий.

На Рисунке 18 приведены две картосхемы, позволяющие оценить основные изменения, которые произошли на участке местности, видимом из точки фотосъемки с № 54 за период с 1962 г. по 2003 г.

Картосхемы были созданы на основе результатов сравнительного анализа ландшафтных фотографий, приведенных на Рисунке 9. При отображении данных на карте были использованы геоинформационные слои, показанные на Рисунке 17, б. На каждую картосхему наносили условные знаки, которые характеризовали исследуемый участок местности и объекты (феномены) на нем: отсутствие или наличие молодого поколения древесной растительности, изменение густоты деревьев, продвижение древесной растительности вверх по склону. Процесс переноса информации в виде условных знаков со снимков в картографическое пространство является первым необходимым этапом для создания тематических карт или картосхем всей исследуемой территории.

Таким образом, набор, состоящий из повторных ландшафтных фотоизображений, геоинформационных слоев и картосхем, приведенных на Рисунках 9 – 18, открывает возможности для расширения представления о паспорте фотографий в системе наземного фотомониторинга (Нестеров, Сарычев, 2006). Данный конкретный набор, а также фрагменты других геоинформационных слоев в пределах сектора видимости для определенной точки фотосъемки могут быть использованы в качестве дополнительных источников данных наряду с координатами точки фотосъемки при составлении паспорта фотографий.

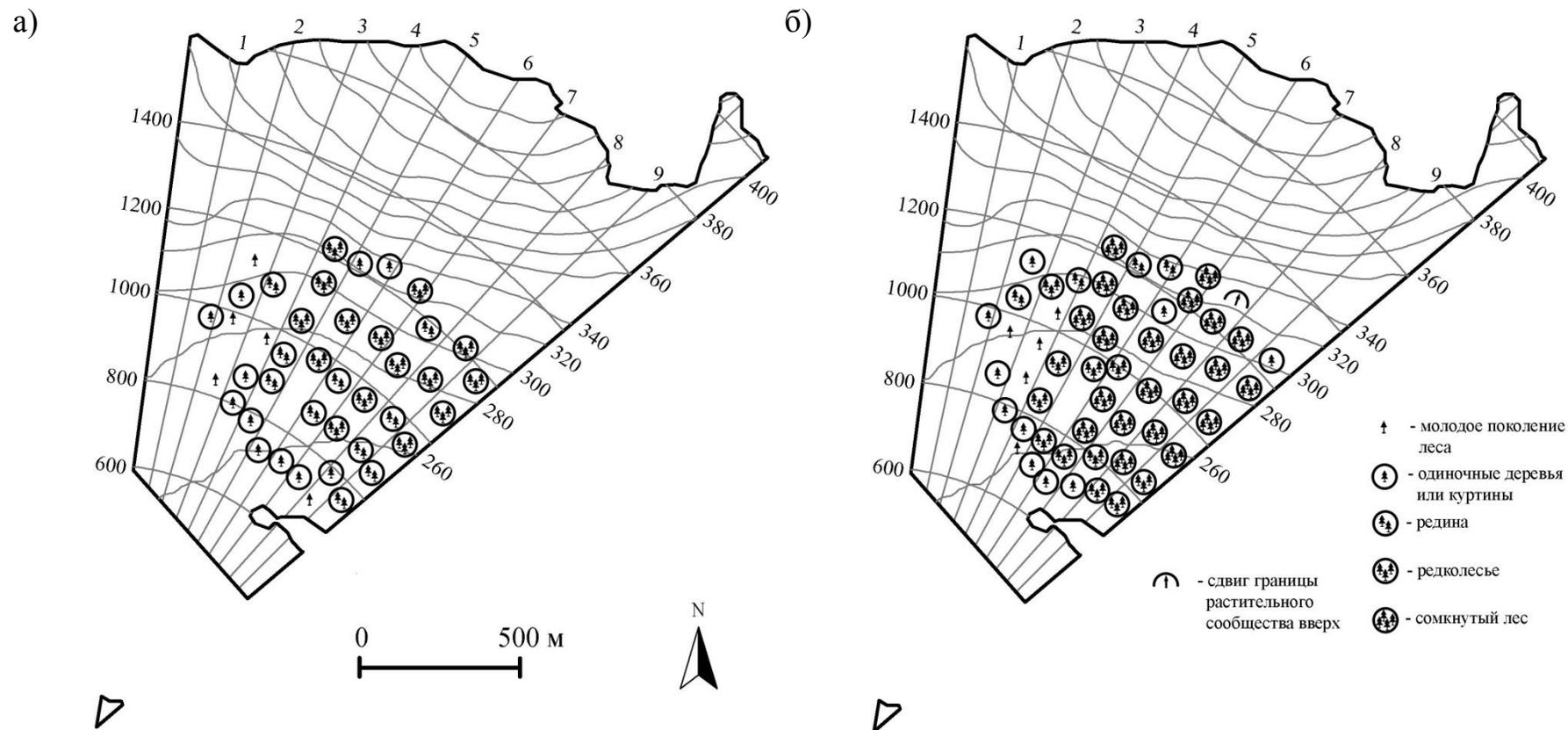


Рисунок 18 – Картограммы сектора видимости точки фотосъемки № 54, характеризующие пространственно-временную динамику древесной растительности в 1962 г. (а) и 2003 г. (б) на юго-восточном участке склона горного массива Рай-Из

Разработанная методика анализа и представления ландшафтных, в том числе повторных, фотографий, позволяет решить следующие проблемы их использования: формирование у человека целостного представления об исследуемом пространстве; получение дополнительных количественных и качественных данных о местности; создание описаний ландшафтных снимков на естественном языке; получение тематических слоев и карт с использованием повторных ландшафтных фотоизображений.

## **4 ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ПАТТЕРНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕРЕВЬЕВ ЛИСТВЕННИЦЫ СИБИРСКОЙ НА ВЕРХНЕМ ПРЕДЕЛЕ ЕЕ ПРОИЗРАСТАНИЯ НА ПОЛЯРНОМ УРАЛЕ**

### **4.1 Пространственные закономерности распределения деревьев и древесных остатков в экотоне верхней границы древесной растительности**

Для количественной оценки и прогнозирования процессов, происходящих в лесотундровых и лесных сообществах на верхнем и северном пределах их существования в условиях изменения климата, необходимо располагать данными о местоположении древесной растительности желательно, на уровне отдельного организма и информацией высокого пространственного разрешения о действии различных экологических факторов на всей территории района исследования.

На Рисунке 19 представлена картосхема района исследований и прилегающих к нему территорий. На ней также отображены точки фотосъемки, с которых производилось фотографирование элементов ландшафта в 1961/1962 и 2016 гг. и соответствующие им секторы видимости. Методика обработки и анализа повторных ландшафтных фотографий описана в главе 3, а также в публикациях, подготовленных мной и моими соавторами (Свидетельство № 2010612715; Фомин, Михайлович, 2013; Фомин, Михайлович, Шиятов, 2015; Михайлович, Фомин, Шиятов, 2016а, 2016б; Михайлович, Шиятов, Фомин, 2016; Михайлович, Фомин, 2017б). Примеры повторных ландшафтных фотографий, сделанных в эти годы, приведены на Рисунке 20.

На Рисунке 21 изображены картосхемы, характеризующие пространственное размещение деревьев в экотоне верхней границы древесной растительности на Полярном Урале в 1962/1964 и 2015 гг. Полученные в ходе исследований данные свидетельствуют о том, что с начала шестидесятых годов XX века до 2015 года произошло почти двукратное увеличение количества

деревьев на исследуемой территории (с 14 377 до 28 344 шт.). На Рисунке 21, б можно видеть местоположение остатков деревьев, которые ранее произрастали в верхней части экотона и погибли в ходе малого ледникового периода. Повторные ландшафтные фотографии (Рисунок 20) позволяют визуально оценить изменения, которые произошли в экотоне за этот период. На Рисунках 20, а и 20, б представлен участок местности, который виден с точки фотосъемки номер 221. На этой территории в прошлом произрастало большое количество деревьев, о чем свидетельствуют хорошо заметные на фотографиях крупные древесные остатки. Снимки и картосхема на Рисунке. 21, б демонстрируют, что к настоящему времени древесная растительность еще не достигла тех участков местности, которые она занимала в прошлом.

На Рисунке 22, а представлена картосхема, характеризующая распределение снега в районе исследований в начале вегетационного сезона. Синими стрелками показано преобладающее направление ветров, а на Рисунке 22, б и 22, в – картосхемы, характеризующие уровни поступления прямой и рассеянной солнечной радиации, а также ветрового воздействия.

Сравнительный анализ картосхем, приведенных на Рисунке 22, б и 22, в, свидетельствует о том, что деревья, как правило, в первую очередь занимают участки с более благоприятными по сочетанию данных факторов условиями, т. е. хорошо прогреваемые и более защищенные от ветра местообитания.

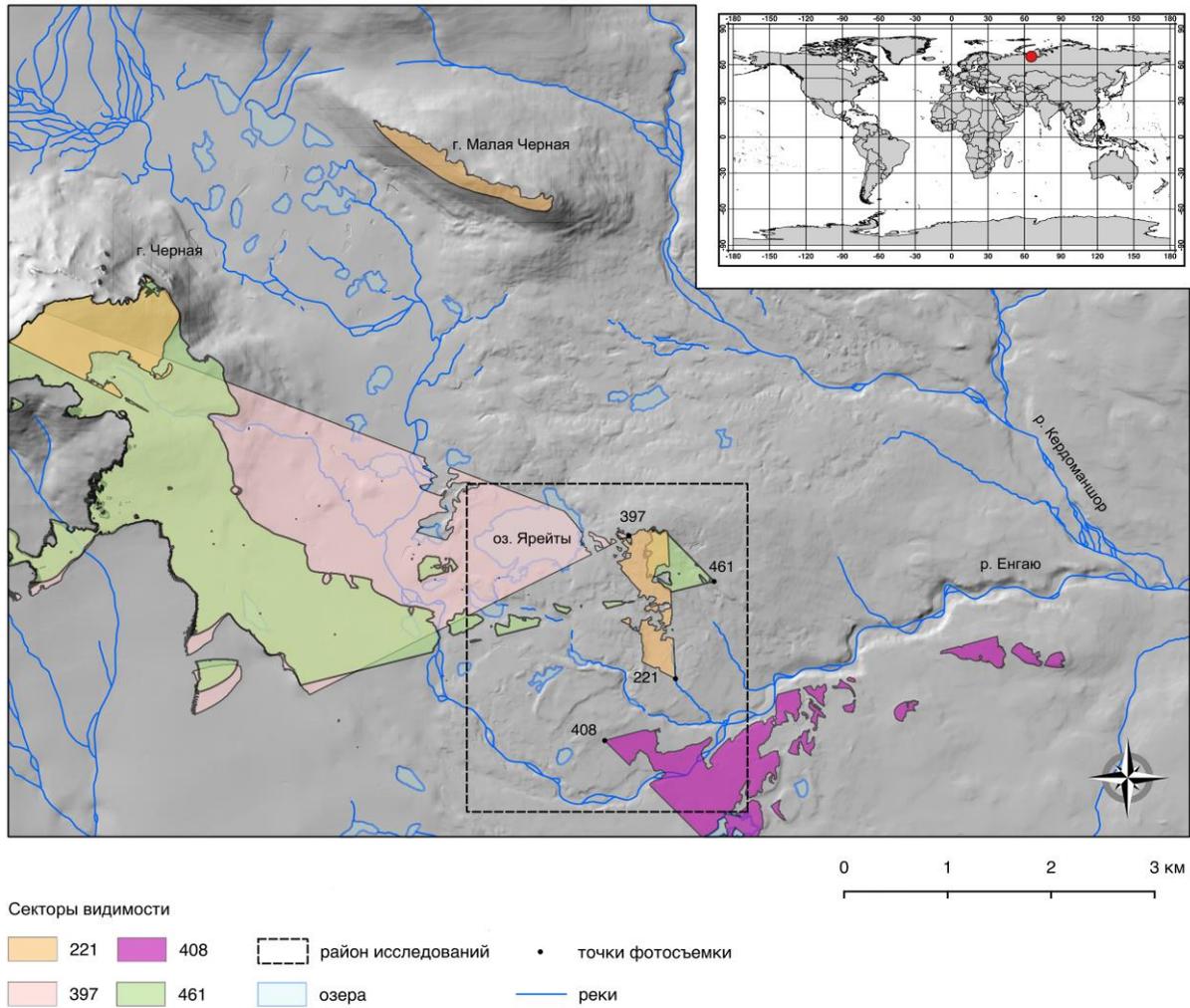


Рисунок 19 – Теневая модель района исследований (выделена прерывистой линией) и прилегающей к нему территории с точками повторной фотосъемки фрагментов ландшафтов и секторами видимости для каждой из них. На врезке местоположение района исследования указано красной точкой

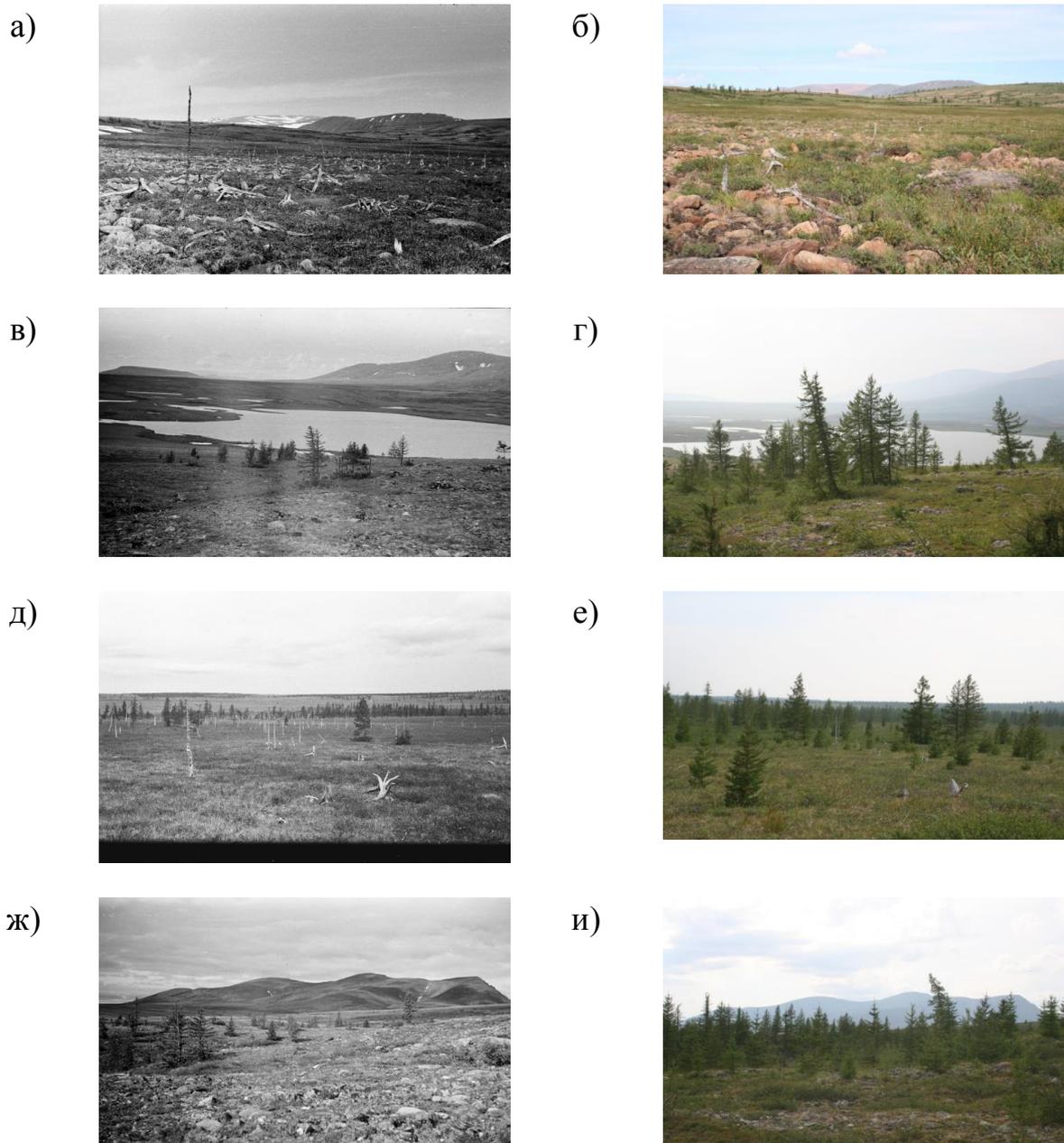
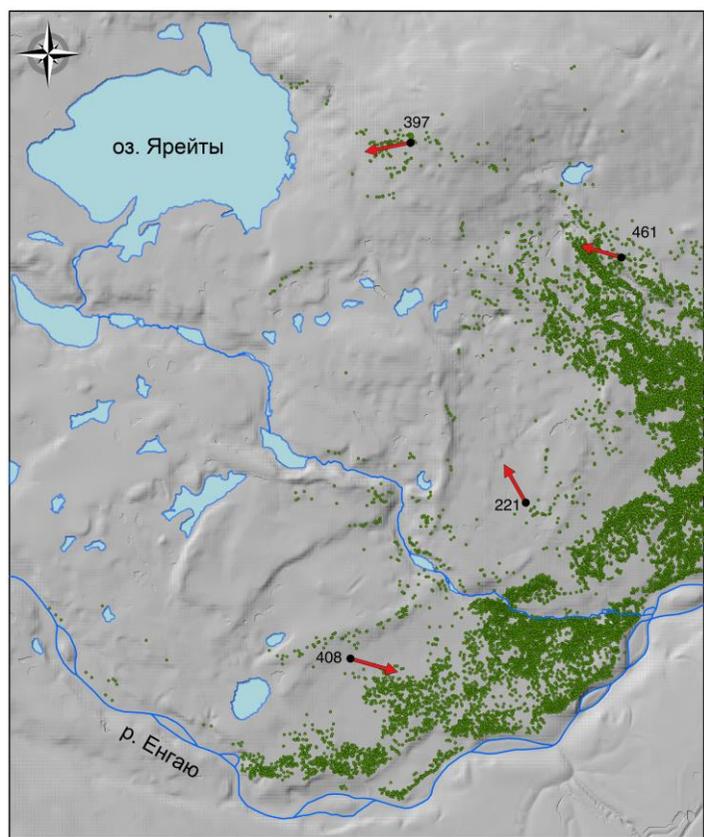


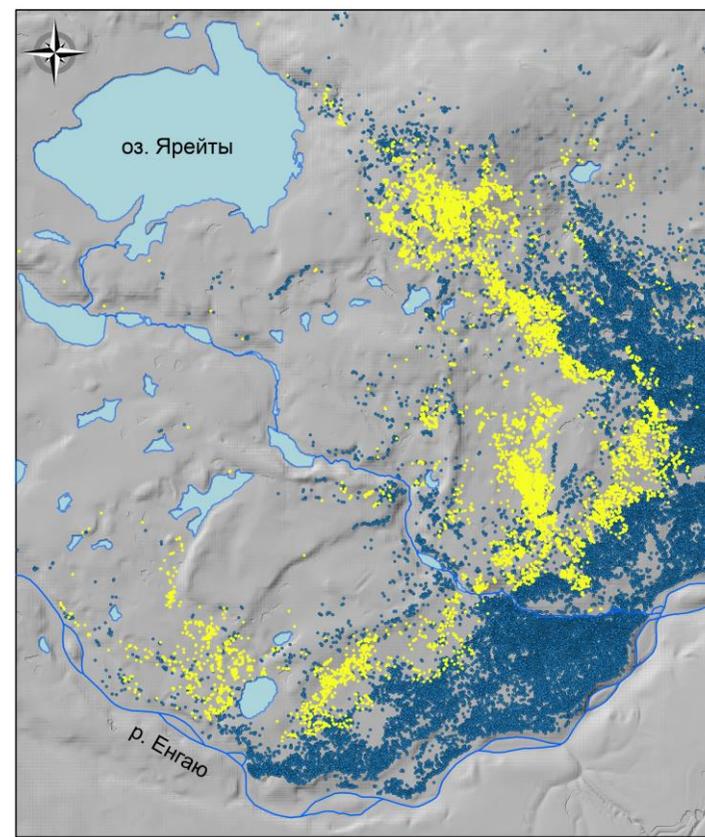
Рисунок 20 – Повторные ландшафтные фотографии с точек фотосъемки № 221 (а, б), 397 (в, г), 408 (д, е) и 461 (ж, и). Снимки слева сделаны С. Г. Шиятовым в 1960-х годах (в, ж – в 1960 г., а – в 1961 г., д – в 1962 г.), справа – А. П. Михайлович в 2016 г. Современная древесная растительность еще не заняла участки, на которых она произрастала в средние века (а и б). Появление молодого поколения леса на необлесенных и слабооблесенных участках района исследований: в верхней (в и г) и нижней (г и д) частях экотона. Формирование редины и редколесья на слабооблесенных участках исследуемой территории

а)



