

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»  
(СГУГиТ)

На правах рукописи

Лобищева Инна Ивановна



Усовершенствование технологии дешифрирования растительных сообществ  
особо охраняемых природных территорий по космическим снимкам  
на примере острова Сахалин

1.6.19. Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук, профессор  
Карпик Александр Петрович

Новосибирск – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1 АНАЛИЗ ЗАДАЧ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ .....	10
1.1 Особо охраняемые природные территории острова Сахалин, их назначение и проблемы охраны.....	10
1.2 Современное состояние космических систем дистанционного зондирования Земли, используемых для исследования растительного покрова .....	13
1.3 Системный анализ существующих технологий и методов определения растительных сообществ .....	21
Выводы по разделу 1.....	30
2 УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЕШИФРИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ.....	32
2.1 Постановка задачи усовершенствования технологии автоматизированного дешифрирования растительных сообществ .....	32
2.2 Разработка принципиальной технологической схемы и технологии автоматизированного дешифрирования растительных сообществ .....	33
2.2.1 Подсистема исходных данных .....	34
2.2.2 Подсистема первичной обработки исходных данных .....	39
2.2.3 Подсистема дешифрирования объектов особо охраняемых природных территорий .....	41
2.2.4 Подсистема картографического обеспечения .....	52
2.2.5 Подсистема геоинформационного обеспечения .....	53
2.2.6 Подсистема полевых данных .....	58
Выводы по разделу 2.....	62

3 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЕШИФРИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ.....	64
3.1 Характеристика растительных сообществ особо охраняемых природных территорий.....	64
3.2 Классификатор дешифровочных признаков со спектральными характеристиками растительных сообществ заказника «Долинский».....	75
3.3. Оценка геоэкологического состояния исследуемых территорий .....	79
3.4 Зонирование территории заказника «Долинский» по геоэкологическому состоянию .....	82
Выводы по разделу 3.....	85
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	86
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	88
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) АКТ О ВНЕДРЕНИИ НАУЧНЫХ РАБОТ В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ.....	108

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность темы исследования.* Политика Российской Федерации в сфере экологического развития нацелена на решение социально-экономических задач, обеспечивающих экологически ориентированный рост экономики, сохранение благоприятной окружающей среды, биологического разнообразия и природных ресурсов для удовлетворения потребностей нынешнего и будущих поколений, реализации права каждого человека на благоприятную окружающую среду, укрепления правопорядка в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности [78, 85].

Региональная политика Сахалинской области строится на этих же общегосударственных принципах. Стратегия социально-экономического развития Сахалинской области на период до 2035 г., принятая в 2019 г., определяет стратегическую цель социально-экономического развития региона – создание условий для интенсивного экономического роста и повышения уровня и качества жизни в регионе [83].

Областными управленческими структурами разработана и претворяется в жизнь Государственная программа «Развитие лесного комплекса, охотничьего хозяйства и особо охраняемых природных территорий Сахалинской области (ООПТ)», направленная на сохранение лесов и ООПТ регионального значения, обеспечение сохранения их современного состояния и оценки объектов охраны, а также создание условий для развития рекреации и туризма [79].

Для реализации Программы необходимо проведение научно-исследовательских работ с целью качественной оценки состояния лесной растительности, выполнения наземной таксации, которые предусматривают создание системы анализа состояния лесных ресурсов территории для их учета в длительной перспективе. Для успешного функционирования интерактивной модели требуется постоянное обновление информации, в том числе данных, получаемых при помощи средств аэрокосмического базирования.

Данные космических съемочных систем получили в настоящее время широкое распространение. Качество космических снимков постоянно совершенствуется: повышается их пространственное и радиометрическое разрешение, увеличивается охват территории, а также расширяются возможности регистрации спектральных характеристик объектов в различных диапазонах электромагнитного спектра, что позволяет использовать космические снимки для получения сведений о состоянии растительности в ООПТ.

Разработка технологий оперативной оценки состояния окружающей среды позволяет решать поставленные задачи. В этом свете проводимые исследования весьма актуальны.

*Степень разработанности темы исследования.* Работы многих исследователей посвящены разработке технологий дешифрирования и оценки объектов окружающей среды по данным аэрокосмических съемок Земли. Это научно-технические публикации известных российских и зарубежных ученых: Барталева С. А., Бондура В. Г., Гука А. П., Зверева А. Т., Зятьковой Л. К., Карпика А. П., Книжникова Ю. Ф., Комиссарова А. В., Кринова Е. Л., Кронберга П., Лисицкого Д. В., Мазурова Б. Т., Малинникова В. А., Мелкого В. А., Николаевой О. Н., Пяткина В. П., Савиных В. П., Сизова А. П., Трубиной Л. К., Уставича Г. А., Хлебниковой Т. А., Хорошилова В. С., Шаповалова Д. А., Amani M., Komárek J., Lu B., Moore N., Teltscher K., Turner W., Wang K. и др. [3, 12, 14, 23, 24, 30, 32–35, 37, 39, 45, 46, 48, 50–52, 58, 61, 63–66, 68–71, 73, 94–96, 107, 110, 114, 126, 129, 134–133, 140, 142]. Работы перечисленных авторов внесли значительный вклад в становление и развитие методик и технологий дешифрирования космических снимков, отображающих состав и состояние объектов окружающей среды.