озера озера  
реки реки  
деревья в 1964 году  
точка и направление фотосъемки

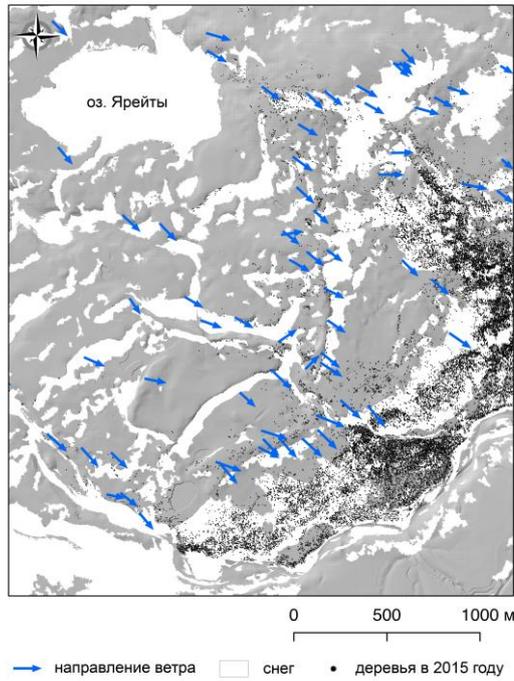
б)



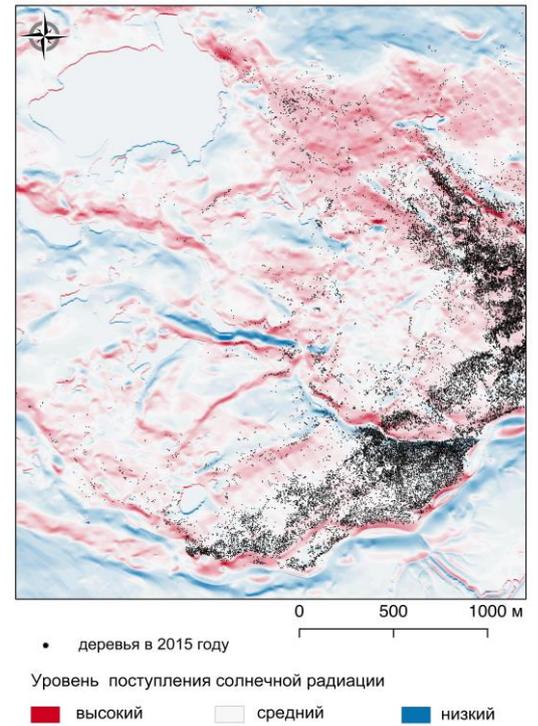
озера озера  
реки реки  
деревья в 2015 году  
древесные остатки

Рисунок 21 – Распределение деревьев в районе исследований в 1962/1964 (а) и 2015 гг., а также древесных остатков в 2016 – 2017 гг. (б)

а)



б)



в)

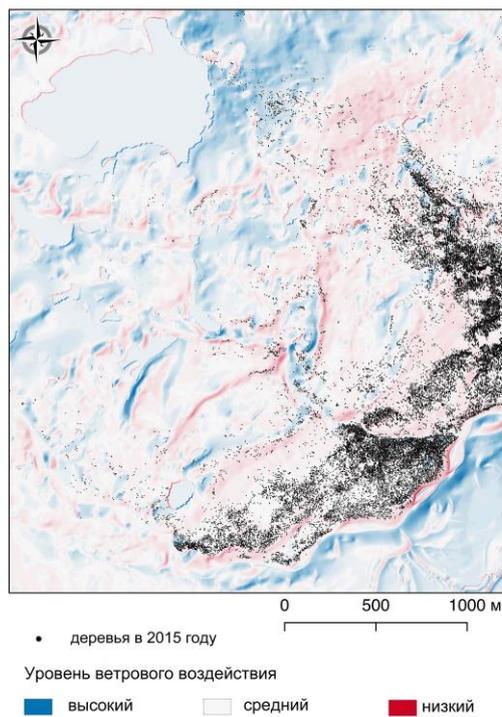


Рисунок 22 – Картограммы, полученные в результате наложения деревьев в районе исследований в 2015 году на следующие слои: распределение снега в начале теплого периода года (а), уровня инсоляции (б) и уровня ветрового воздействия (в). Голубыми стрелками на рисунке 22, а обозначено направление преобладающих ветров

## 4.2 Методика автоматизированного выделения границ фитоценохор

Ранее в районе исследований было проведено крупномасштабное картирование лесотундровых сообществ с использованием глазомерно-измерительного метода (Шиятов, Терентьев, Фомин, 2005; Шиятов и др., 2007). Он основан на выделении однородных участков лесотундровых сообществ по густоте древостоев и особенностям лесорастительных условий. В проведении полевых работ использовали среднее расстояние между деревьями: к сомкнутому лесу относили участки, на которых среднее расстояние между деревьями меньше 7–10 м; для редколесий значения данного параметра лежат в диапазоне от 10 до 30 м включительно; для редины – от 30 до 60 м; для участков тундры с одиночными деревьями – свыше 60 м.

Для выделения типов фитоценохор использовались следующие пороговые значения, соответствующие середине каждого из приведенных выше интервалов: лес (до 8,5 м включительно); редколесье (от 8,5 до 25 м); редина (от 25 до 55 м); тундра с одиночными деревьями (свыше 60 м).

Карты, характеризующие распределение основных типов фитоценохор в начале 1960-х годов и 2015 году, были созданы с использованием упрощенной модификации ранее разработанного нами оригинального метода (Михайлович, Фомин, 2016б, 2017а; Mikhailovich, Fomin, 2016; Фомин, Михайлович, Шиятов, 2019, 2020). На Рисунке 18 представлены картосхемы, иллюстрирующие основные его этапы. На первом из них на основе точечного слоя, характеризующего местоположение деревьев (Фомин, Михайлович, Агапитов и др., 2019), создается слой с полигонами Вороного (Рисунок 23, а), на втором производится выбор ячеек, относящихся к одному из типов фитоценохор по значениям их площадей (Рисунок 23, б). На следующем шаге выполняется объединение ячеек в более крупные полигоны путем удаления внутренних границ

между ними (Рисунок 23, в) с последующей фильтрацией по площади (Рисунок 23, г).

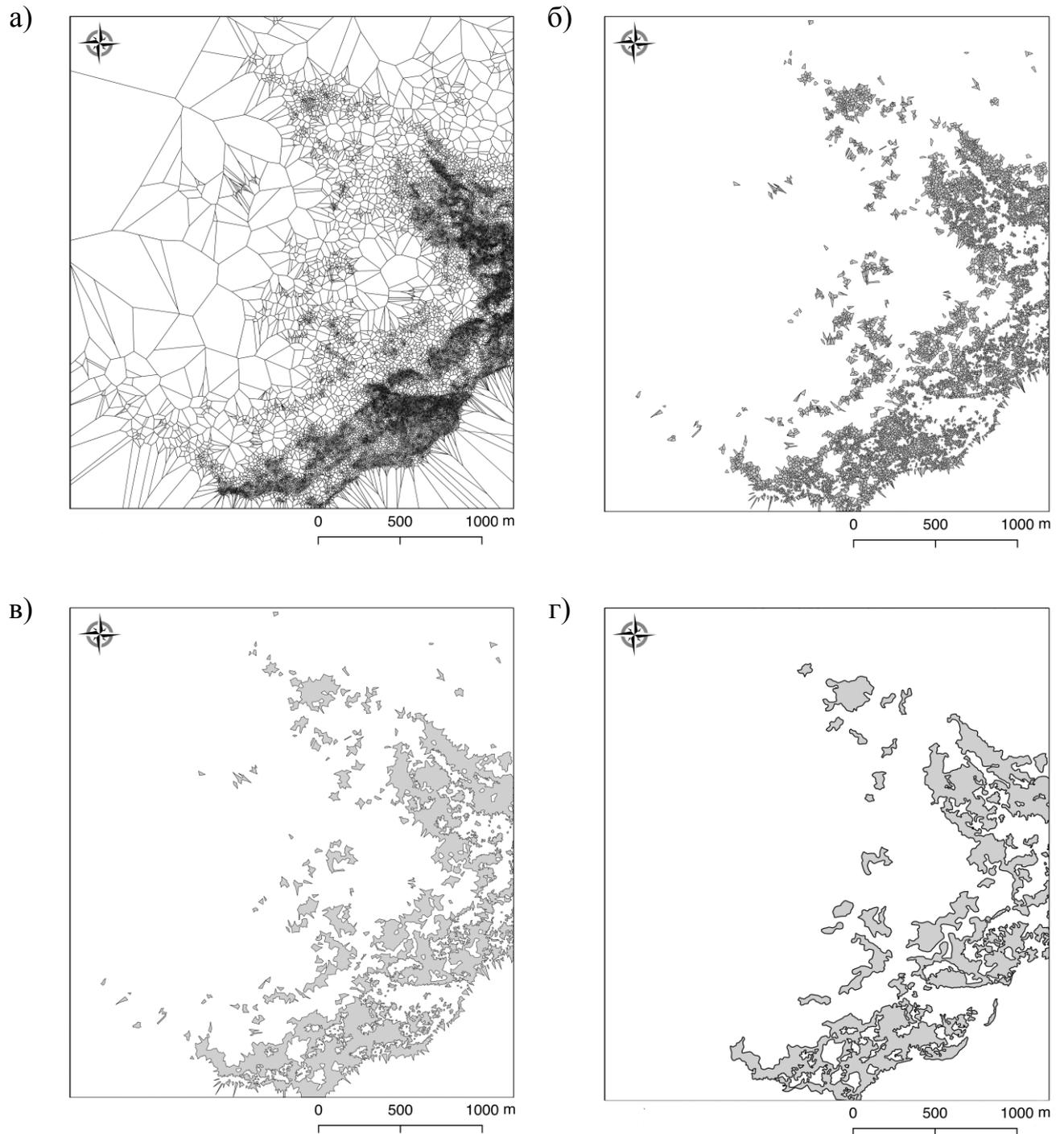


Рисунок 23 – Основные этапы алгоритма определения границ фитоценозов на примере редколесий: а – построение полигонов Вороного; б – выбор ячеек, относящихся к редколесьям; в – удаление внутренних границ с последующей фильтрацией ячеек по их площади; г – генерализация границы редколесий

Фильтрация необходима для исключения небольших по площади полигонов, чтобы избежать вырожденных случаев. Например, если объединенный полигон относится к лесу, но его площадь слишком мала, т. е. он содержит только несколько деревьев, то данный участок не следует считать лесом.

С использованием функций анализа ближайшего расстояния в ГИС составлена матрица расстояний между деревьями в 2015 году и ближайшими к ним деревьями в начале 1960-х годов. На основе этой матрицы создан векторный слой с линиями, соединяющими деревья в начале исследуемого периода с ближайшими к ним новыми деревьями в его конце.

### **4.3 Пространственные закономерности изменения границ фитоценозов на верхнем пределе их распространения во второй половине XX – начале XXI века**

На Рисунках 24, а и 24, б приведены картосхемы распределения основных типов фитоценозов района исследований в начале 60-х годов XX века и в 2015 году, созданные с использованием методики, описанной в разделе 4.2. Площадь участков сомкнутого леса увеличилась с 22 до 50 га, редколесий — с 71 до 96 га, редины — с 55 до 114 га. Площадь участков тундры с одиночными деревьями уменьшилась с 586 до 473 га. В процентном выражении (относительно общей площади района исследований) площадь сомкнутых лесов, редколесий и редины увеличилась с 3 до 7%, с 10 до 13% и с 7 до 15% соответственно, а площадь участков тундры с одиночными деревьями уменьшилась с 80 до 65%. На картосхемах, приведенных на Рисунке 24, кроме изменений конфигурации и площади участков, занимаемых разными типами фитоценозов, можно видеть одну из особенностей продвижения древесной растительности в тундру или слабооблесенные участки. Она состоит в своеобразном окружении безлесных участков деревьями с последующим их постепенным зарастанием деревьями. В

Таблице 2 приведены данные о соотношении суммарной площади участков, занимаемых фитоценозорами в начале и конце исследуемого периода.

Таблица 2 – Площадь, занимаемая фитоценозорами в районе исследований в 1964 и 2015 годах

№	Фитоценозора	Площадь, га / %		
		1964	2015	$\Delta (S_{2015}-S_{1964})$
1	Лес	21,5 / 2,9	49,6 / 6,8	28,1 / 3,8
2	Редколесье	70,5 / 9,6	96,2 / 13,1	25,7 / 3,5
3	Редина	55,3 / 7,5	114,4 / 15,6	59,1 / 8,1
4	Тундра с одинокими деревьями	585,7 / 79,9	472,8 / 64,5	-112,9 / -15,4

Увеличенные фрагменты картосхем, выделенных на Рисунках 24, а и 24, б пунктирной линией, приведены на Рисунках 24, в и 24, г. На первом представлено распределение типов фитоценоз в 1964 году, на втором – картосхема распределения фитоценоз в 2015 году. Сравнительный анализ количества деревьев в начале и конце исследуемого периода свидетельствует о том, что региональное потепление климата, которое наблюдается на Полярном Урале (Shalaumova, Fomin, Kapralov, 2010), сопровождается значительными изменениями в экотоне верхней границы древесной растительности и выражается в появлении молодого поколения деревьев лиственницы сибирской как на ранее необлесенных и слабооблесенных участках тундры, так и на участках, где раньше произрастали деревья. Сравнительный анализ местоположения современных деревьев и древесных остатков свидетельствует о том, что на многих участках древесная растительность еще не достигла мест, которые она занимала в

прошлом, а если и достигла, то количество деревьев на них еще значительно меньше, чем было в прошлом.

На картосхеме, приведенной на Рисунке 21, б, можно видеть участки с группами деревьев в тундре, на которых нет древесных остатков. Данный факт не обязательно свидетельствует о том, что современная древесная растительность появилась на участках, на которых ее не было в прошлом. При определенном сочетании микроклиматических условий лиственница может переживать неблагоприятные условия в стланиковой форме, переходя в стволовую форму при улучшении условий окружающей среды (Devi et al., 2008). Это означает, что эти участки могут быть рефугиумами, в которых лиственница сибирская благополучно пережила неблагоприятный для нее период похолодания.

Из всего многообразия экологических факторов, действующих на древесную растительность в районе исследований, наибольшее влияние на выживание и скорость роста деревьев оказывают солнечная радиация, ветровое воздействие и снег (см. Рисунок 22). При этом если положительное влияние повышения уровня инсоляции и снижения воздействия ветра на древесную растительность можно оценить визуально на Рисунках 22, б и 22, в, то влияние снега на деревья носит более сложный характер.

Неравномерное распределение снега на территории района исследований обусловлено переносом снега ветром и наличием препятствий в виде выпуклых элементов рельефа, а также деревьев (см. Рисунок 22, а). Снег сдувается ветром с верхних частей возвышенностей и накапливается на пониженных, как правило, вогнутых участках. При достижении определенной густоты древостой также способен препятствовать переносу снега ветром. Из-за этого могут формироваться снежные наносы, которые оказывают как положительное, так и отрицательное влияние на древесную растительность.

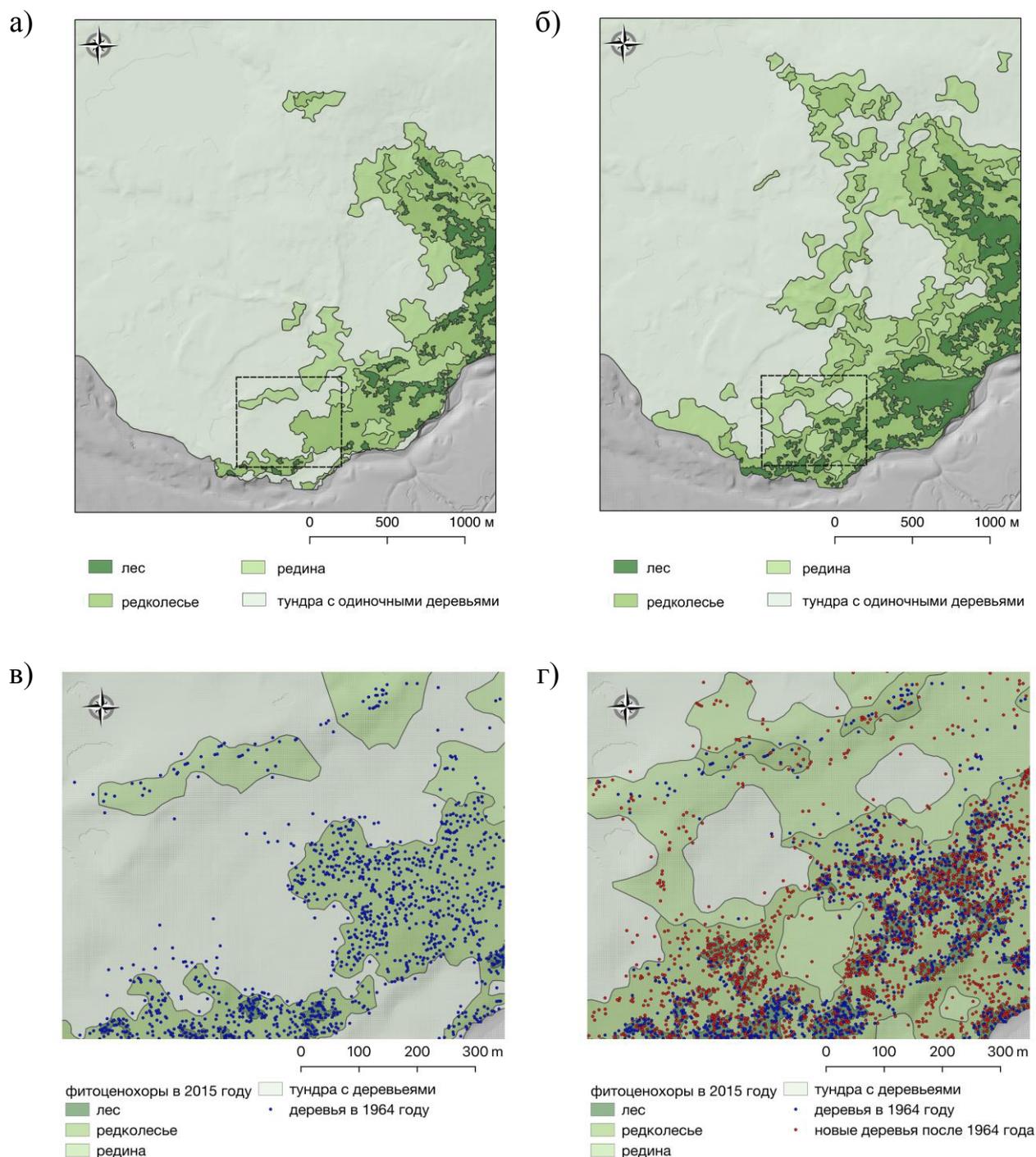


Рисунок 24 – Картограммы распределения основных типов фитоценозов в начале 1960-х (а) и 2015 (б) годах. Штриховой линией обозначен участок, увеличенное изображение которого приведено на рисунках 24, в и 24, г

Многометровые сугробы могут задерживать начало вегетационного сезона, что в условиях короткого вегетационного периода негативно сказывается на выживании и росте древесной растительности. В местах большого накопления

снега на заветренных сторонах вытянутых возвышенностей, образованных ледниковыми отложениями, деревья не встречаются. Это обусловлено тем, что снег на данных участках может находиться в течение июня–июля, т. е. напочвенный покров освобождается от снега во второй половине вегетационного сезона. Оставшегося времени теплого периода недостаточно для нормального роста деревьев лиственницы сибирской. Кроме того, в весенний период уплотнение и оседание снега приводят к обламыванию нижних ветвей крупных деревьев. Положительное влияние накопления снега может сказываться на молодом поколении древесных растений, укрытых снегом от морозов и снеговой корразии.

Обнаруженные ярко выраженные пространственные закономерности распределения деревьев в зависимости от уровня инсоляции и ветрового воздействия, а также закономерности накопления снега и его таяния в начале теплого периода открывают возможности для количественной оценки комплексного действия на деревья абиотических факторов: солнечной радиации, ветра и снега. Однако для проведения такой оценки необходимо на количественном уровне изучить особенности распределения снегового покрова по исследуемой территории.

На Рисунках 25 — 27 приведены картосхемы, характеризующие трансформацию одной фитоценохоры в другую за период с начала 1960-х годов до 2015 года.

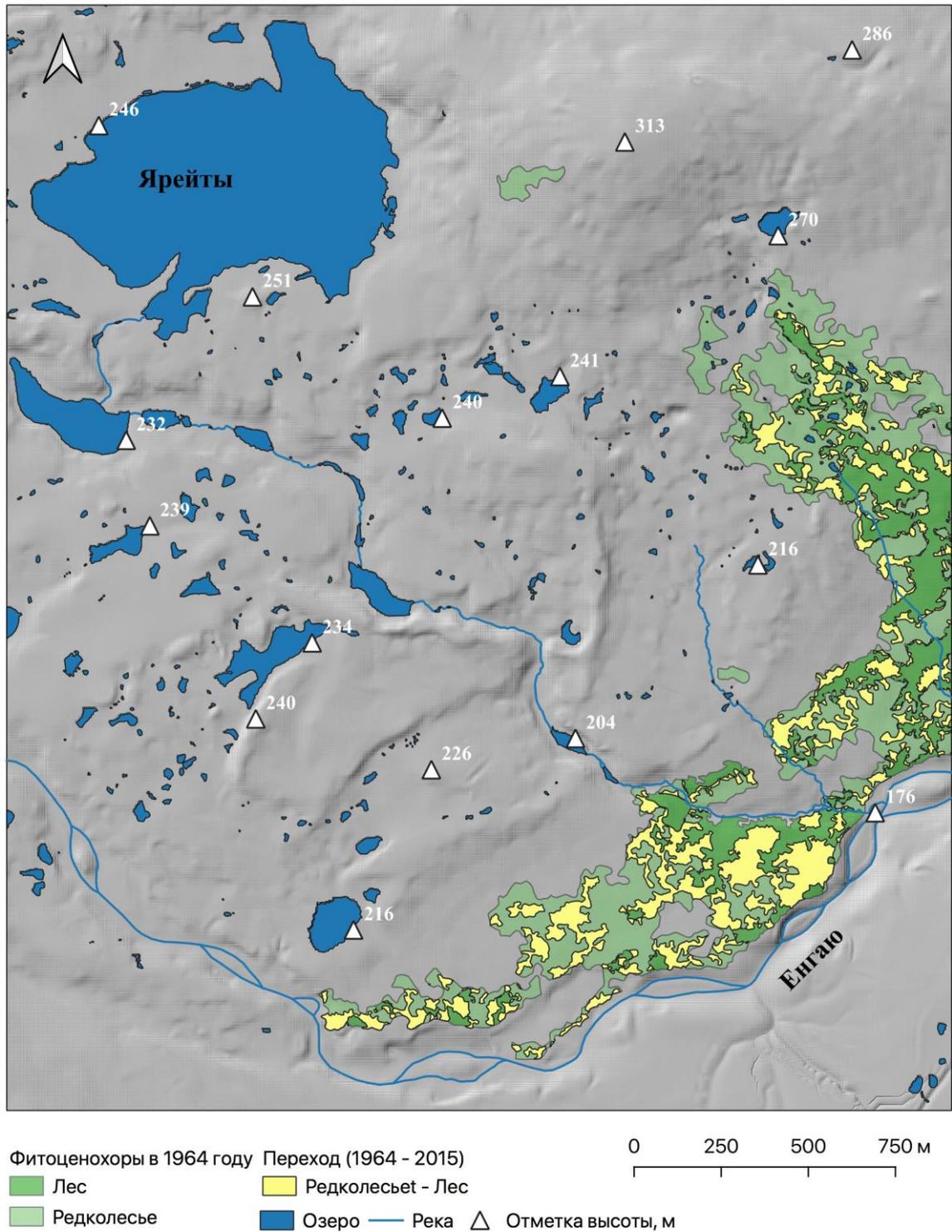


Рисунок 25 – Картосхема, характеризующая пространственное размещение участков, на которых произошла смена типа фитоценохоры с редколесья на лес с начала 1960-х годов до 2015 года

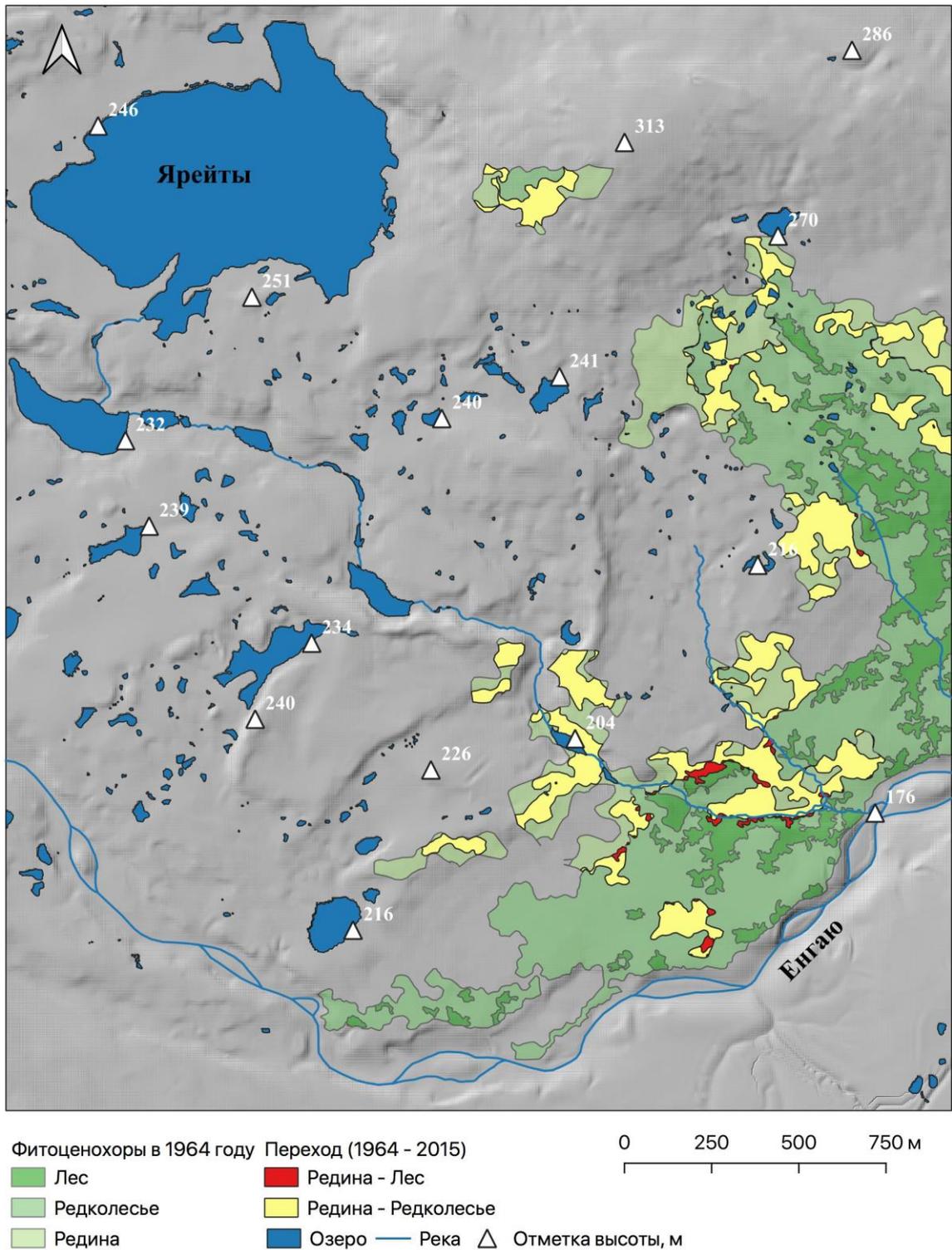


Рисунок 26 – Картосхема, характеризующая пространственного размещение участков, на которых произошла смена типа фитоценохоры с редины на лес и редины на редколесье с начала 1960-х годов до 2015

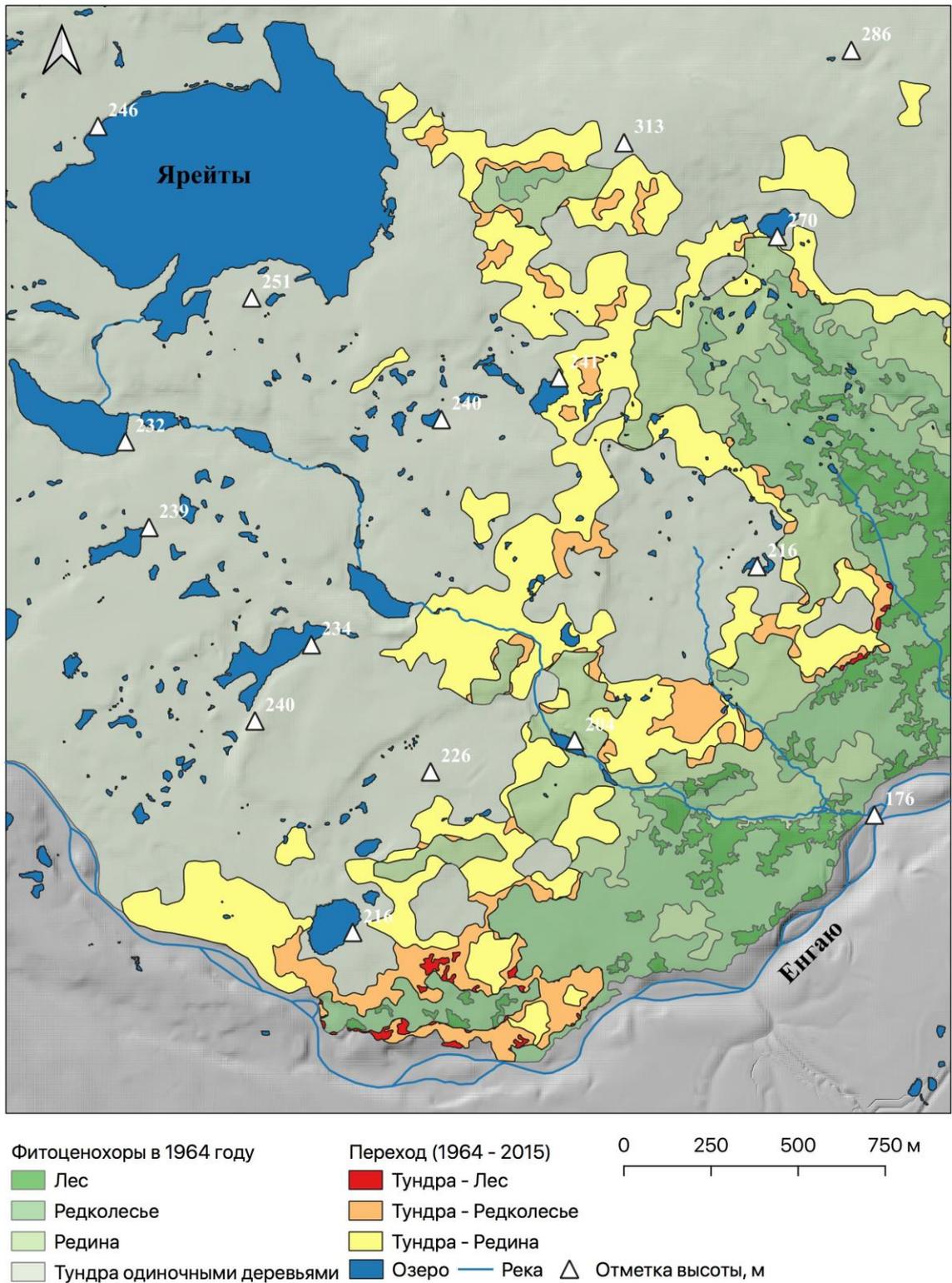


Рисунок 27 – Картосхема, характеризующая пространственного размещение участков, на которых произошла смена типа фитоценохоры «тундра с отдельно стоящими деревьями» на лес, редколесье и редина за период с начала 1960-х годов до 2015 года

Смены типов фитоценозов в районе исследований за период с начала 1960-х годов до 2015 года характеризуются переходами от фитоценозов с меньшей густотой к фитоценозам с большей густотой. При этом площади участков, в которых произошел переход между соседними фитоценозами, т. е. редколесье — лес, редины — редколесье, тундра с отдельно стоящими деревьями — редины, больше площади участков, с более интенсивными переходами, например, таких как редины — лес, тундра с отдельно стоящими деревьями — лес и другими (Таблица 3). На Рисунке 27 можно видеть, что в южной части района исследований локализованы участки с такими переходами. Переходы в обратную сторону, например, от леса к редколесью, рединам и тундре с отдельно стоящими деревьями в исследуемый период не установлены.

Таблица 3 – Изменения типа фитоценоза на участках исследуемой территории за период с 1964 по 2015 годы

№	Фитоценозы		Площадь, га
	1964	2015	
1	Лес	Лес	21,5
2	Редколесье	Лес	25,8
3	Редколесье	Редколесье	44,7
4	Редина	Лес	1,1
5	Редина	Редколесье	28,1
6	Редина	Редина	26,1
7	Тундра с одиночными деревьями	Лес	1,2
8	Тундра с одиночными деревьями	Редина	88,3
9	Тундра с одиночными деревьями	Редколесье	23,4

В районе исследований большое влияние на выживание и рост деревьев оказывают ветер и снег. Сдувание снега с верхних частей выпуклых форм рельефа способствует глубокому промерзанию почвы, что негативно влияет на молодое поколение древесной растительности. Накопление снега на заветренных участках холмов, бугров и гряд приводит к более позднему по сравнению с другими участками освобождению их от снега и, соответственно, сокращению периода вегетации от дней до нескольких недель. Кроме того, в холодный период времени молодые древесные растения сильно страдают от снеговой корразии. Взрослые деревья являются естественной защитой от ветра молодого поколения лиственницы. Этим объясняется формирование биогрупп и увеличение куртин деревьев с дальнейшим смыканием их с соседними участками (Рисунки 24, 26 и 27). После того, как деревья формируют барьер, защищающий молодое поколение древесных растений от негативного влияния снеговой корразии, участки на заветренной стороне данного барьера постепенно зарастают деревьями. Необходимо также отметить факт того, что за барьером из деревьев, также возможно увеличение накопления снега, которое негативно влияет на выживаемость молодых древесных растений. Данная особенность формирования и изменения микроклиматических условий выражается в формировании полос из деревьев (Приложение Г, Рисунок Г3). По мере сдвига барьера из деревьев в направлении преобладающих ветров в этом же направлении и сдвигается и полоса сугроба снега на заветренном участке. При этом глубина снега на участке, на котором ранее наблюдалось избыточное (для выживания лиственницы) снегонакопление, сокращается и условия на нем становятся более благоприятными для выживания и роста лиственницы.

Разработанный метод выделения границ основных типов фитоценозов обладает универсальностью и объективностью, так как позволяет снизить влияние исследователя на конечный результат. А благодаря обоснованным количественным критериям выделения участков по густоте деревьев, которые

должны быть отнесены к разным типам, процедура выделения границы ввиду ее высокой степени формализации может быть автоматизирована.

Анализ изменения местоположения границ ареала вида, вариантов его сдвига и распределения особей внутри него позволяют оценивать устойчивость вида и влияние изменения климата на биоразнообразие (Breshears et al., 2008; Maggini et al., 2010; Lenoir, Svenning, 2014). Классификация вариантов изменения границ ареала и распределение особей внутри него дают возможность оценить устойчивость вида в условиях изменения климата (Lenoir, Svenning, 2014). Разработанная методика выделения границ хорошо вписывается в подход, предлагаемый авторами классификации, которая является достаточно универсальной. Это открывает широкие возможности совместного их применения для анализа климатогенного изменения формы и местоположения не только для ареала вида, но и для других единиц растительного покрова (Михайлович, Фомин, 2016в).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Древесная растительность, произрастающая на верхнем и северном пределах ее распространения, является чувствительным индикатором изменений, происходящих в климатической системе. Улучшение или ухудшение климатических условий сопровождается изменением пространственного положения деревьев и, соответственно, трансформацией горизонтальной пространственной структуры популяций древесных растений.

В районе исследований, который находится в нижнем течении рек Енгаю и Кердоманшор на юго-восточном макросклоне горного массива Рай-Из (Полярный Урал), проведен анализ климатогенной пространственно-временной динамики лиственницы сибирской в экотоне верхней границы древесной растительности. В ходе работ созданы картосхемы, характеризующие пространственное положение деревьев в начале 1960-х и 2015 годах, а также деревьев, погибших в верхней части экотона в ходе средневекового похолодания, продолжавшегося с конца XIII до конца XIX века.

Результаты сравнительного анализа полученных данных свидетельствуют о том, что современная древесная растительность в целом еще не достигла пределов, занимаемых ею в прошлом, при этом за полувековой период количество деревьев высотой более 2,3 м в районе исследований увеличилось почти в два раза. В качестве дополнительного источника данных, характеризующих процессы продвижения лиственницы сибирской в тундру или на слабооблесенные участки исследуемой территории, приведены повторные ландшафтные фотографии, сделанные с одних и тех же точек фотосъемки в начале 1960-х годов и 2016 году.

Также был проведен анализ пространственных закономерностей изменения уровней действия ведущих экологических факторов на исследуемой территории и выполнена оценка их влияния на появление деревьев в ЭВГДР во второй половине XX — начале XXI века. С использованием созданных в ходе исследований картосхем установлены хорошо выраженные закономерности

распределения деревьев в пространстве в зависимости от уровня инсоляции и ветрового воздействия. В местах формирования глубокого снегового покрова в понижениях рельефа в результате сдувания снега с вершин холмов и гряд деревья отсутствуют.

Для проведения пространственного анализа распределения основных типов фитоценозов (сомкнутый лес, редколесье, редины и тундра с одиночными деревьями) создан оригинальный метод выделения границ между ними на основе данных о местоположении деревьев и количественных порогов густоты для каждого типа фитоценоза. Разработанная методика обладает высокой степенью универсальности и позволяет повысить степень объективности получаемых результатов. Установлено 15-процентное увеличение площади участков, занимаемых сомкнутым лесом, редколесьем и рединой, за счет сокращения площади тундры с одиночными деревьями. Разработанный метод позволяет оценить особенности продвижения деревьев в тундру и появления деревьев на необлесенных или слабооблесенных участках исследуемой территории.

Созданные картографические материалы, характеризующие уровни действия ведущих экологических факторов и местоположение деревьев лиственницы сибирской в начале 1960-х годов и 2015 году, а также остатков деревьев, погибших в ходе средневекового похолодания, дают представление о механизмах, лежащих в основе регуляции численности популяции лиственницы сибирской и обеспечивающих устойчивость популяции в условиях изменения климата.

Повторные ландшафтные фотографии являются объективным источником информации о растительности. Сравнительный анализ наземных изображений позволяет оценить изменение размера и формы растений, а также обнаруживать появление новых экземпляров на участках местности в пределах области видимости фотографии, и, соответственно, оценивать изменение пространственного положения растительности с течением времени. Одним из

перспективных направлений в развитии системы экологического мониторинга является совершенствование метода наземного фотомониторинга.

Повторное фотографирование с одних и тех же точек фотосъемки периодически проводилось в районе разными исследователями с начала 1960-х годов до настоящего времени. Для повышения эффективности использования наземных изображений при проведении экологических исследований была разработана методика представления, обработки, анализа и аннотирования повторных ландшафтных фотографий. В ее основе лежит способ представления области, отображенной на фотографии, в виде сектора видимости из точки фотосъемки. Данный способ позволяет проводить сопряжение объектов тематических геоинформационных слоев в пределах сектора видимости со всей областью фотографии или отдельными ее фрагментами.

Разработанная методика анализа и представления одно- и многократных ландшафтных фотографий позволяет решить следующие проблемы их использования при проведении научных исследований: формирование у человека целостного представления об исследуемом пространстве; получение дополнительных количественных и качественных данных о местности; автоматизированное создание и пополнение описаний ландшафтных снимков на естественном языке; создание тематических слоев и карт с использованием повторных ландшафтных фотоизображений.

Сделанные в ходе исследований одно- и многократные повторные фотографии позволили получить ценную информацию о влиянии экологических факторов на древесную растительность, проиллюстрировать ряд феноменов, обусловленных влиянием ведущих экологических факторов на рост, развитие и возобновление древесной растительности на верхнем пределе ее произрастания, а также задокументировать те изменения, которые произошли в экотоне верхней границы древесной растительности в условиях изменения климата с начала 1960-х годов до 2015 года.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрояшкина, Н.И. К оценке флористического разнообразия фитоценозов Полярного Урала / Н.И. Андрояшкина // Успехи современного естествознания. – 2014. – №1. – С.7–12.
2. Арефьев С.П. Фиксация потепления климата в древесно-кольцевых хронологиях кустарников на севере Ямала и Гыданского полуострова / С. П. Арефьев // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. – 2015. – Т. 8. – № 4. – С. 377–393.
3. Арефьев С.П. Реакция деревьев и кустарников восточной части Тазовского полуострова на потепление климата / С. П. Арефьев // Экологический мониторинг и биоразнообразие. – 2016. – № 1 (11). – С. 5–9.
4. Бахсолиани, Т. Г. О динамичности типов леса Закавказья / Т. Г. Бахсолиани, М. А. Сванидзе // Вопросы лесоведения. – Т. 2. – Красноярск, 1973. – С. 114–121.
5. Бейтсон, Г. Разум и природа: неизбежное единство / Г. Бейтсон. – М.: КомКнига, 2007. – 248 с.
6. Берлянт, А. М. Геоиконика / А. М. Берлянт. – М.: Астрейя, 1995. – 219 с.
7. Блинов, Н. Н. Глаз и изображение / Н.Н. Блинов. – М.: Медицина, 2004. – 320 с.
8. Бунимович, Д. З. Курс фотографии / Д.З. Бунимович. – М.: Легкая индустрия, 1968. – 345 с.
9. Быков, Б. А. Геоботаника / Б.А. Быков. – Алма-Ата: Наука, 1978. – 288 с.
10. Ваганов, Е. А. Изменчивость летней температуры воздуха в высоких широтах Северного полушария за последние 1,5 тыс. лет: сравнительный анализ данных годовичных колец деревьев и ледовых кернов / Е. А. Ваганов, С. Г. Шиятов, Р. М. Хантемиров [и др.] // Докл. РАН. – 1998. – Т. 358. – № 5. – С. 681–684.
11. Ваганов, Е. А. Дендрохронология: учеб. пособие / Е. А. Ваганов, В. Б. Круглов, В. Г. Васильев. – Красноярск: СФУ, 2008. – 120 с.