Правильная интерпретация спектральных характеристик растительных сообществ опирается на четкое представление сущности анализируемых объектов, которые представлены в работах исследователей физических и физиологических различий растительности и ландшафтов Анучина Н. П., Браткова В. В., Кре-

стова П. В., Сукачева В. Н., Толмачева А. И., Щенникова А. П., Miyabe R., Sugawara Sh. и др. [4, 29, 58, 59, 103–106, 115, 119, 122, 133, 141, 143].

*Цель и задачи исследования.* Целью диссертационного исследования является усовершенствование технологии дешифрирования растительных сообществ особо охраняемых природных территорий по космическим снимкам на примере острова Сахалин.

Для достижения цели были поставлены следующие *задачи*:

– выполнить информационно-аналитический обзор современных технологий дешифрирования космических снимков, позволяющих определять параметры состояния растительных сообществ, применительно к особо охраняемым природным территориям;

– разработать способ выделения растительных сообществ по спектральным характеристикам как компонентов экосистем ООПТ и создать классификатор их спектральных признаков;

– усовершенствовать технологию автоматизированного дешифрирования растительных сообществ ООПТ, представленных физиономическими компонентами ее экосистемы, которая опирается на распознавание растительности на основе метода максимального правдоподобия;

– выполнить адаптацию усовершенствованной технологии дешифрирования растительных сообществ, оценить современное состояние растительных сообществ в природном заказнике «Долинский» и выполнить зонирование ООПТ по геоэкологическому состоянию.

*Объект и предмет исследования.* *Объект исследования* – растительные сообщества особо охраняемых природных территорий острова Сахалин. *Предмет исследования* – технология дешифрирования космических снимков, содержащих информацию о растительных сообществах ООПТ.

*Научная новизна* результатов исследования заключается в следующем:

– усовершенствована технология дешифрирования растительных сообществ ООПТ, отличающаяся от разработанных ранее тем, что позволяет автоматизировать распознавание растительных сообществ по спектральным характеристикам

на основе метода максимального правдоподобия и картографировать состав древостоев, характерных для разных стадий сукцессий;

– разработана система обучающих эталонных выборок, обеспечивающая классификацию по породному составу и оценку состояния растительных сообществ ООПТ для их группировки по геоэкологическому состоянию на основе разделения по значениям вегетационного индекса NDVI.

*Теоретическая и практическая значимость работы.*

*Теоретическая значимость* диссертационного исследования заключается в усовершенствовании технологии автоматизированного дешифрирования растительных сообществ ООПТ по их спектральным характеристикам, обеспечивающей классификацию по породному составу и оценку состояния растительных сообществ ООПТ для их группировки по геоэкологическому состоянию на основе разделения по значениям вегетационного индекса NDVI.

*Практическая значимость* заключается в снижении трудоемкости при картографировании растительных сообществ ООПТ, которое обеспечивает оперативное принятие управленческих решений в области охраны окружающей среды.

*Методология и методы исследования.* Теоретическая часть работы выполнялась с помощью методов предварительной и тематической обработки космических изображений, автоматизированного дешифрирования, геоинформационного картографирования, математического моделирования и системного анализа, полевого исследования эталонных участков, камеральной обработки материалов полевых исследований, которые заложены в методологическую основу исследования.

*Положения, выносимые на защиту:*

– усовершенствованная технология автоматизированного дешифрирования космических снимков обеспечивает распознавание растительных сообществ ООПТ по их спектральным характеристикам и позволяет выделить на основе метода максимального правдоподобия породный состав древостоев;

– усовершенствованная технология автоматизированного дешифрирования дает возможность выполнять научно-обоснованное зонирование ООПТ по геоэкологическому состоянию, что необходимо для установления режима охраны и со-

здания благоприятных условий для сохранения состояния окружающей среды в целом и всего биоразнообразия в частности.

*Соответствие диссертации паспорту научной специальности.* Диссертация соответствует областям исследования: 4 – Теория и технология дешифрирования изображений с целью исследования природных ресурсов и картографирования объектов исследований; 5 – Теория и технология получения количественных характеристик динамики природных и техногенных процессов с целью их прогноза паспорта научной специальности 25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России.