- 12.Вернадский, В. И. Размышления натуралиста / В. И. Вернадский. – М.: Наука, 1975. – 175 с.
- 13.Влияние изменений климата на экосистемы бассейна реки Амур. – М.: WWF России, 2006. – 128 с.
- 14.Галазий, Г. И. Вертикальный предел древесной растительности в горах Восточной Сибири и его динамика [Тезисы] / Г. И. Галазий // Тр. Бот. ин-та им. В. Л. Комарова АН СССР. – Сер. III (геоботаника). – 1954 – Вып. 9.
- 15.Гонсалес, Р. Принципы распознавания образов / Р. Гонсалес, Дж. Ту. – М.: Мир, 1978. – 413 с.
- 16.Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
- 17.Горчаковский, П. Л. Лесная растительность подгольцового пояса Урала / П. Л. Горчаковский // Сб. тр. по лесн. хоз-ву. – Свердловск, 1954. – Вып 2. – С. 15–65.
- 18.Горчаковский, П. Л. Флора и растительность высокогорий Урала / П. Л. Горчаковский // Тр. Ин-та биологии УФАН СССР. – 1966. – Вып. 48. – С. 3–269.
- 19.Горчаковский, П. Л. Физиономическая и экологическая дифференциация верхней границы леса на Северном Урале / П. Л. Горчаковский, С. Г. Шиятов // Зап. Сверд. отд. ВБО. - Свердловск, 1970. – Вып.5. – С. 14 –33.
- 20.Горчаковский, П. Л. Фитоиндикация климатических условий на верхнем пределе леса / П. Л. Горчаковский, С. Г. Шиятов // Экология. – 1973. – № 1. – С. 50 – 65.
- 21.Горчаковский, П. Л. Растительный мир высокогорного Урала / П. Л. Горчаковский. – М.: Наука, 1975. – 283 с.
- 22.Горчаковский, П. Л. Фитоиндикация условий среды и природных процессов в высокогорьях / П. Л. Горчаковский, С. Г. Шиятов. – М.: Наука, 1985. – 208 с.
- 23.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. N 161-ст 2002 г.  
URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200029976>
24. Грибова, С.А. Картирование растительности в съемочных масштабах / С. А. Грибова, Т. И. Исаченко; под ред. Е.М. Лавренко, А. А. Корчагина. – М.: Наука, 1972. – С. 137 – 31.
25. Данилова, И.В. Алгоритм автоматизированного картографирования современного состояния и динамики лесов на основе ГИС /И. В. Данилова, В. А. Рыжкова, М.А. Корец // Вестник Новосибирского гос. ун-та. – Сер.: Информационные технологии. – 2010. – № 4 (8). – С. 15 – 24.
26. Дедю, И. И. Экологический энциклопедический словарь/ И. И. Дедю; предисл. В. Д. Федорова. – Кишинев: Гл. ред. Молд. сов. энцикл., 1990. – 406 с.
27. Заугольнова, Л. Б. Ценопопуляции растений (очерки популяционной биологии) / Л. Б. Заугольнова, Л. А. Жукова, А. С. Комаров [и др.] — М.: Наука, 1988. — 184 с.
28. Заугольнова, Л.Б. Современные представления о структуре растительного покрова: концепция иерархического покрова / Л.Б. Заугольнова // Успехи современной биологии. – 1999. – № 2 (119). – С. 115–127.
29. Изменение климата. Комплект информационных карточек по изменению климата. – М.: ЮНЕП РКИКООН, 2003. – 64 с.
30. 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 [и др.] // Экология. – 2006. – № 6. – С. 403 – 409.
31. Каразия, С. П. Отражение процессов развития леса в типологической классификации Литвы / С. П. Каразия // Генетическая типология, динамика и география лесов России: материалы Всероссийской научной конференции (с международным участием). 21-24 июля 2009 г. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – С. 54-56.

32. Карпенко, А. С. О понятии «Картографических метод исследования» / А. С. Карпенко. – Л.: Наука, 1972. – С. 50–53.
33. Колесников, Б. П. Генетическая классификация типов леса и ее задачи на Урале / Б. П. Колесников // Труды Института биологии Уральского филиала АН СССР. – Свердловск, 1961. – Вып. 27. – С. 47–59.
34. Колесников, Б. П. Применение таксационно-статистического метода и генетической классификации типов леса / Б. П. Колесников, Е. М. Фильрозе // Лесоведение. – 1967. – № 4. – С. 16–25.
35. Колесников, Б. П. Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области / Б. П. Колесников, Р. С. Зубарева, Е. П. Смолоногов. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1974. – 176 с.
36. Королюк, А. Ю. Классификация территориальных единиц растительности равнинных территорий для целей создания геоинформационной системы "Растительность Сибири" / А. Ю. Королюк // Геоботаническое картографирование 1997. – С.-Петербург, 1999. – С. 3–13.
37. Кузнецова, Р. С. Структура и динамика растительного покрова при крупномасштабном геоботаническом картографировании / Р. С. Кузнецова // Юг России: экология, развитие. – 2013. – № 2. – С. 14–21.
38. Луганский, Н. А. Лесоведение и лесоводство. Термины, понятия, определения: учеб. пособие / Н. А. Луганский, С. В. Залесов, В. Н. Луганский. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2010. – 128 с.
39. Мазепа, В. С. Климатогенная динамика верхней границы лиственных редколесий на Полярном Урале за последние полторы тысячи лет / В. С. Мазепа, С. Г. Шиятов // Леса России и хозяйство в них. – 2015. – № 55 (4). – С. 4–11.
40. Мелехов, И. С. К классификации растительного покрова в связи с концентрированными рубками / И. С. Мелехов // Труды Института биологии. – Свердловск, 1961. – Вып. 27. – С. 139–145.

41. Микулин, В.П. Книга для фотолюбителей / В.П. Микулин. – М.: Московский рабочий, 1969. – 240 с.
42. Миркин, Б.М. Словарь понятий и терминов современной фитоценологии / Б.М. Миркин, Г.С. Розенберг, Л.Г. Наумова. – М.: Наука, 1989. – 223 с.
43. Михайлович, А. П. Исследование пространственно-временной динамики древесной растительности с использованием повторных исторических ландшафтных фотографий / А. П. Михайлович // «Экология: сквозь время и расстояния»: материалы всерос. конф. молодых ученых, посвящ. 50-летию первой молодежной конф. в ИЭРиЖ 11-15 апреля 2011 г. – Екатеринбург: УрО РАН, ИЭРиЖ, 2011. – С. 126–127.
44. Михайлович, А. П. Исследование пространственно-временной динамики древесной растительности на верхнем пределе ее распространения на Полярном Урале с использованием повторных ландшафтных фотографий / А. П. Михайлович, В. В. Фомин // Леса России и хозяйство в них. – 2016а. – Вып. 2 (57). – С. 53 – 63.
45. Михайлович, А.П. Пространственно-временная динамика верхней границы леса в нижнем течении рек Енгаю и Кердоманшор (Полярный Урал) во второй половине XX – начале XXI веков / А. П. Михайлович, В. В. Фомин // «Экологическое равновесие: структура географического пространства»: материалы VII международной научно-практической конференции 11 ноября 2016 г. Санкт-Петербург, 2016б. – С. 120 – 124.
46. Михайлович, А.П. Фотографический атлас ландшафтов Полярного Урала в нижнем течении рек Енгаю и Кердоманшор во второй половине XX – начале XXI веков / А.П. Михайлович, С.Г. Шиятов, В.В. Фомин. – Екатеринбург: ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», 2016. – 97 с.
47. Михайлович, А. П. Климатогенная пространственно-временная динамика древесной растительности в экотоне верхней границы леса на Полярном Урале / А. П. Михайлович, В. В. Фомин // Экология речных бассейнов: тр. VIII

- междунар. научн.-практ. конф., 13-16 сентября 2016 года. – Владимир: Аркаим, 2016в. –С. 139 – 144.
48. Михайлович А. П. Анализ и представление повторных ландшафтных фотоснимков для оценки пространственно-временной динамики редкостойных древостоев / А.П. Михайлович, В.В. Фомин, С. Г Шиятов // Экологическое равновесие: структура географического пространства: матер. VII междунар. научн.-практ. конф., 11 ноября 2016 г. – Санкт-Петербург: Ленинградский государственный университет им. А.С. Пушкина, 2016а. – С. 128–131.
49. Михайлович А. П. Анализ высокогорной древесной растительности по данным фотомониторинга с использованием ГИС / А. П. Михайлович, В. В. Фомин, С. Г. Шиятов // ИНТЕРКАРТО. ИНТЕРГИС. – 2016б. – т. 22. – № 1. – С. 135–142.
50. Михайлович, А. П. Пространственные закономерности распределения деревьев в экотоне верхней границы древесной растительности на Полярном Урале во второй половине XX – начале XXI веков / А. П. Михайлович, В. В. Фомин // Известия Уфимского научного центра РАН. – 2017а. – № 4(1). – С. 65–67.
51. 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. – 2017б. – № 4(1). – С. 62–64.
52. Михайлович А. П. Исследование пространственно-временной динамики древесной растительности на верхнем пределе ее произрастания с использованием ландшафтных фотографий / А. П. Михайлович, В. В. Фомин // Экология речных бассейнов: тр. IX междунар. научн.-практ. конф., 5-18 сентября 2018 года – г. Суздаль: Владим. гос. ун-т. им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, 2018. – С. 221–226.
53. Моисеев, П. А. Влияние изменения климата на формирование поколений ели сибирской в подгольцовых древостоях Южного Урала / П. А. Моисеев,

- М. Ван Дер Меер, А. Риглинг [и др.] // Экология. – 2004. – Вып. 35. – № 3. – С. 135–143.
54. Моисеев, П.А. Динамика подгольцовых древостоев на склонах Серебрянского камня (Северный Урал) в последние столетия / П.А. Моисеев, А.А. Бартыш, А.В. Горяева [и др.] // Хвойные бореальной зоны. – 2008. – Т. XXV. – № 1–2. – С. 21–27.
55. Намзалов, Б.Б. Пространственная структура растительности богаторазнотравно-ковыльных степей юга Западно-Сибирской равнины (Северная Кулунда) / Б. Б. Намзалов // Геоботаническое картографирование 1994–1995. – СПб., 1996. – С. 16–33.
56. Нестеров, Ю. А. Фотомониторинг ландшафтов Среднерусской лесостепи / Ю.А. Нестеров, В.С. Сарычев // Вестник Воронежского гос. ун-та. – Сер.: География. – Геоэкология. – 2006. – № 1. – С. 53–63.
57. Норин, Б. Н. Некоторые вопросы теории фитоценологии. Ценотическая система, ценотические отношения, фитогенное поле / Б. Н. Норин // Бот. журн. – 1987. – Т. 72. – №9. – С. 1161–1174.
58. Осипов, С. В. Структура растительного покрова таежно-гольцового ландшафта (на примере Буреинского нагорья) [Текст]: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 03.00.05 / С. В. Осипов. – Владивосток: Биолого-почвенный институт ДВО РАН, 2002. – 26 с.
59. Панова, Н. К. Динамика растительности и экологические условия на Полярной Урале в голоцене / Н.К. Панова, В. Янковска, О.М. Корона [и др.] // Экология. – 2003. – № 4 – С. 247–259.
60. Петров И.А. Реакция хвойных экотона альпийской лесотундры Кузнецкого Алатау на изменение климата / Петров И.А., Харук В.И., Двинская М.Л [и др.] // Сибирский экологич. журн. – 2015. – Т. 22. – № 4. – С. 518–527.
61. Плюснин, В. М. Динамика горных геосистем юга Сибири / В. М. Плюснин, О. В. Дроздова, А. Д. Китов [и др.] // География и природные ресурсы. – 2008. – № 2. – С. 5–13.

62. Погребняк, П. С. Основы лесной типологии / П.С. Погребняк. – Киев: Изд-во Академии наук Украинской ССР, 1955. – 452 с.
63. Погребняк, П. С. Общее лесоводство / П.С. Погребняк. – М.: Колос, 1968. – 440 с.
64. Полежаев, А.Н. Растительность севера Дальнего Востока России в информационных системах / А.Н. Полежаев // Экология. – 2009. – № 3. – С. 180–186.
65. Полежаев, А.Н. Растительность севера Дальнего Востока России в картографических моделях / А.Н. Полежаев // Геоботаническое картографирование – СПб., 2013. – С. 48–67.
66. Попова, Л.П. Обзор существующих методов распознавания образов / Л. П. Попова, И. О. Датъев // Информационные технологии в региональном развитии. – Апатиты, 2007. – Вып. VII. – С. 93–103.
67. Попова, Л.П. Система анализа графического контента веб-страниц / Л. П. Попова, И. О. Датъев, М. Г. Шишаев // Информационные технологии в региональном развитии. – Апатиты, 2008. – Вып. VIII. – С. 82–86
68. Растительность Южного Урала на участке между Ильменским заповедником и горой Ирмель : путеводитель бот. экскурсии / под ред. П. Л. Горчаковского. – Свердловск: Ин-т экологии растений и животных УНЦ АН СССР, 1982. – С. 27–53.
69. Рыжкова, В.А. Картографирование лесного покрова на основе принципов генетической типологии с использованием ГИС / В. А. Рыжкова, М. А. Корец, И. В. Данилова // Генетическая типология, динамика и география лесов России: докл. Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 100-летию со дня рождения Б.П. Колесникова (Екатеринбург, 21–24 июля 2009 г.). – Екатеринбург: Ботанический сад УрО РАН, 2009. – С. 184–187.

- 70.Самойленко, З. А. Территориальные единицы растительности Обь-Иртышского междуречья / З. А. Самойленко, Л. Ф. Шепелева, А. И. Шепелев // Вестник Томского гос. ун-та. – 2009. – Вып. 327. – С. 208–213.
- 71.Санников, С.Н. Развитие лесной популяционной биологии и биогеоценологии на Урале / С. Н. Санников, Н. С. Санникова, И. В. Петрова [и др.] // Сибирский лесной журн. – 2014. – № 3. – С. 9–24.
- 72.Сарычев, В.С. Фотомониторинг состояния популяции Шиверекии подольской *Schivereckia podolica Andrz.* в заповеднике “Галичья Гора” / В.С. Сарычев // Экологические исследования в заповеднике “Галичья Гора”. – 2006. – № 1. – С. 33–42.
- 73.Свидетельство № 2010612715 Российская Федерация. Сегментация геопространства по наземным геоизображениям - Geoimage Spatial Segmentation Model (GeoSSM): свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / В. В. Фомин; заявитель и правообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Передовые сервисы и технологии". - № 2010610868; заявл. 25.02.20010; зарегистр. 21.04.2010. – 1 с.
- 74.Свидетельство № 2016662558 Российская Федерация. Программный комплекс для автоматизированного создания геоинформационного слоя, характеризующего условия местопроизрастания древесной растительности, на основе анализа цифровой модели рельефа (АСГСУМ): свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / В. В. Фомин, А.П. Михайлович; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет». - № 2016619916; заявл. 22.09.2016; зарегистр. 15.11.2016. – 1 с.
- 75.Седых, В. Н. Ландшафтно-типологическая основа для проведения лесоустройства на территории Сибири / В.Н. Седых // Лесная таксация и лесоустройство. – 2005. - Вып. 1(34). – С. 70–77.

76. Система // Большой Российский энциклопедический словарь. – М.: БРЭ. – 2003. – С. 1437.
77. Смолоногов, Б. П. Комплексное районирование Урала [Текст] / Б.П. Смолоногов // Леса Урала и хозяйство в них. – 1995а. – Вып. 18. – С. 24 – 42.
78. Смолоногов, Е. П. Лесообразовательный процесс и генетическая классификация типов леса / Е. П. Смолоногов // Леса Урала и хозяйство в них : сб. науч. тр. / Урал. гос. лесотехн. акад. – Екатеринбург, 1995б. – Вып. 18. – С. 43 – 58.
79. Смолоногов, Е. П. Основные положения генетического подхода при построении лесотипологических классификаций / Е.П. Смолоногов // Экология. – 1998. – № 4. – С. 256 – 261.
80. Сочава, В. Б. Пределы лесов в горах Ляпинского Урала / В. Б. Сочава // Тр. Бот. музея АН СССР. – Л.: Изд-во АН СССР, 1930. – Вып. 22. – С. 1–48.
81. Сочава, В.Б. Перспективы геоботанического картирования / В. Б. Сочава // Геоботаническое картографирование. – М.; Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1963. – С. 3–10.
82. Сочава, В. Б. Классификация растительности как иерархия динамических систем / В. Б. Сочава // Геоботаническое картографирование. – Л., 1972. – С. 3–17.
83. Сочава, В.Б. Рубежи на геоботанических картах и буферные растительные сообщества. / В. Б. Сочава // Геоботаническое картирование 1978. – Л.: Наука, 1978. – С. 3–11.
84. Станюкович, К. В. Растительность высокогорий СССР / К. В. Станюкович. – Душанбе: Изд-во АН ТаджССР, 1960. – Ч. 1.– 167 с.
85. Сукачев, В. Н. Развитие лесной типологии в СССР за 40 лет / В.Н. Сукачев // Достижения науки в лесном хозяйстве за 40 лет. – М.; Л.: Гослесбумиздат, 1957. – С. 5 – 16.

86. Сукачев, В. Н. Основы лесной типологии и лесной биогеоценологии: в 3 т. Т. 1 / В.Н. Сукачев. – Л.: Наука, 1972. – 408 с.
87. Тихомиров, Б. А. К вопросу о динамике полярного и вертикального предела лесов Евразии / Б. А. Тихомиров // Сов. бот. – 1941. – № 5/6. – С. 23 – 38.
88. Тихомиров, Б. А. Некоторые итоги и основные проблемы изучения растительного покрова севера Сибири / Б. А. Тихомиров // Известия СО АН СССР. – 1959. – № 2.
89. Фамелис, Т. В. Методические основы отображения структуры и закономерностей распределения высокогорной растительности на крупномасштабных картах (на примере Северного Урала): дис. ... канд. биол наук / Т. В. Фамелис. – Свердловск, 1977. – С. 44–63.
90. Фарбер, С. К. Структуризация лесных сообществ / С. К. Фарбер // Сибирский лесной журнал. – 2014. – № 1 – С. 35–49.
91. Фирсова, В. П. Почвы высоких широт горного Урала / В. П. Фирсова, В. С. Дедков. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. – 96 с.
92. 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.
93. Фомин, В.В. Метрологические аспекты анализа изображений / В.В. Фомин, А. П. Михайлович, А.С. Попов [и др.] // Измерительная техника. – 2008. – № 2. – С. 25–28.
94. 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.
95. 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.

96. Фомин, В.В. Климатогенная и антропогенная динамика древесной растительности в экстремальных условиях ее произрастания (на примере Урала): дис. д-ра биол. наук: 06.03.02, 03.02.08 / В.В. Фомин. – Екатеринбург, 2011. – 310 с.
97. Фомин, В. В. Географо-генетический подход к оценке и прогнозированию лесных ресурсов с использованием ГИС-технологий / В. В. Фомин, С. В. Залесов // Аграрный вестник Урала. – 2013. – № 12 (118) – С. 18 – 24.
98. Фомин, В.В. Анализ классификационной схемы типов леса южно-таежного лесорастительного округа географо-генетической классификации Б.П. Колесникова для создания алгоритмов автоматизированного выделения типов лесорастительных условий с использованием ГИС-технологий / В. В. Фомин, Д. Ю. Голиков, Д. С. Капралов // Эко-потенциал. – 2013. – № 3-4 – С. 173–179.
99. Фомин, В. В. Экологический фотомониторинг естественных и антропогенных ландшафтов / В. В. Фомин, А.П. Михайлович // Аграрный вестник Урала. – 2013. – № 11. – С. 16–21.
100. Фомин, В. В. Методики оценки густоты подроста и древостоев при зарастании сельскохозяйственных земель древесной растительностью с использованием космических снимков высокого пространственного разрешения / В. В. Фомин, С. В. Залесов, А. Г. Магасумова // Аграрный вестник Урала. – 2015. – № 1 (131). – С. 25 – 29.
101. Фомин, В. В. Новые подходы к изучению динамики древесной растительности с использованием разновременных ландшафтных фотоснимков (на примере Полярного Урала) / В. В. Фомин, А. П. Михайлович, С. Г. Шиятов // Экология. – 2015. – № 5. – С. 323-331.
102. 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, Д. Ю. Голиков, Е. Бенева //

- Лесная наука в реализации концепции уральской инженерной школы: социально-экономические и экологические проблемы лесного сектора экономики: матер. XII междунар. научн-техн. конф., 22 мая 2019 года – г. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет. Екатеринбург, 2019. – С. 243–246.
103. Фомин, В.В. Климатогенная динамика растительности и генетическая лесная типология / В.В. Фомин, А.П. Михайлович, Н.С. Иванова, Е.С. Золотова // Актуальные проблемы современного лесоводства: вторые международные чтения памяти Г. Ф. Морозова: к столетию памяти классика русского лесоводства 1920- 2020 гг. Симферополь, 2020. – С. 22-26.
104. Форсайт, Д. Компьютерное зрение. Современный подход / Д. Форсайт, Ж. Понс. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 928 с.
105. Харук, В. И. Временная динамика лиственницы в экотоне лесотундры / В. И. Харук, С. Т. Им, К. Дж. Рэнсон [и др.] // Доклады РАН. – 2004. – Т. 398. – № 3. – С. 1–5.
106. Харук, В. И. Космоснимки высокого разрешения в анализе временной динамики экотона лесотундры / В. И. Харук, С. Т. Им, К. Дж. Рэнсон [и др.] / Исследование Земли из космоса. – 2005а. – № 6. – С. 1–10.
107. Харук, В.И. Проникновение вечнозеленых хвойных деревьев в зону доминирования лиственницы и климатические тренды / В. И. Харук, М. Л. Двинская, К. Дж. Рэнсон [и др.] // Экология. –2005б. – № 3. – С. 186–192.
108. Холод, С.С. Современное состояние и перспективы геоботанического картографирования в Ботаническом институте РАН / С. С. Холод, Т. К. Юрковская// Геоботаническое картографирование 1992. – Л.: Наука, 1994. – С. 3–20.
109. Холод, С.С. Фитоценохоры подзоны арктических тундр: картографический метод исследования / С. С. Холод // Геоботаническое картографирование. – Спб., 2015. – С. 120–143.

110. Цветков, В. Ф. Типы формирования насаждений как представительные ряды динамики типа леса / В.Ф. Цветков // Генетическая типология, динамика и география лесов России: докл. Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 100-летию со дня рождения Б.П. Колесникова (Екатеринбург, 21–24 июля 2009 г.). – Екатеринбург: Ботанический сад УрО РАН, 2009. – С. 69–71.
111. Чибисов, К.В. Фотография в прошлом, настоящем и будущем / К.В. Чибисов, В.И. Щеберстов, А.А. Слуцкий. – М.: Наука, 1988. – 175 с.
112. Шапиро, Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
113. Шиятов, С. Г. Динамика верхней границы леса на восточном склоне Полярного Урала (бассейн реки Соби) : автореф. дис. ... канд. биол. Наук / Шиятов С. Г. – Свердловск, 1964. – 25 с.
114. Шиятов, С. Г. О некоторых особенностях роста древесных растений на верхнем и полярном пределах лесов / С. Г. Шиятов // Вопросы древесного прироста в лесоустройстве. – Каунас, 1967а. – С. 107–111.
115. Шиятов, С. Г. Колебания климата и возрастная структура древостоев лиственничных редколесий в горах Полярного Урала / С. Г. Шиятов // Растительность лесотундры и пути ее освоения. – Л.: Наука, 1967б. – С. 271–278.
116. Шиятов, С. Г. О типах верхней границы леса и ее динамике на Полярном Урале / С. Г. Шиятов // Биологические основы использования природы Севера. – Сыктывкар, 1970. – С. 73–81.
117. Шиятов, С.Г. Климатогенная динамика подгольцовых редколесий на Полярном Урале в XX столетии / С. Г. Шиятов // Тез. Всерос. совещ. «Реакция растений на глобальные и региональные изменения природной среды» (Иркутск, 25–29 сентября 2000 г.). – Иркутск, 2000. – С. 109.
118. Шиятов, С. Г. Изменения климата и их влияние на горные экосистемы Национального парка «Таганай» за последние столетия / С. Г. Шиятов,

- В. С. Мазепа, П. А. Моисеев [и др.]// Влияние изменения климата на экосистемы. – М.: Рус. ун-т, 2001.– Разд. II. – С. 16–31.
119. Шиятов, С. Г. Климатогенная динамика лесотундровых экосистем в горах Полярного Урала / С. Г. Шиятов, В. С. Мазепа. – Екатеринбург: Академкнига, 2002. – С. 41–45.
120. Шиятов, С. Г. Изменение климата и динамика лесотундровых экосистем на Полярном Урале в XX столетии / С. Г. Шиятов, В. С. Мазепа, О. Ю. Чехлов // Науч. вестник. – 2002. – Вып. 11. – С. 28–35.
121. 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.
122. 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 [и др.] // Экология. – 2007. – № 4. – С. 243–248.
123. Шиятов, С.Г. Климатогенная динамика лесотундровой растительности на Полярном Урале / С.Г. Шиятов, В.С. Мазепа // Лесоведение. – 2007. – № 6. – С. 11–22.
124. Ameztegui, A, Land - use legacies rather than climate change are driving the recent upward shift of the mountain tree line in the Pyrenees / A. Ameztegui, L. Coll, L Brotons [et al.] // Glob Ecology Biogeography. – 2015. – No 25(3). – P. 263–273.
125. Armi, E Texture Image Analysis and Texture Classification Methoda – A Review / E. Armi, S. Fekri-Ershad // International Online Journal of Image Processing and Pattern Recognition – 2019. – Vol. 2. – No 1. – P. 1-29.
126. Austin, M. A new model for the continuum concept / M. Austin, T. Smith // Plant Ecology. – 1989. – No 83 (1). – P. 35–47.
127. Bakker, J. Holocene environmental change at the upper forest line in northern Ecuador / J. Bakker, M. M. Olivera, H. Hooghiemstra // The Holocene. – 2008. – No 6 (18). – P. 877–893.

128. Bateson, G. *Mind and nature: a necessary unity* / G. Bateson. – New York: E. P. Dutton, 1979. – 239 p.
129. Bauer, M. E. Multi-temporal landsat image classification and change analysis of land cover in the twin cities (Minnesota) metropolitan area / M.E. Bauer, F. Yuan, K.E. Sawaya // MutiTemp-2003, Second International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images. July 16-18, – 2003. Ispra, Italy.
130. Bertalanffy, L. *General system theory: foundations, development, applications* / L. von Bertalanffy. – New York: G. Braziller, 1968. – 289 p.
131. Breshears, D. D. Vegetation synchronously leans upslope as climate warms/ D. D. Breshears, T. E. Huxman, H. D. Adams [et. al]// *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2008. – Vol. 105. – No 33. – P. 11591–11592.
132. Bryn, A. Recent forest limit changes in south-east Norway: Effects of climate change or regrowth after abandoned utilisation? / A. Bryn // *Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian Journal of Geography*. – 2008. – No 4 (62). – P. 251–270.
133. Bryn, A. Elevational treeline and forest line dynamics in Norwegian mountain areas – a review / A. Bryn, K. Potthoff // *Landscape Ecology*. – 2018. –Vol. 33. – Issue 8. – P. 1225–1245.
134. Buckley, H.L. Using codispersion analysis to characterize spatial patterns in species co-occurrences / H. L. Buckley, B. S. Case, A.M. Ellison // *Ecology*. – 2016. – No 1 (97). – P. 32–39.
135. 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. – Vol. 15. – Issue 2. – P. 182–191.
136. Camarero, J.J. Back to the Future: The Responses of Alpine Treelines to Climate Warming are Constrained by the Current Ecotone Structure / J. J. Camarero, J. C. Linares, A. I. García-Cervigón [et al.] // *Ecosystems*. – 2017. –. No 4 (20). – P. 683–700.

137. Carneiro, G. Supervised Learning of Semantic Classes for Image Annotation and Retrieval / G. Carneiro, A. B. Chan, P. Moreno [et al.] // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2007. – Vol. 29. – No.3 – P. 394–410.
138. Chen, B. Temperature change along elevation and its effect on the alpine timberline tree growth in the southeast of the Tibetan Plateau / B. Chen, Y. Sun, H. Zhang [et al.] // Advances in Climate Change Research. – 2018. – Vol. 9. – No. 3 – P. 185–191.
139. Chiu, C.-A. A concise scheme of vegetation boundary terms in subtropical high mountains / C.-A. Chiu, M.-F. Lee, H.-Y. Tzeng [et al.] // African journal of agricultural research. – 2014. – Vol. 9. – P. 1560–1570.
140. Clay, G. R. Monitoring Forest Transitions Using Scanned Ground Photographs as a Primary Data Source / G. R. Clay, S. E. Marsh // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2001. – Vol. 67. – No. 3. – P. 319–330.
141. Dahdouh-Guebas, F. Long-term retrospection on mangrove development using transdisciplinary approaches: A review. / F. Dahdouh-Guebas, N. Koedam // Aquatic Botany. – 2008. – Vol. 89. – P. 80–92.
142. Davis', F. W. Modeling vegetation pattern using digital terrain data / F. W. Davis', S. Goetz // Landscape Ecology. – 1990. – Vol. 4. – No. 1. – P. 69–80.
143. DeMers, M. N. Fundamentals of geographic information systems / M.N. DeMers. – Wiley, 2009. – 443 p.
144. Devi, N. Expanding forests and changing growth forms of Siberian larch at the Polar Urals treeline during the 20th century/ N .Devi, F. Hagedorn, P. Moiseev [et al.] // Global Change Biology. – 2008. – No 14(7). – P. 1581–1591.
145. Dial, R. Changes in the alpine forest-tundra ecotone commensurate with recent warming in southcentral Alaska: Evidence from orthophotos and field plots /R. Dial, E. Berg, K. Timm, [et al.] // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. – 2007. – No. G4 (112). – P. 1–15.
146. Dufour-Tremblay, G. Dynamics at the treeline: Differential responses of *Picea mariana* and *Larix laricina* to climate change in eastern subarctic Québec /

- G. Dufour-Tremblay, E. Lévesque, S. Boudreau // *Environmental Research Letters*. – 2012. – No 4 (7) – P. 1–10.
147. Dutt, V. *Pattern Recognition: an Overview* / V. Dutt, V. Chaudhry, I. Khan // *American Journal of Intelligent Systems* – 2012, No 2(1) – P. 23-27
148. Elliott, G.P. Influences of 20th-century warming at the upper tree line contingent on local-scale interactions: evidence from a latitudinal gradient in the Rocky Mountains, USA / G.P. Elliott // *Global Ecology and Biogeography*. – 2011. – No 1 (20). – P. 46–57.
149. Elliott, G.P. Extrinsic regime shifts drive abrupt changes in regeneration dynamics at upper treeline in the Rocky Mountains, USA / G.P. Elliott // *Ecology*. – 2012. – No 7 (93). – P. 1614–1625.
150. Evans, J. CTI.aml Compound Topographic Index AML script / J. Evans// available at: <http://arcscrippts.esri.com/details.asp?dbid=11863> (last access: 6 June 2014) and now part of the Geomorphometry and Gradient Metrics toolbox, available at: <http://evansmurphy.wix.com/evansspatial#!arcgis-gradient-metrics-toolbox/crro> (last access: 6 June 2014), 2003.
151. Jain, A.K. *Statistical Pattern Recognition: A Review* / A.K. Jain, R. P. W. Duin, J. Mao // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* – 2000. – Vol. 22. – No 1. – P. 5–37.
152. Rao, M.S. *Comparative Analysis of Pattern Recognition Methods: An Overview* / M.S. Rao, B.E. Reddy // *Indian Journal of Computer Science and Engineering* – 2011. – Vol. 2. – No 3. – P. 385-390.
153. Fomin, V. Historical avenues of research in Russian forest typology: Ecological, phytocoenotic, genetic, and dynamic classifications/ V. Fomin, S. Zalesov, A. Popov, A. Mikhailovich // *Canadian Journal of Forest Research*. –2017. – No 7 (47). – P. 849–860.
154. Fomin V.V. Genetic Forest Typology as a Scientific and Methodological Basis for Environmental Studies and Forest Management // V.V. Fomin, N.S. Ivanova, A.P. Mikailovich // *6th World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium* (7-11

- September 2020) – Czech Republic, Prague: IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. V. 609 (1), 0102044.
155. Fomin, V.V. Trees in the Upper Treeline Ecotone in the Polar Urals: Centuries-Old Change and Spatial Patterns / V.V. Fomin, A.P. Mikailovich, S.G. Shiyatov // Mountain Research and Development – 2020. - № 40 (2). – P. R32-R40.
156. Fomin, V. Development of ideas within the framework of the genetic approach to the classification of forest types / V. Fomin, A. Mikhailovich, S. Zalesov, A. Popov, G. Terekhov // Baltic Forestry – 2021 – V. 27(1) - № 466. – P. 1-14.
157. 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 – V. 13 (3). – № 419 – P. 1-12.
158. Fortin, M.-J. Edge Detection Algorithms for Two-Dimensional Ecological Data / M.-J. Fortin // Ecology. – 1993. – No 4 (75). – P. 956–965.
159. Fortin, M.-J. Delineation of Ecological Boundaries: Comparison of Approaches and Significance Tests / M.-J. Fortin, P. Drapeau // Oikos. – 1995. – Vol. 72. – P. 323–332.
160. Fortin, M.-J. Issues related to the detection of boundaries / M.-J. Fortin, R. J. Olson, S. Ferson [et al.] // Landscape Ecology. – 2000. – Vol. 15. – P. 453–466.
161. Frolov, Y.S. Theoretical Aspects of the Cartographic Research Method / Y. S. Frolov // Soviet Geography. – 1978. –No 3 (19). – P. 151–160.
162. Gaire, N.P. Treeline dynamics with climate change at Central Nepal Himalaya / N. Gaire, M. Koirala, D. Bhujju [et al.] // Climate of the Past Discussions. – 2013. – No 5 (9). – P. 5941–5976.
163. Gartzia, M. Improving the Accuracy of Vegetation Classifications in Mountainous Areas / M. Gartzia, C. Alados, F. Pérez-Cabello [et al.] // Mountain Research and Development. – 2013. – No 1 (33). – P. 63–74.
164. Geman, S. Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images/ S. Geman, D. Geman // IEEE-PAMI. – 1984. – No 6. – P. 721–741.

165. Gonzalez, R.C. Digital image processing / R.C. Gonzalez, R.E. Richard, E. Woods.  
– Pearson, 2018. – 1168 p.
166. Gosz, J.R. Ecotone Hierarchies / J.R. Gosz // Ecological Applications. –1993. –No  
3 (3). – P. 369–376.
167. Greenwood, S. Consequences of Treeline Shifts for the Diversity and Function of  
High Altitude Ecosystems / S. Greenwood, A. S. Jump // Arctic, Antarctic, and  
Alpine Research. – 2014. – No 4 (46). – P. 829–840.
168. Grossman, D. Field methods for vegetation mapping. report to: United States  
Department of Interior, NBS / NPS Vegetation Mapping Program. The Nature  
Conservancy, Arlington, VA. on the Aravalli hills / D. Grossman, K. Goodin, X. Li  
[et al.] // Tropical Ecology. – 1994. – No 2 (43). – P. 325–335.
169. Guisan, A. Predictive habitat distribution models in ecology/ A. Guisan,  
N. E. Zimmermann // Ecological Modelling. – 2000. – No 135. – P. 147–186.
170. Hagedorn, F. Treeline advances along the Urals mountain range – driven by  
improved winter conditions? / F. Hagedorn, S. G. Shiyatov, V. S. Mazepa, [et al.] //  
Global Change Biology. 2014. – No 20. – P. 3530–3543.
171. Hall, F. C. Ground-Based Photographic Monitoring. / F. C. Hall // General  
Technical Report PNW-GRT-503 U.S. Department of Agriculture, Forest Service,  
Pacific Northwest Research Station – Portland, 2001. P. 1–40.
172. Harsch, M. Treeline form – a potential key to understanding treeline dynamics / M.  
Harsch, M. Bader// Global Ecology and Biogeography. – 2011. Vol. 20. – P. 582–  
596.
173. Hendrick, L.E. Using Repeat Landscape Photography to Assess Vegetation  
Changes in Rural Communities of the Southern Appalachian Mountains in Virginia,  
USA / L.E. Hendrick, C.A Copenheadver // Mountain Research and Development. –  
2009. – Vol. 29. – No 1. – P. 21–29.
174. Hoiem, D. Putting objects in perspective / D. Hoiem, A. A. Efros, M. Hebert //  
International Journal of Computer Vision. – 2008. – Vol. 80. – No 1. – P. 3–15.

175. Holtmeier, F.-K. Mountain Timberlines. Ecology, Patchiness, and Dynamics / F.-K. Holtmeier. – Dordrecht; Boston; London: Kluwer Academic Publishers, 2009. – 369 p.
176. Holtmeier, F.-K. Impact of wild herbivorous mammals and birds on the altitudinal and northern treeline ecotones / F.-K. Holtmeier // Landscape Online. – 2012. – Vol. 30. – P. 1–28.
177. Holtmeier, F.-K. Treelines – Approaches at Different / F.-K. Holtmeier, G. Broll // Sustainability. – 2017. – No 5 (9). – P. 808.
178. Hong, Sun-Kee. Ecotope mapping for landscape ecological assessment of habitat and ecosystem / Sun-Kee Hong, Sungwoo Kim, Ki-Hwan Cho [et al.] // Ecological Research. – 2004. – No 19. – P. 131–139.
179. Hufkens, K. Ecotones in vegetation ecology: Methodologies and definitions revisited / K. Hufkens, P. Scheunders, R. Ceulemans // Ecological Research. – 2009. – Vol. 24. – P. 977–986.
180. Hustich, I. The Boreal Limits of Conifers/ I. Hustich // Arctic. – 1953. – No 6. – P. 49–162.
181. Jain, A. K. Data clustering: a review / A. K. Jain, M. N. Murty, P. J. Flynn // ACM Comput Surveys. – 1999. – No. 31 – P. 264–323.
182. Jensen, J.R. Remote sensing of the environment: an earth resource perspective / J.R. Jensen. – Prentice-Hall, Inc.: Upper Saddle River, NJ., 2007. – 592 p.
183. Jobbagy, E.G Global controls of forest line elevation in the northern and southern / E. G. Jobbagy, R. B. Jackson // Global Ecology and Biogeography. – 2000. – No 3 (9). – P. 253–268.
184. 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. – No 3 (25). – P. 224–233.
185. Kharuk, V.I. Tree wave migration across an elevation gradient in the Altai Mountains, Siberia / V.I. Kharuk, S. Im, M. Dvinskaya, [et al.] // Journal of Mountain Science. – 2017. – No 3 (14). – P. 442–452.

186. Kharuk, V.I. Larch (*Larix dahurica* Turcz) growth response to climate change in the Siberian permafrost zone / V. I. Kharuk, K. J. Ranson, I. A. Petrov [et al.] // *Regional Environmental Change*. – 2019. – V. 1. – Issue 1. – P. 233–243.
187. Kirdyanov, A. V. 20th century tree-line advance and vegetation changes along an altitudinal transect in the Putorana Mountains, northern Siberia/ A. Kirdyanov, F. Hagedorn, A. Knorre [et al.] // *Boreas*. – 2012. – No 1 (41). – P. 56–67.
188. Klinge, M. Modeling forest lines and forest distribution patterns with remote-sensing data in a mountainous region of semiarid central Asia / M. Klinge, J. Böhrner, S. Erasmi // *Biogeoscience*. – 2015. – Vol. 12. – P. 2893–2905.
189. Körner, C. A Re-Assessment of High Elevation Treeline Positions and Their Explanation / C. Körner // *Oecologia*. – 1998. – No 115. – P. 445–459.
190. Körner, C. *Alpine Plant Life. Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems* / C. Körner. – Berlin, Heidelberg: Springer, 1999. – 345 p.
191. Krajick, K. Climate Change: All Downhill From Here? / K. Krajick // *Science*. – 2004. – No 5664 (303). – P. 1600–1602.
192. Kruse, S. Treeline dynamics in Siberia under changing climates as inferred from an individual-based model for *Larix* / S. Kruse, M. Wiczorek, F. Jeltsch [et al.] // *Ecological Modelling*. – 2016. – No 338. – P. 101–121.
193. Kullman, L. Structural Change in a Subalpine Birch Woodland in North Sweden During the Past Century/ L. Kullman // *Journal of Biogeography*. – 1991. – No 1 (18). – P. 53.
194. Kullman, L. 20th Century Climate Warming and Tree-limit Rise in the Southern Scandes of Sweden/ L. Kullman // *Ambio*. – 2001. – No 2 (30). – P. 72–80.
195. Kullman, L. 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.
196. Kullman, L. Recent reversal of Neoglacial climate cooling trend in the Swedish Scandes as evidenced by mountain birch tree-limit rise / L. Kullman // *Global and Planetary Change*. – 2003. – Vol. 36. – P. 77–88.