*Степень достоверности и апробация результатов исследования.* Усовершенствованная технология дешифрирования применена и проверена на реальных объектах при анализе геоэкологического состояния природного заказника «Долинский».

Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих национальных и международных научно-практических конференциях и форумах: Международной конференции «Экологическая геология и рациональное недропользование (Экогеология-2003)» (Санкт-Петербург, 6–10 октября 2003 г.); International Asia-Pacific Environmental Remote Sensing Symposium (8–11 November 2004) Waikiki Beach Marriott Resort, Honolulu, Hawaii USA, Международной научно-практической конференции «Экология фундаментальная и прикладная. Проблемы урбанизации» (Екатеринбург, 3-4 февраля 2005 г.), Международной конференции «Проблемы устойчивого развития» (Южно-Сахалинск, 5–7 июня 2007 г.), VI Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования в системе образования» (Тамбов, 26 февраля 2008 г.), Международном форуме «III тысячелетие – новый мир» (Москва, 2–5 декабря 2008 г.), Международной научно-технической конференции «Мозаика культур: теория и практика поликультурного диалога в Азиатско-Тихоокеанском интеграционном поле» (Южно-Сахалинск, 20–25 марта 2009 г.), на XIV Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018» (Новосибирск, 23–27 ап-

реля 2018 г.), на XVI Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2020» (Новосибирск, 18 июня – 8 июля 2020 г.), на XVII Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2021» (Новосибирск, 19–21 мая 2021 г.).

Результаты исследований внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Сахалинский государственный университет» при преподавании дисциплин «Экономика природопользования», «Дистанционные методы исследования природных условий и ресурсов», а также используются в деятельности Министерства экологии Сахалинской области ([http://boomerangclub.ru/up/images/informaciya/priroda-sakhalina-i-kuril/multemediinie-diski/OOPT/r%20\(46\).htm](http://boomerangclub.ru/up/images/informaciya/priroda-sakhalina-i-kuril/multemediinie-diski/OOPT/r%20(46).htm)) и Дальневосточного филиала Федерального государственного унитарного научно-производственного предприятия «Российский федеральный геологический фонд («Росгеолфонд») (акт о внедрении научных разработок от 07.10.2010) (приложение А).

*Публикации по теме диссертации.* Основные результаты исследований опубликованы в 9 научных работах, 3 из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

*Структура диссертации.* Общий объем диссертации составляет 108 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы, включающего 146 наименований, содержит 7 таблиц, 27 рисунков, 1 приложение.

# 1 АНАЛИЗ ЗАДАЧ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

## 1.1 Особо охраняемые природные территории острова Сахалин, их назначение и проблемы охраны

В настоящее время в составе Российской Федерации выделяется 85 регионов, единственный из них – Сахалинская область – полностью расположен на островах. Общая площадь территории Сахалинской области составляет 87,1 тыс. км<sup>2</sup> и сосредоточена на островах, из которых наиболее крупным является остров Сахалин [21].

Вопросу охраны окружающей среды в последние десятилетия в РФ уделяется огромное внимание. Накопленный многолетний опыт показал, что одной из самых эффективных форм природоохранной деятельности является создание особо охраняемых природных территорий. Создание, развитие и совершенствование сети ООПТ разного уровня и режима рассматривается в числе основных направлений государственной политики в области экологии [25, 116].

На территории Сахалинской области по состоянию на 01.01.2021 расположено 53 ООПТ регионального значения, на долю которых приходится площадь 685 682 га, что составляет около 8 % территории региона: два природных парка (площадью 7 294 га), 11 государственных природных заказников (612 107 га); 40 памятников природы (66 281 га) [91]. На острове Сахалин располагается 42 ООПТ (87,7 % всех ООПТ в Сахалинской области). При этом 25 из них созданы для сохранения в естественном состоянии различных лесных сообществ, а также ландшафтов и растений, занесенных в Красные книги Российской Федерации и Сахалинской области (таблица 1.1) [42, 43].