197. Lee, H. An assessment of fire-damaged forest using spatial analysis techniques / H. Lee, S. Limb, H. Paik // *Journal of Spatial Science*. – 2010. – Vol. 55. – No. 2. – P. 289–301.
198. Lenoir, J. Climate-related range shifts – a global multidimensional synthesis and new research directions / J. Lenoir, J.-C. Svenning // *Ecography*. – 2014. – No. 38. – P. 15–28.
199. Leonelli, G. Past surface instability of Miage debris-covered glacier tongue (Mont Blanc Massif, Italy): a decadal-scale tree-ring-based reconstruction / G. Leonelli, M. Pelfini // *Boreas*. – 2013. – No 3 (42). – P. 613–622.
200. Lotto, R. B. The effects of color on brightness / R. B. Lotto, D. Purves // *Nature neuroscience*. – 1999. – Vol. 2. – No 11. – P. 1010-1014.
201. Lotto, R.B. Mach bands as empirically derived associations / R. B. Lotto, S. M. Williams, D. Purves // *Neurobiology*. – 1999. – Vol. 96. – P. 5245–5250.
202. Mackey, B. G. A new digital elevation model of Ontario / B. G. Mackey, D. W. McKenney, C. A. Wicidifield [et al.] // *Nat Resour. Can., Canadian Forest Service. NODA/NFP Tech. Rep. TR-6*. – Ontario, Sault Ste. Marie, Ont 1994. 26 p. + appendix.
203. Maggini, R. Are Swiss birds tracking climate change? Detecting elevational shifts using response curve shapes / R. Maggini, A. Lehmann, M. Kéry [et al.] // *Ecological Modelling*. – 2010. – No. 222 – P. 21–32.
204. 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 [et al.] // *Journal of biogeography* – 2019. – V. 46 – No. 1 – P. 30-44.
205. Marignani, M. Planning restoration in a cultural landscape in Italy using an object-based approach and historical analysis / M. Marignani, D. Rocchini, D. Torri // *Landscape and Urban Planning*. – 2008. – No 84. – P. 28–37.
206. Masek, J. G. Stability of boreal forest stands during recent climate change: evidence from Landsat satellite imagery / J. G. Masek // *Journal of Biogeography*. – 2001. – Vol. 28. – P. 967 –976.

207. Matthews, J.A. The 'Little Ice Age': re-evaluation of an evolving concept / J.A. Matthews, K.R. Briffa // *Geogr. Ann.* – 2005. – No 87 A (1). – P. 17–36.
208. McLure, J. T. *Historic Landscape Reconstruction and Visualisation*, West Oxfordshire, England. / J. T. McLure, G. H. Griffiths. // *Transactions in GIS.* – 2002. – No. 6(1) – P. 69–78.
209. Mikhailovich, A. The Algorithm for Determining the Tree Line and Quantitative Assessment of Vertical and Horizontal Shifts of Plant Borders on the Polar Urals in the Second Half of the XX–Early XXI Century / A. Mikhailovich, V. Fomin // *European scientific conference of doctoral students: confer. materials, november 24, 2016 – Czech Republic, Brno: Mendel University in Brno, 2016.* – C. 32.
210. Mikhailovich, A. P. Spatio-temporal dynamics of the upper tree line in the polar Urals: centuries-old downward and upward shift / A.P. Mikhailovich, V.V. Fomin, S.G. Shiyatov // *EuroDendro 2019: confer. materials (september 9-13, 2019) – Czech Republic, Brno: Mendel University in Brno, 2019.* – P. 42.
211. Millar, C. Recruitment patterns and growth of high-elevation pines in response to climatic variability (1883–2013), in the western Great Basin, USA/ C. Millar, R. Westfall, D. Delany // *Canadian Journal of Forest Research.* – 2015. – No 45. – P. 1299–1312.
212. Moiseev, P. A. Vegetation Dynamics at treeline ecotone in the Ural Highlands, Russia / P. A. Moiseev, S. G. Shiyatov // *Ecological Studies.* – 2003. – Vol. 167. – P. 423–435.
213. Niederost, J. Image Analysis for the History Cartography: Drawing Conclusions from the evaluation of PPyffer's Relief / J. Niederost // *Geo-Imagery Bridging Continents XXth ISPRS Congress 12-23 July 2004 Istanbul, Turkey.* – Istanbul, 2004. – P. 389–394.
214. Puschmann, O. Documenting Landscape Change Through Fixed Angle Photography / O. Puschmann W. Dramstad // *Proceedings from NIJOS/OECD Expert Meeting on Agricultural Landscape Indicators in Oslo, Norway October 7–9. Oslo, 2002.* – P. 258–268.

215. Puzachenko, Y. Biogeocoenosis as an Elementary Unit of Biogeochemical Work in the Biosphere / Y. Puzachenko // Encyclopedia of Ecology / Editors S. E. Jorgensen, B. D. Fath. – Elsevier. – 2008. – P. 396–402.
216. Ray, D. Ecological Site Classification – supporting decisions from the stand to the landscape scale / D. Ray, A. Broome // Forest Research Annual Report 2001–2002. HMSO. London. – 2003. – P. 40 – 49.
217. Rich P. M. Topoclimatic habitat models / P. M. Rich, P. Fu // 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs. Banff, Alberta, Canada, September 2 – 8, 2000. – P. 1 – 14.
218. Ryzhkova, V. A GIS-based mapping and estimation the current forest landscape state and dynamics/ V. Ryzhkova, I. Danilova, M. Korets // Journal of Landscape Ecology. – 2011. – Vol. 4. – No. 1. – P. 42 – 54.
219. Schickhoff, U. Do Himalayan treelines respond to recent climate change? An evaluation of sensitivity indicators/ U. Schickhoff, M. Bobrowski, J. Böhner // Earth System Dynamics. – 2015. – № 1 (6). – P. 245–265.
220. Shalaumova, Yu. V. Spatiotemporal Dynamics of the Urals' Climate in the Second Half of the 20th Century/ Yu. V. Shalaumova, V. V. Fomin, D. S. Kapralov // Russian Meteorology and Hydrology. – 2010. – Vol. 35. – No. 2 – P. 107–114.
221. Shiyatov, S.G. The upper timberline dynamics during the last 1100 years in the Polar Ural Mountains / S.G. Shiyatov // Oscillations of the alpine and polar tree limits in the Holocene (ed. by Burkhard Frenzel. Co-ed. by Matti Eronen and Birgit Glaser). – Gustav Fischer Verlag: Stuttgart, Jena. – New York, 1993. – P. 195–203.
222. Shiyatov, S. G. Rates of change in the upper treeline ecotone in the Polar Ural Mountains. / S. G. Shiyatov // Pages News. – 2003. – Vol. 11. – P. 8–10.
223. Shugart, N Detection of vegetation change using reconnaissance imagery / H. Shugart, N. French, E. Kasischke [et al.] // Global Change Biology. – 2001. – Vol. 7. – P. 247–252.

224. Smith, W. Another Perspective on Altitudinal Limits of Alpine Treelines / W. Smith, M. J Germino, T. Hancock [et al.] // *Tree physiology*. – 2003. – P. 1101–1112
225. Southworth, J. Land cover change and landscape fragmentation—comparing the utility of continuous and discrete analyses for a western Honduras region *Agriculture* / J. Southworth, D. Munroe, H. Nagendra // *Ecosystems and Environment*. – 2004. – No.101. – P. 185–205.
226. Szeicz, J.M. Recent White Spruce Dynamics at the Subarctic Alpine Treeline of North-Western Canada/ J.M. Szeicz, G.M. Macdonald // *The Journal of Ecology*. – 1995. – No 5 (83). – P. 873–885.
227. Villa, F. Modelling with knowledge: A review of emerging semantic approaches to environmental modelling / F. Villa, I. Athanasiadis, A.-E. Rizzoli // *Environmental Modelling and Software*. – 2009. – P. 577–587.
228. Walstra, J. Time for Change – Quantifying Landslide Evolution Using Historical Aerial Photographs and Modern Photogrammetric / J. Walstra. J.H. Chandler, N. Dixon [et al.] // *Geo-Imagery Bridging Continents XXth ISPRS Congress 12-23 July 2004 Istanbul, Turkey*. – Istanbul 2004. – P. 475–480.
229. Walter, G.-R. Ecological responses to recent climate change / G.-R. Walter, E. Post, P. Convey // *Nature*. – 2002. – Vol. 416. – P. 389–395.
230. Wang, J. Z. Learning-Based Linguistic Indexing of Pictures with 2-D MHMMs / J. Z. Wang, J Li // *Proc. ACM Multimedia*. – 2002. – P. 436–445.
231. Webb, R. H. Repeat photography: methods and applications in the natural sciences / R.H. Webb, D.E. Boyer, R. M. Turner. – Washington, D.C: Island Press, 2010. – 337 p.
232. Wiegand, T. Abrupt population changes in treeline ecotones along smooth gradients / T. Wiegand, J. Camarero, N. Rüger [et. al] // *Journal of Ecology*. – 2006. – Vol. 94. – P. 880–892.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

БПЛА – беспилотный летательный аппарат

ГИС – геоинформационная система

ПП – пробная площадь

МНФ – метод наземного фотомониторинга

ТЕР – территориальная единица растительности

ЦММ – цифровая модель местности

ЦМР – цифровая модель рельефа

ЭВГДР – экотон верхней границы древесной растительности

СТІ – compound topographic index

**ПРИЛОЖЕНИЕ А.**  
**ФРАГМЕНТ АЭРОСНИМКА**  
(обязательное)

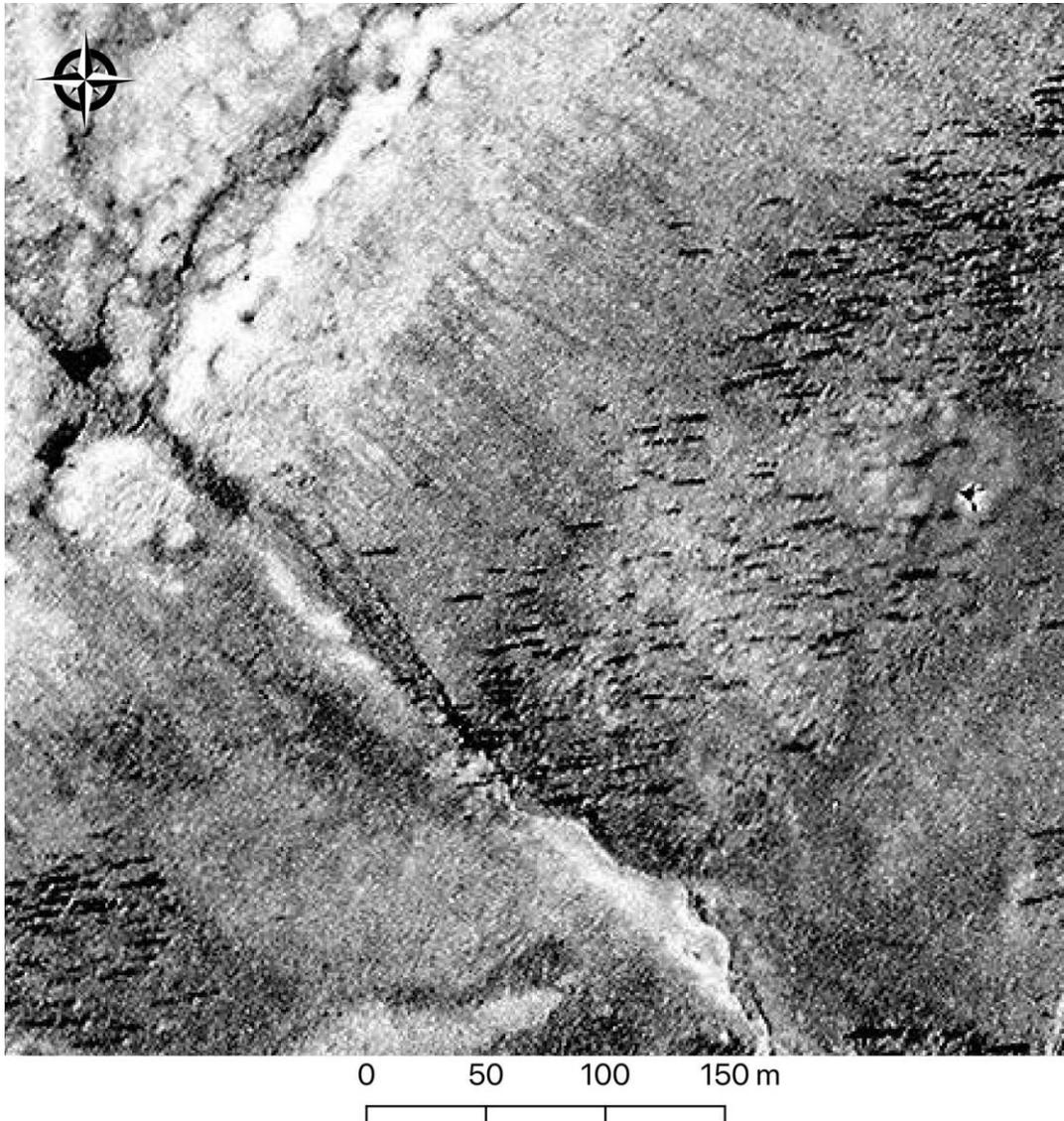


Рисунок А.1 – Фрагмент аэроснимка 1962 года участка района исследований

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б.**  
**ФРАГМЕНТ КОСМОСНИМКА**  
(обязательное)

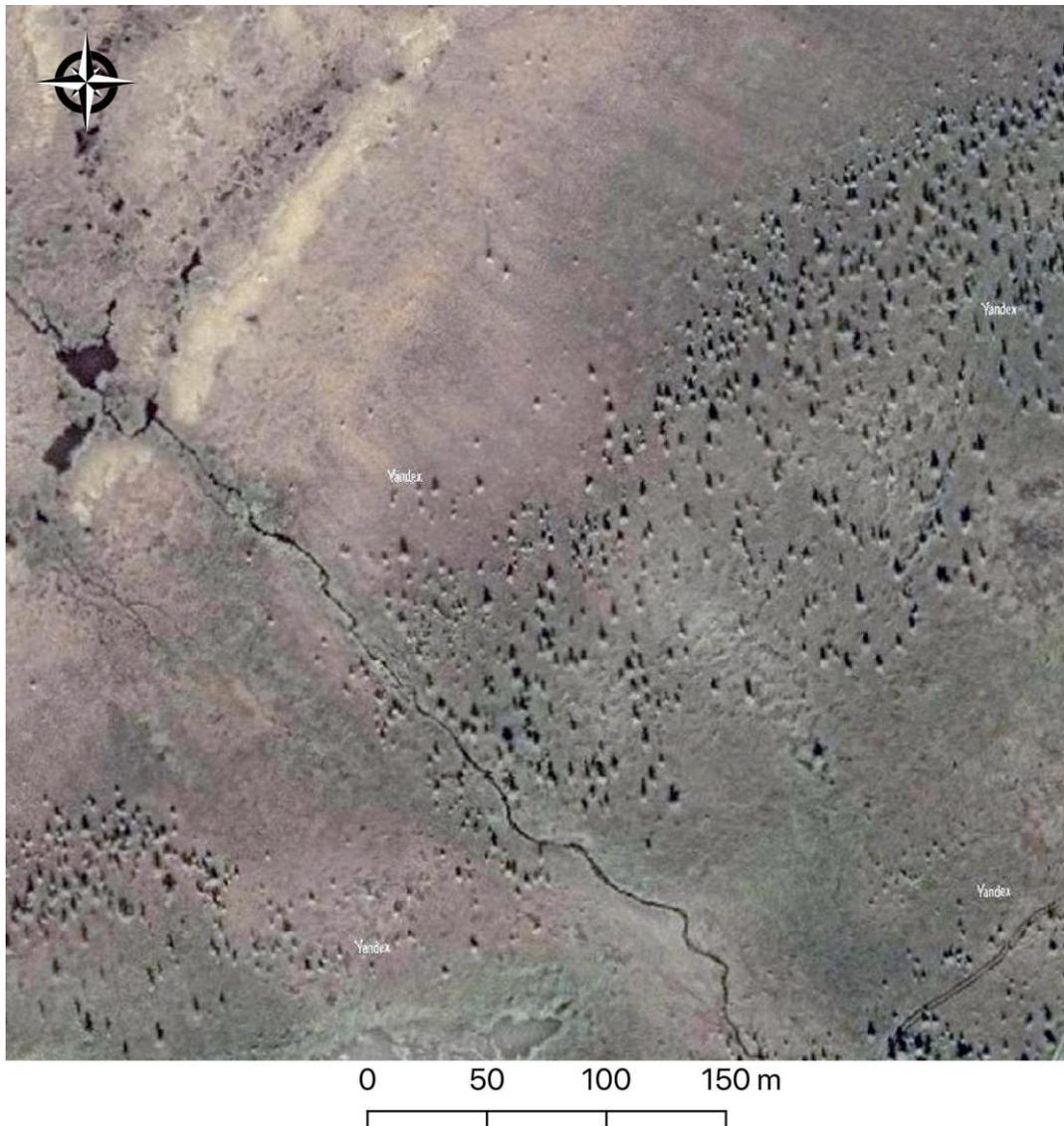


Рисунок Б.1 – Фрагмент космического снимка 2015 года участка района исследований

**ПРИЛОЖЕНИЕ В.**  
**КАРТОСХЕМЫ РАЗМЕЩЕНИЯ ЛИСТВЕННИЦЫ СИБИРСКОЙ НА**  
**ПРОБНЫХ ПЛОЩАДЯХ И ГИСТОГРАММЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ**  
**ОТДЕЛЬНЫХ ТАКСАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**  
 (обязательное)

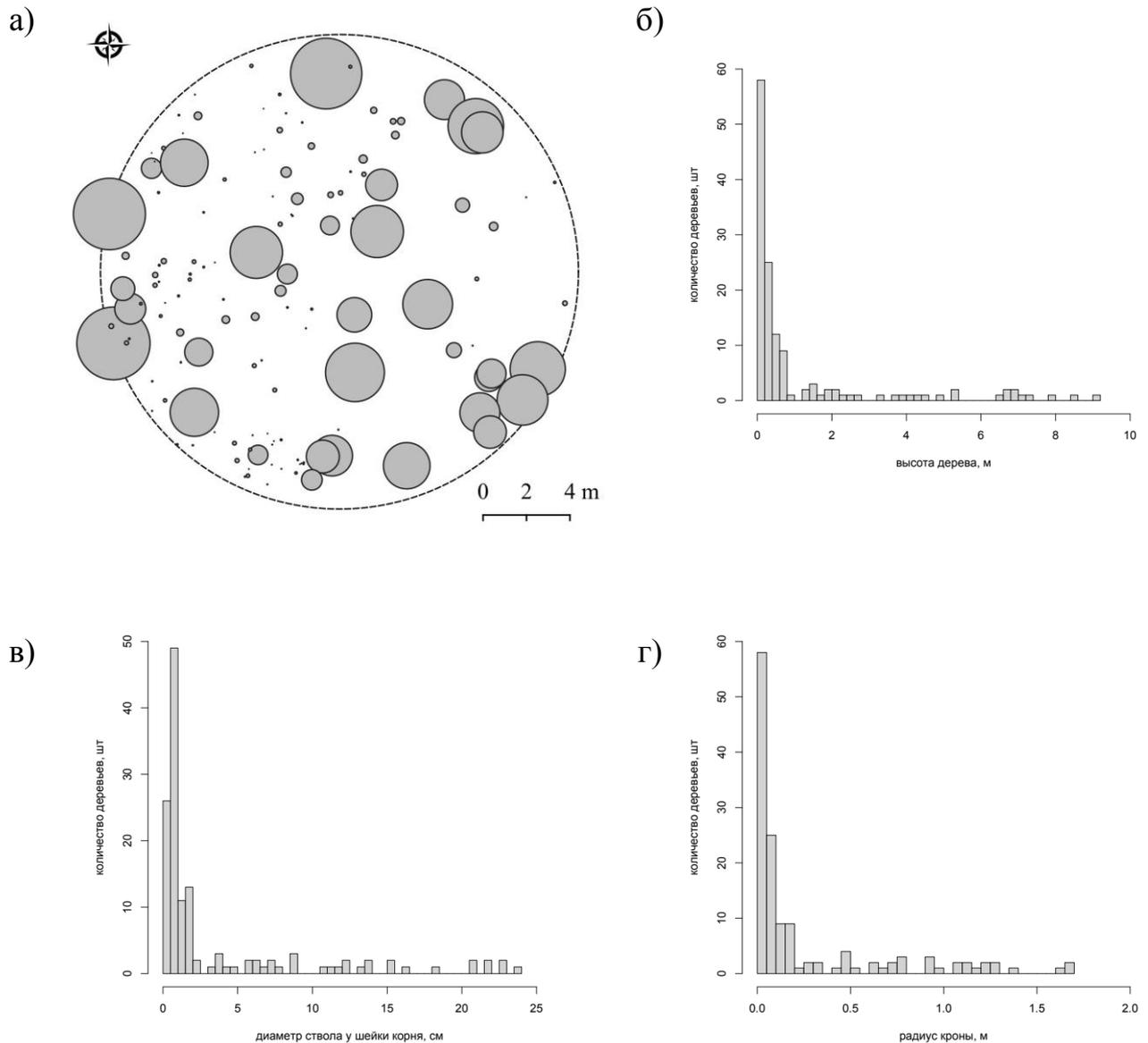


Рисунок В.1 – Картограмма размещения лиственницы сибирской на пробной площади № 1 (а), гистограмма распределения значений высоты ствола (б), значений диаметра ствола у шейки корня (в) и среднего радиуса кроны (г). Количество деревьев — 137 шт., сомкнутость крон — 24,8 %

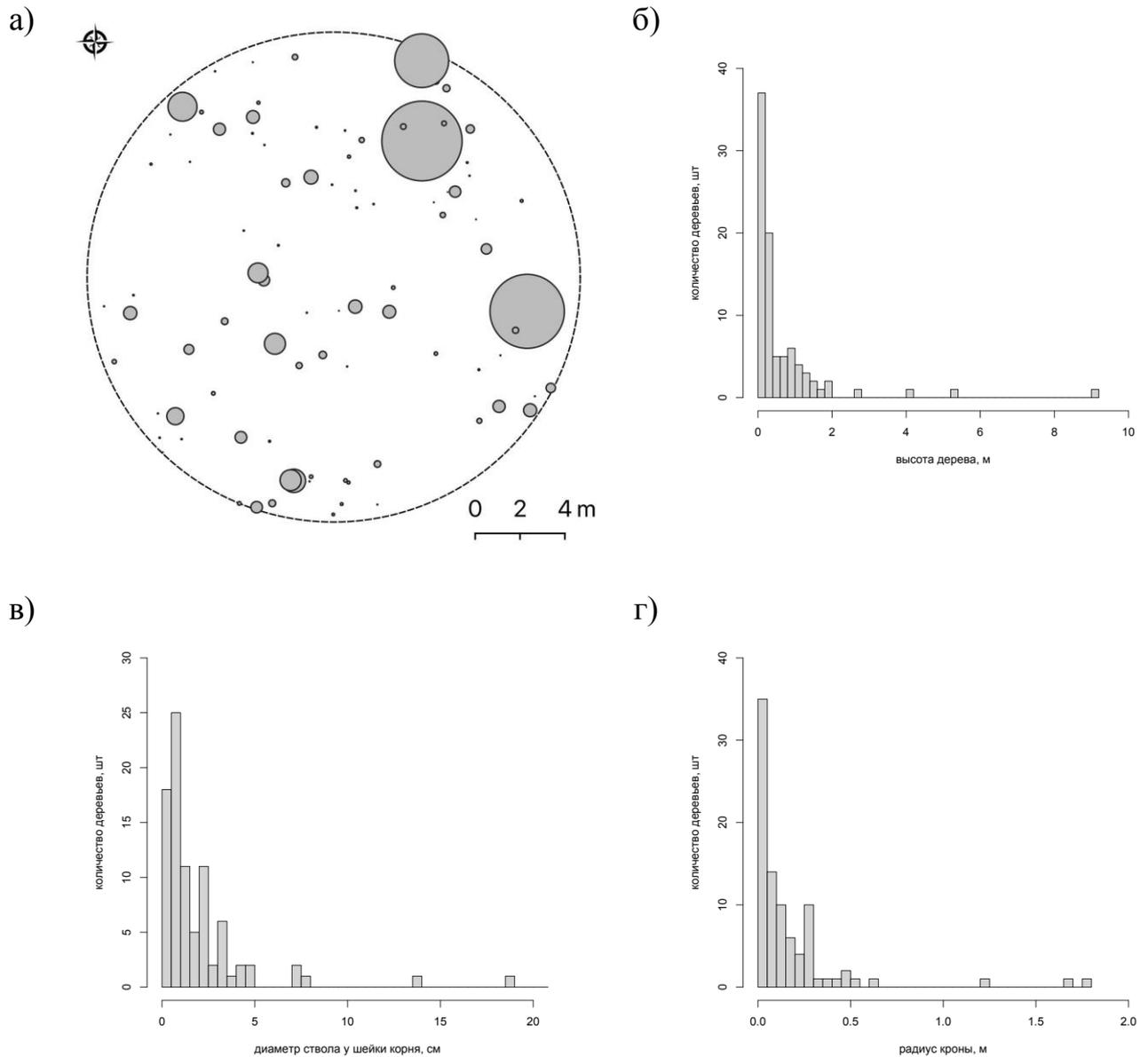


Рисунок В.2 – Картограмма размещения лиственницы сибирской на пробной площади № 2 (а), гистограмма распределения значений высоты ствола (б), значений диаметра ствола у шейки корня (в) и среднего радиуса кроны (г). Количество деревьев — 89 шт., сомкнутость крон — 8,4 %

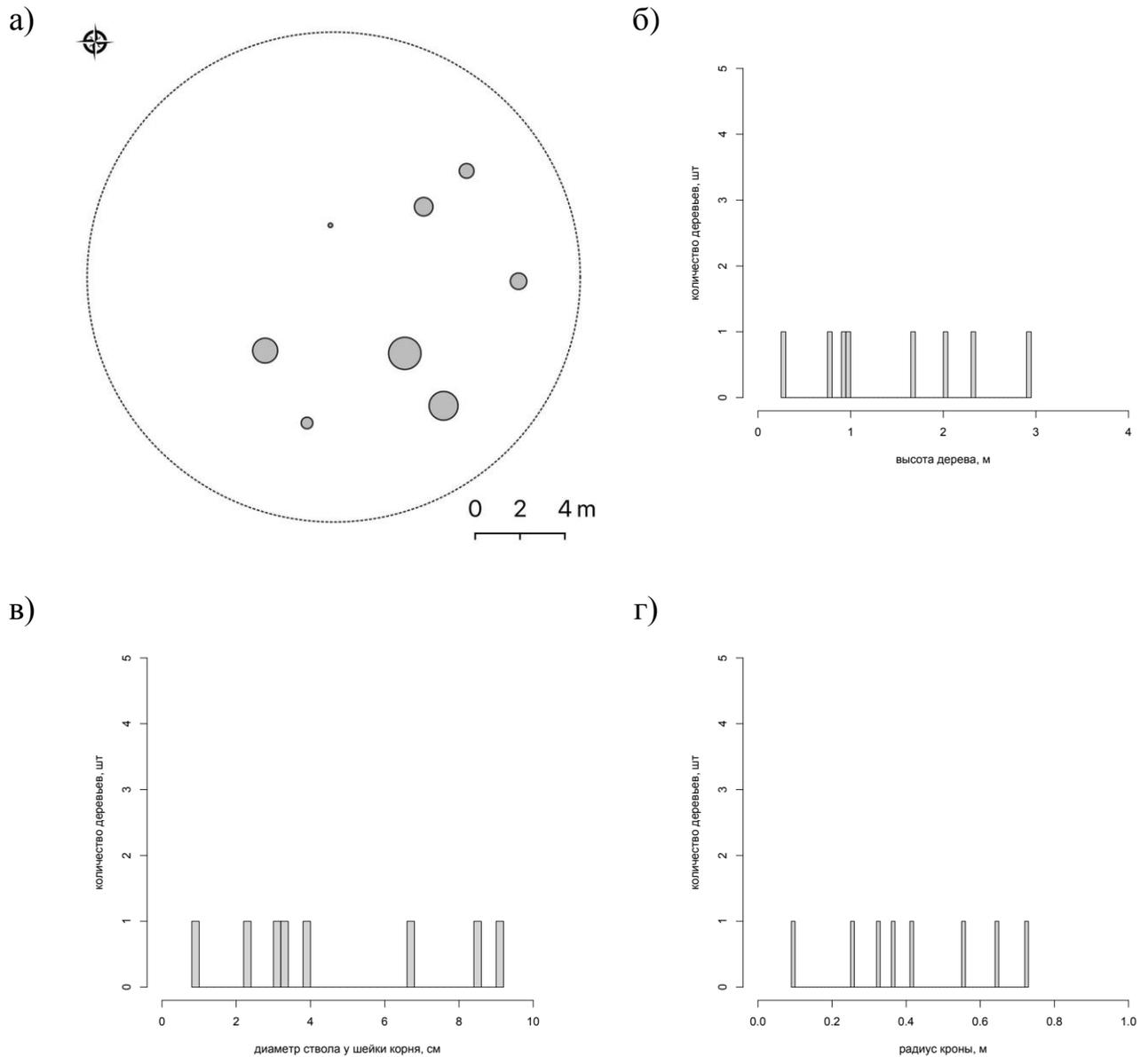


Рисунок В.3 – Картосхема размещения лиственницы сибирской на пробной площади № 3 (а), гистограмма распределения значений высоты ствола (б), значений диаметра ствола у шейки корня (в) и среднего радиуса кроны (г). Количество деревьев — 8 шт., сомкнутость крон — 1,4 %

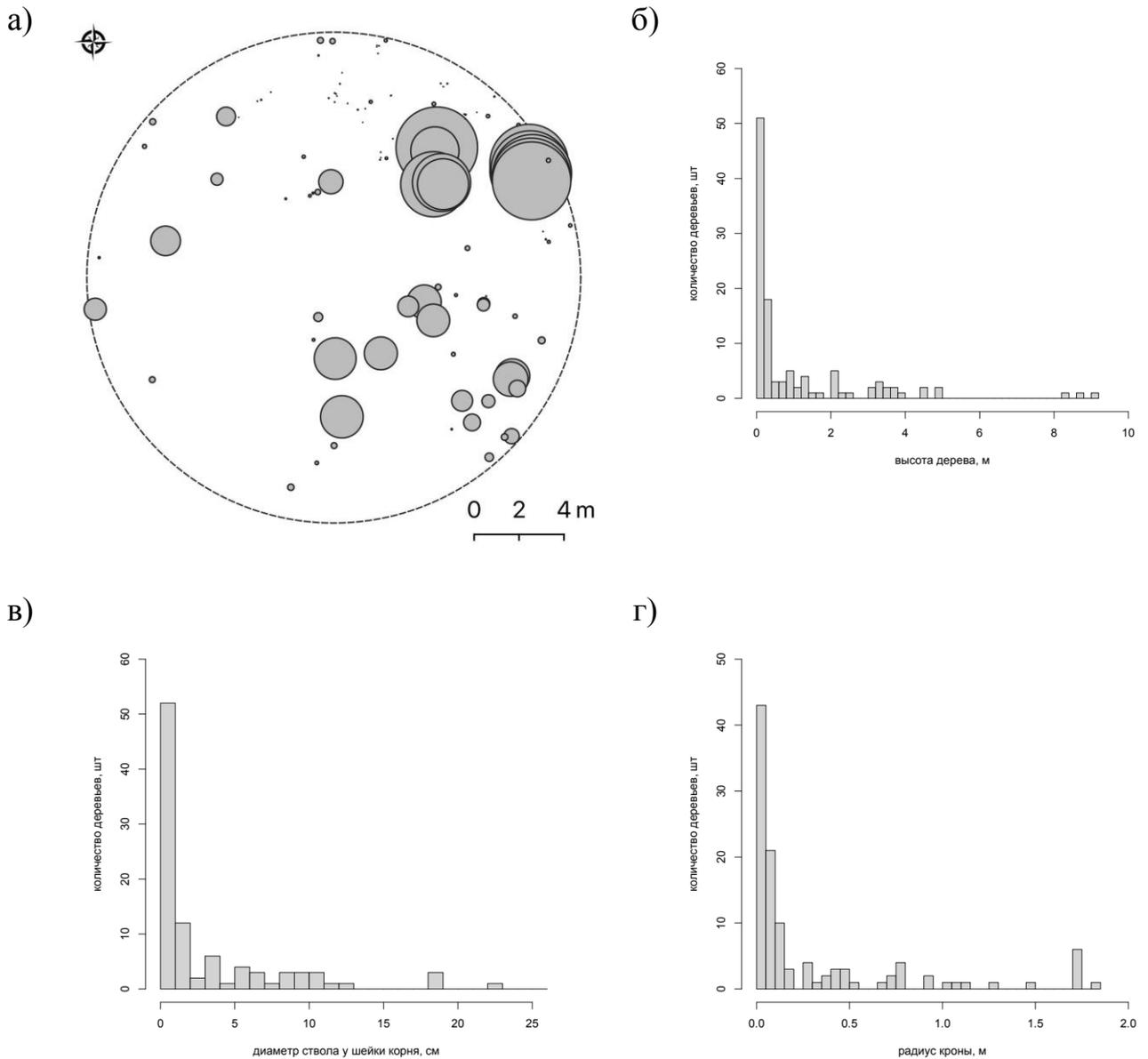


Рисунок В.4 – Картосхема размещения лиственницы сибирской на пробной площади № 4 (а), гистограмма распределения значений высоты ствола (б), значений диаметра ствола у шейки корня (в) и среднего радиуса кроны (г). Количество деревьев — 112 шт., сомкнутость крон — 12,2 %

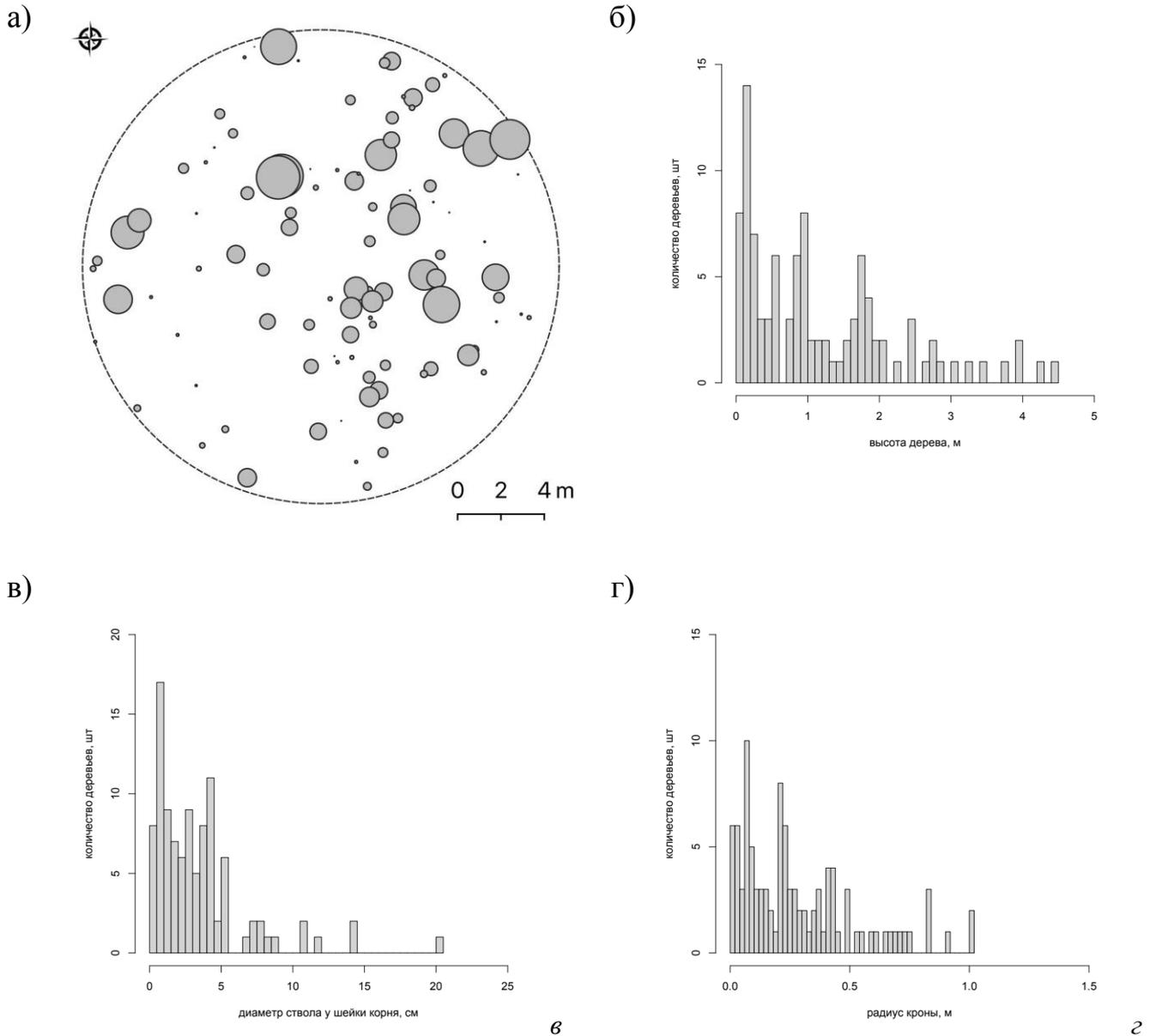


Рисунок В.5 – Картограмма размещения лиственницы сибирской на пробной площади номер 5 (а), гистограмма распределения значений высоты ствола (б), значений диаметра ствола у шейки корня (в) и среднего радиуса кроны (г). Количество деревьев — 101 шт., сомкнутость крон — 10,4 %

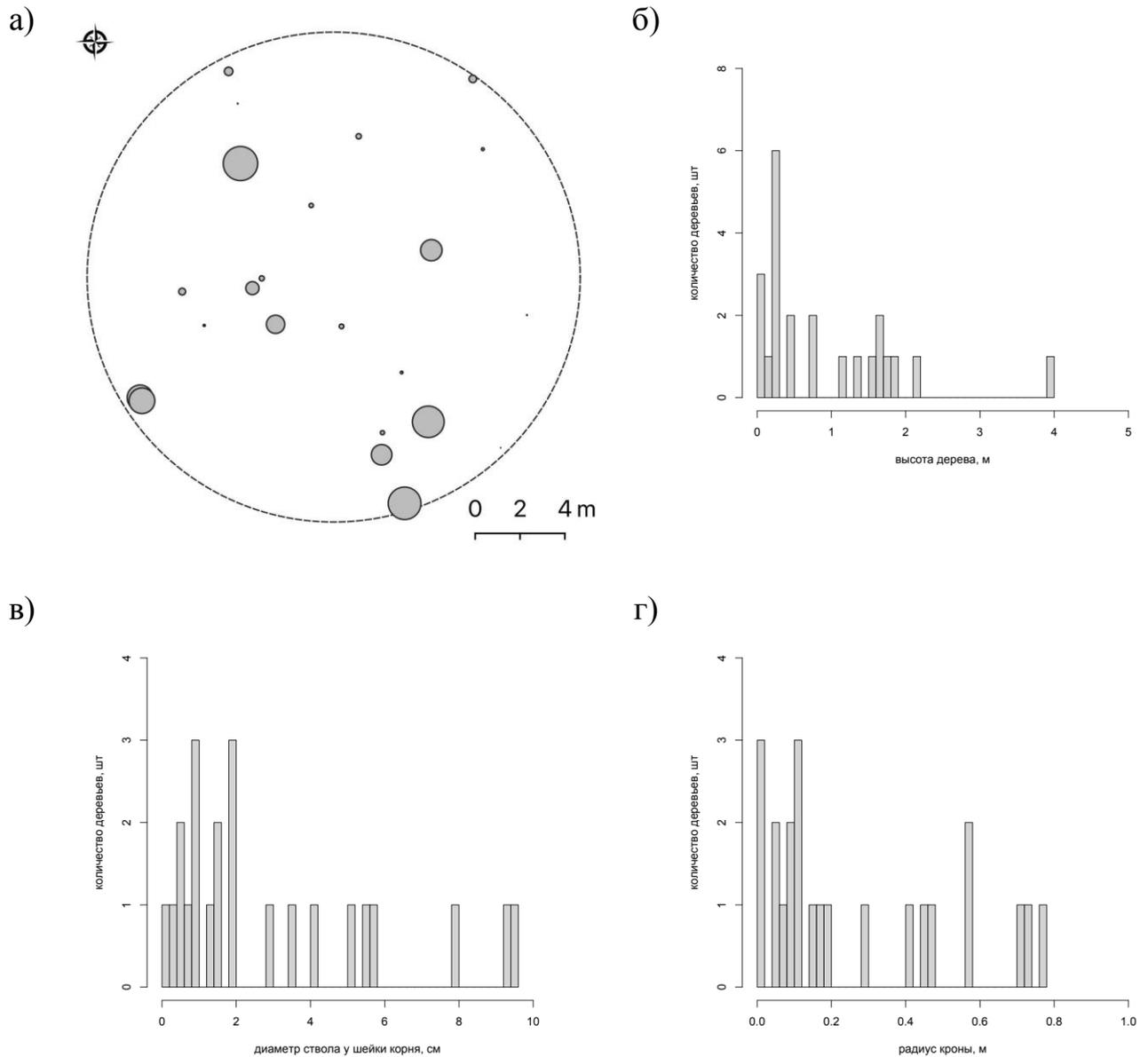


Рисунок В.6 – Картосхема размещения лиственницы сибирской на пробной площади № 6 (а), гистограмма распределения значений высоты ствола (б), значений диаметра ствола у шейки корня (в) и среднего радиуса кроны (г). Количество деревьев — 23 шт., сомкнутость крон — 2,4 %

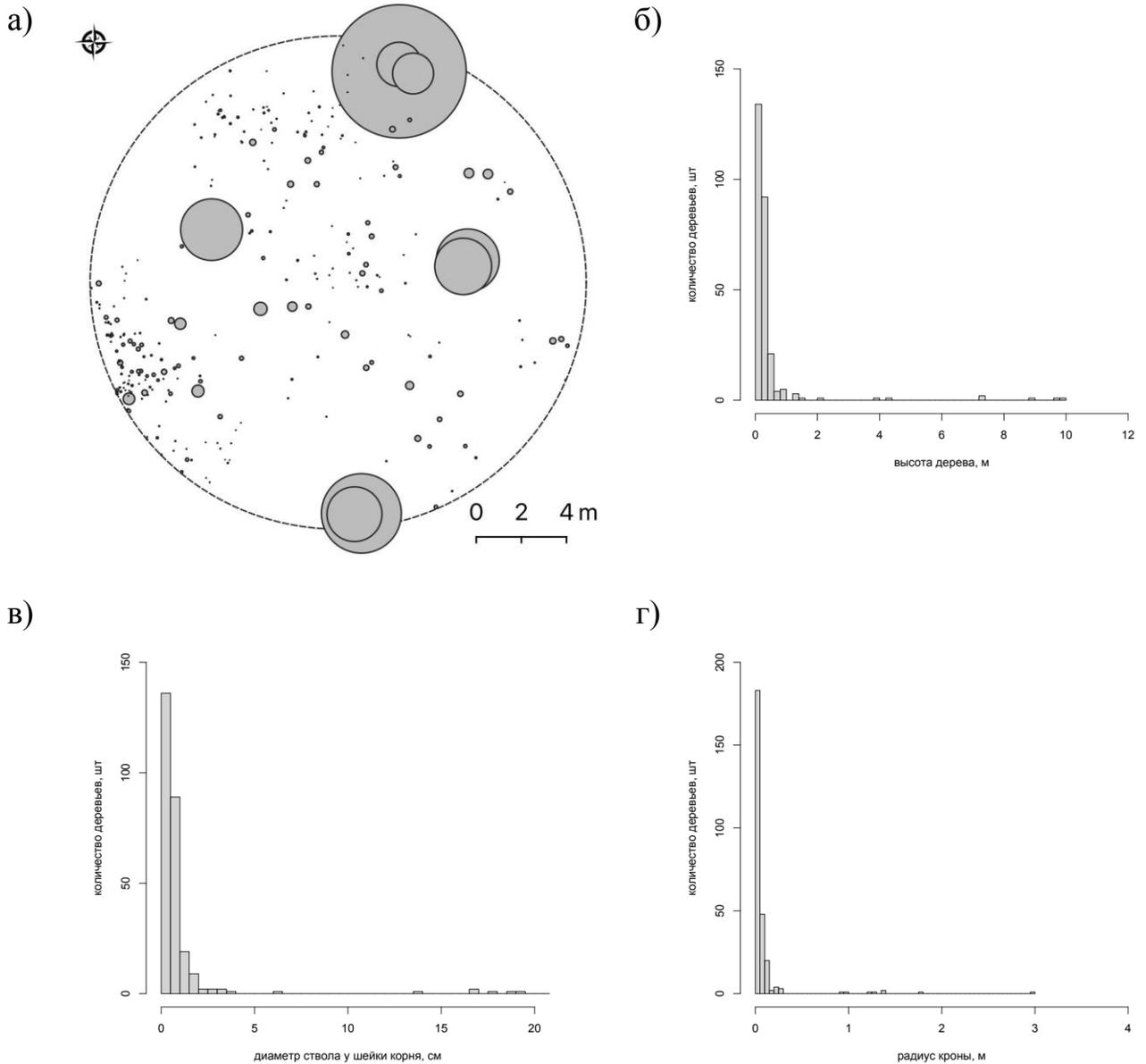


Рисунок В.7 – Картосхема размещения лиственницы сибирской на пробной площади № 7 (а), гистограмма распределения значений высоты ствола (б), значений диаметра ствола у шейки корня (в) и среднего радиуса кроны (г). Количество деревьев — 268 шт., сомкнутость крон — 14,2 %

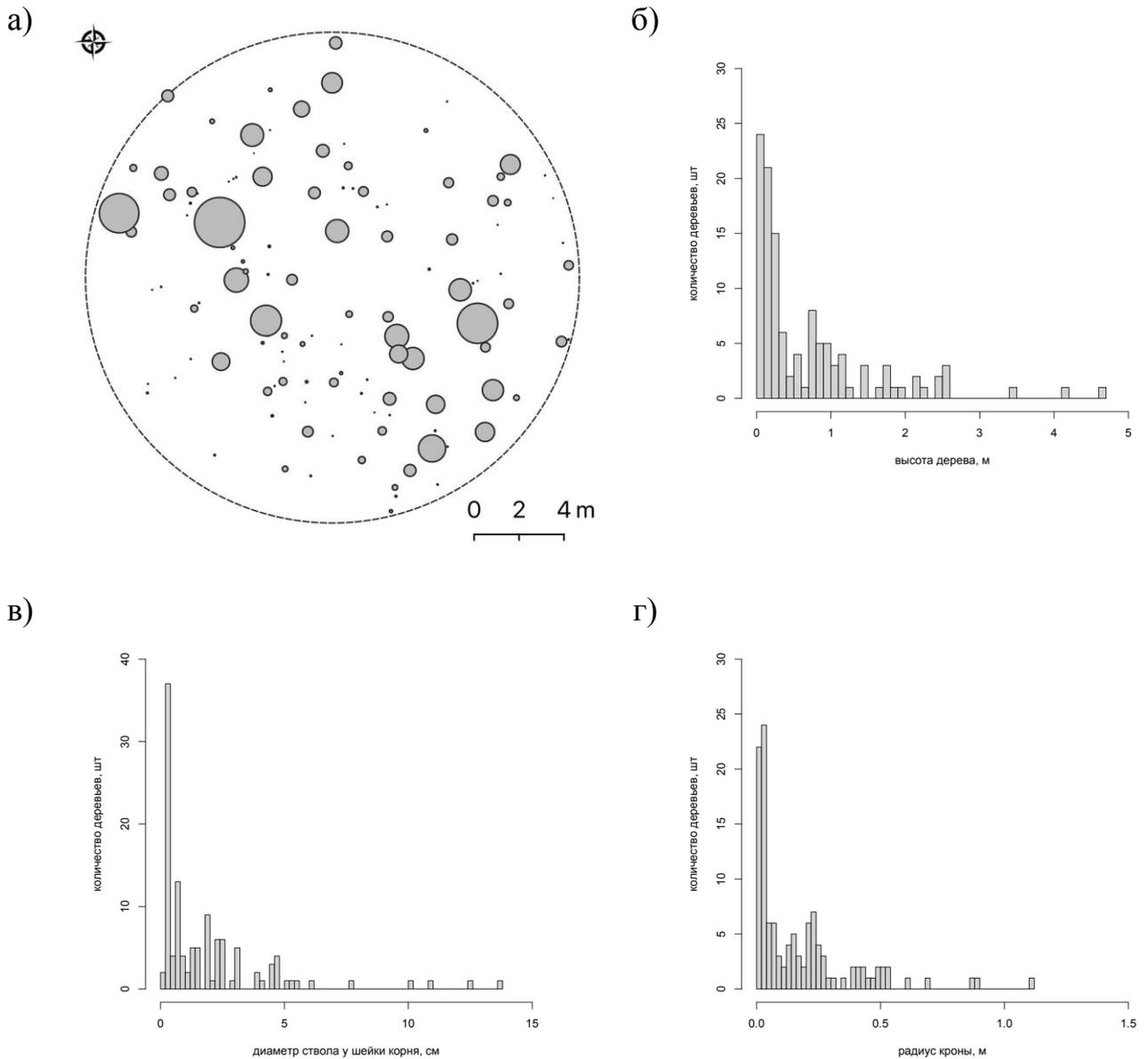


Рисунок В.8 – Картосхема размещения лиственницы сибирской на пробной площади номер 8 (а), гистограмма распределения значений высоты ствола (б), значений диаметра ствола у шейки корня (в) и среднего радиуса кроны (г). Количество деревьев — 119 шт., сомкнутость крон — 7,1 %

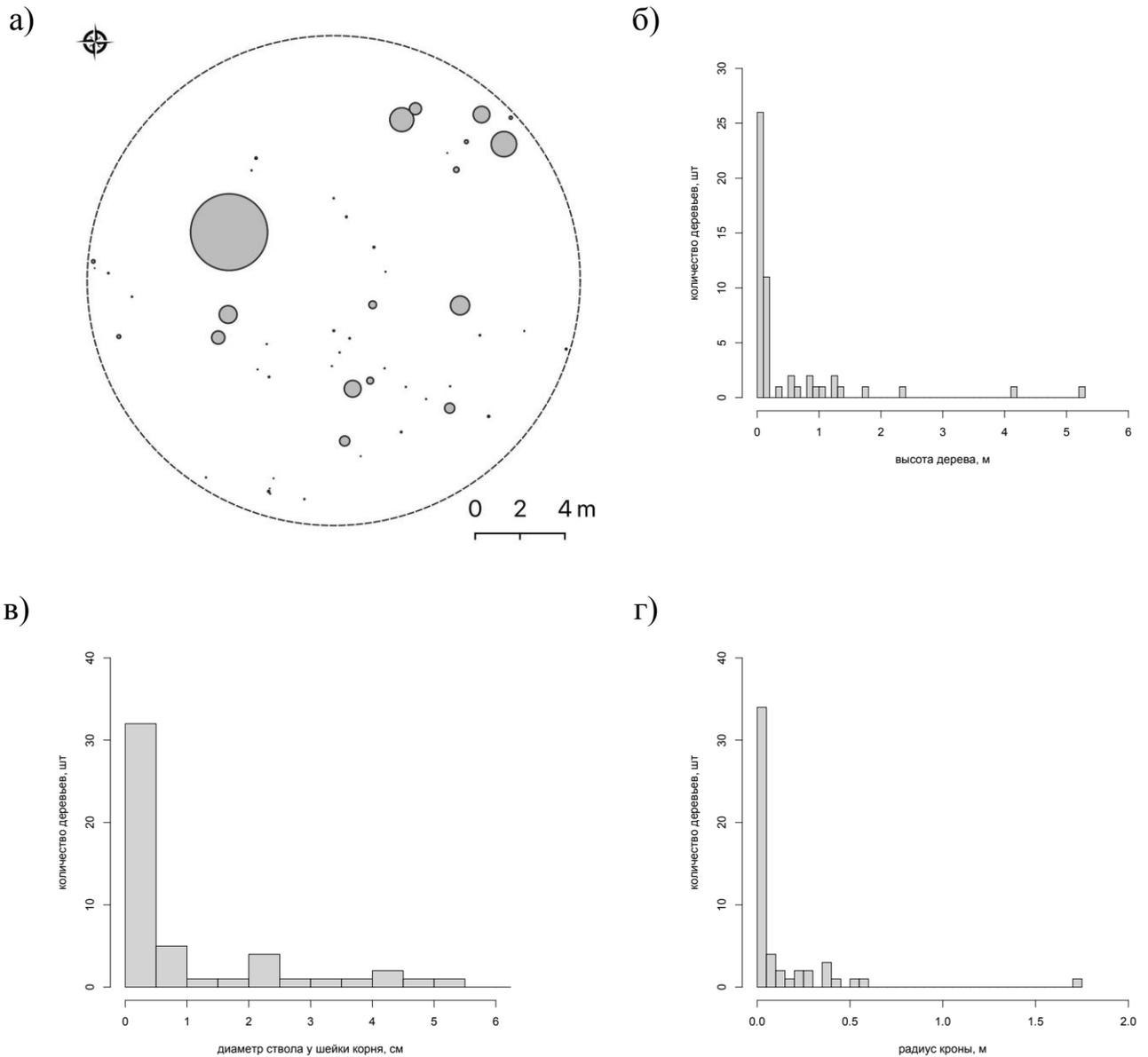


Рисунок В.9 – Картосхема размещения лиственницы сибирской на пробной площади номер 9 (а), гистограмма распределения значений высоты ствола (б), значений диаметра ствола у шейки корня (в) и среднего радиуса кроны (г). Количество деревьев — 52 шт., сомкнутость крон — 3,8 %

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г.  
ИЛЛЮСТРАЦИИ ВЛИЯНИЯ ВЕДУЩИХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ  
НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДРЕВЕСНОЙ  
РАСТИТЕЛЬНОСТИ, МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И  
ВОЗОБНОВЛЕНИЕ ЛИСТВЕННИЦЫ СИБИРСКОЙ В РАЙОНЕ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
(обязательное)**

а)



б)



Рисунок Г.1 - Ландшафтные фотографии, иллюстрирующие появление молодого поколения лиственницы сибирской в нижней и верхней частях юго-восточного макросклона горного массива Рай-Из. Снимки сделаны С.Г. Шиятовым 08 августа 1996 г (а) и В.В. Фоминым 01 августа 2015 года (б).

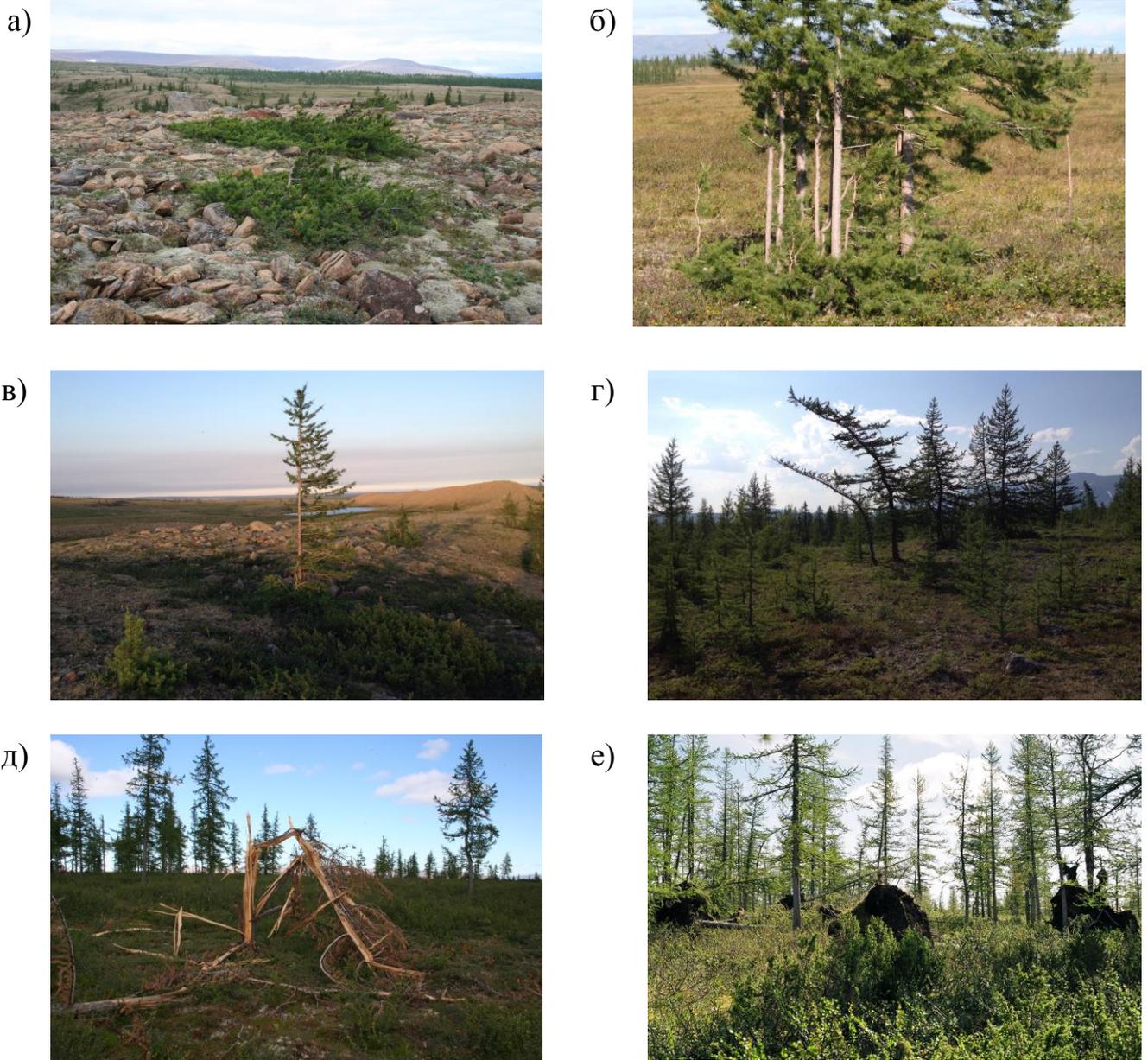


Рисунок Г.2 Фотографии, иллюстрирующие феномены, обусловленные влиянием ветра и усилением циклонических явлений: а – лиственница стланиковой формы, произрастающая ветробойном местообитании на вершине моренного вала; б – снеговая корразия стволов лиственницы многоствольной формы; в – флагообразная форма кроны лиственницы сибирской, образованная в результате воздействия ветра и снега в зимний период (снеговая корразия); г – искривление стволов деревьев при многолетнем ветровом воздействии; д — последствия удара молнии в лиственницу; е — деревья, поваленные ветром. Снимки (а), (б), (е) сделаны С.Г. Шиятовым, (в) и (г) - А.П. Михайлович, (д) В.В. Фоминым

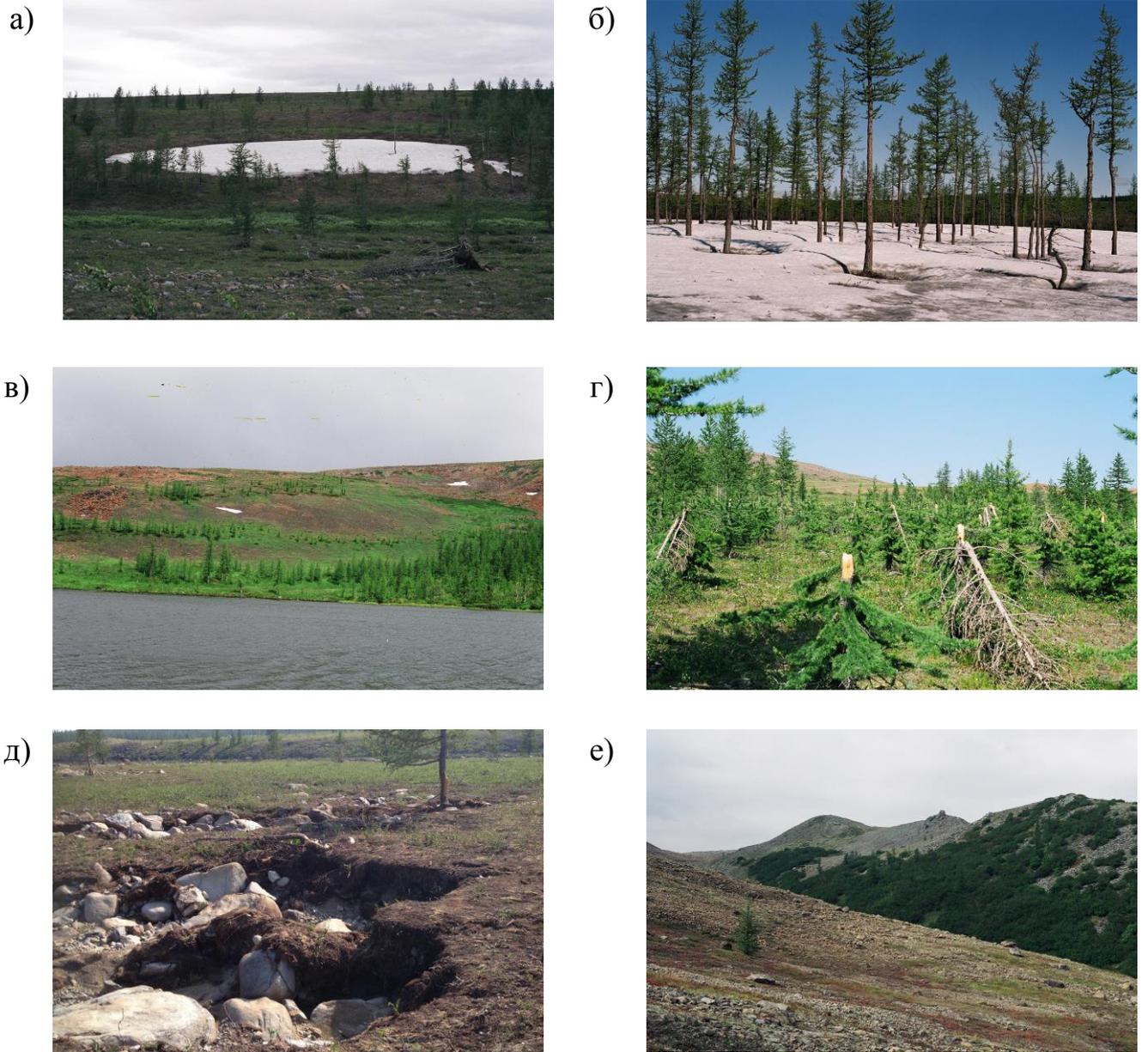


Рисунок Г.3 Влияние снега на древесную растительность: *а* — формирование мощных сугробов снега задерживает начало вегетации; *б* — начало вегетации на участках, покрытых снегом; *в* — формирование беслесных полос в результате отложения сугробов снега мощностью до 6 м; *г* — воздействие снеговой лавины. Повреждение почвенного покрова и деревьев при ледоставе (*д*). Влияние химического состава горных пород на видовой состав древесной растительности: *е* – ольховник на кристаллических сланцах (на дальнем плане), на ближнем плане лиственница сибирская на перидотитах. Снимки (*а*), (*б*), (*в*), (*г*), (*е*) сделаны С.Г. Шиятовым (*д*) - А.П. Михайлович