Таблица 1.1 – Особо охраняемые природные территории острова Сахалин, предназначенные для охраны различных лесных ландшафтов по состоянию на 01.01.2021 [91]

№ п/п	Наименование ООПТ, год образования	Профиль ООПТ	Площадь ООПТ, га	Цель создания ООПТ и объекты охраны
Природные парки				
1	Лагуна Буссе, 1977	комплексный	5 735	Охрана краснокнижных растений
Государственные природные заказники				
2	Тундровый, 1987	биологический	189 895	Охрана и сохранение таежных лесных сообществ и ландшафтов тундры
3	Александровский, 1980	биологический	24 600	Охрана и сохранение в естественном состоянии водно-болотных угодий и тундровых ландшафтов
4	Красногорский, 1974	биологический	6 213	Охрана и сохранение в естественном состоянии лесных ландшафтов.
5	Макаровский, 1992	биологический	39 148	Охрана редких и исчезающих видов растений, в том числе краснокнижных
6	Долинский, 1988	комплексный	9 176	Охрана среды обитания животных, в том числе краснокнижных. Сохранение неповторимых, эстетически ценных лесных ландшафтов
7	Озеро Добрецкое, 1989	биологический	5 817,4	Охрана и сохранение в естественном состоянии лесных ландшафтов
8	Восточный, 2007	комплексный	68 080	Сохранение в первозданном виде объектов растительного мира, в том числе краснокнижных растений
9	Ногликский, 1998	биологический	66 206	Охрана и сохранение в естественном состоянии лесных и тундровых ландшафтов, естественных природных экосистем в районе проживания коренных малочисленных народов Севера
Памятники природы				
10	Успенские клюквенники, 1995	ботанический	280	Сохранение болот с клюквой, являющиеся, характерным природным эталоном природной зоны
11	Река Анна, 1983	комплексный	3 501	Охрана краснокнижных растений
12	Стародубские дубняки, 1983	ботанический	14	Охрана места произрастания дуба курчавенького
13	Озерский ельник, 1980	ботанический	7 153,01	Сбережение леса с преобладанием краснокнижной ели Глена
14	Корсаковский ельник, 1980	ботанический	8	Охрана комплекса береговых экосистем, в том числе краснокнижных растений

## Окончание таблицы 1.1

№ п/п	Наименование ООПТ, год образования	Профиль ООПТ	Площадь ООПТ, га	Цель создания ООПТ и объекты охраны
Памятники природы				
15	Мыс Великан, 1990	комплексный	39,4142	
16	Хребет Жданко, 1988	комплексный	155,01	Охрана комплекса горных и приморских экосистем, места произрастания редких и эндемичных видов растений, в том числе краснокнижных
17	Популяция скальной флоры, 1983	ботанический	8	Охрана скального комплекса флоры, в том числе эндемичных, редких и исчезающих видов растений
18	Мыс Кузнецова, 1986	комплексный	737	Сохранение уникальных объектов живой природы
19	Красногорский тисовый лес, 1988	ботанический	115,65	Сохранение массива темнохвойного леса со старовозрастным тисом остроконечным, занесенным в Красные книги
20	Томаринский бор, 1980	ботанический	7,0021	Сохранение созданного японскими лесоводами в 1943–1944 гг. участка насаждений хвойных культур, в том числе краснокнижной сосны густоцветковой
21	Озера горы Спамберг, 1990	комплексный	1 100,37	Сохранение озерных, лесных, лугово-болотных и горных ландшафтов с краснокнижными растениями
22	Костромской кедровник, 1980	ботанический	4,81	Сбережение культурных насаждений кедра корейского
23	Высокогорья горы Чехова, 1983	комплексный	1 800	Охрана краснокнижных растений
24	Роца ореха маньчжурского 1980	ботанический	6,4	Охрана культуры ореха маньчжурского
25	Популяция кардиокринума (лилии) Глена, 1988	ботанический	13,3	Сохранение места произрастания микропопуляции краснокнижного кардиокринума сердцевидного Глена

В соответствии с российским законодательством [77] обеспечение деятельности ООПТ регионального значения возлагается на их руководящие органы, функцию которых в Сахалинской области осуществляют представительства Государственного казенного учреждения (ГКУ) «Сахалинские лесничества». В настоящее

время ГКУ «Сахалинские лесничества» насчитывает 17 лесничеств, расположенных на территориях муниципальных образований.

Хроническое недофинансирование, кадровые проблемы, недостаточная лесная транспортная инфраструктура и т. п. ставят под угрозу поддержание жизнеобеспечивающих функций природных систем ООПТ регионального значения.

Перед Министерством экологии Сахалинской области стоят следующие задачи [79]:

- обеспечения своевременной оценки лесов (проведение лесоустройства) и анализа современного состояния;
- организации охраны ООПТ;
- обеспечения возможности использования сети ООПТ в рекреационных и туристических целях.

Для полного и эффективного решения обозначенных проблем необходимо проведение научно-исследовательских работ с целью качественной оценки состояния лесной растительности, выполнения наземной таксации, которые предусматривают создание цифровой модели лесных ресурсов территории для их учета в длительной перспективе. Для успешного выполнения этих задач требуется постоянное обновление информации, в том числе данных, получаемых при помощи космических систем зондирования Земли.

## 1.2 Современное состояние космических систем дистанционного зондирования Земли, используемых для исследования растительного покрова

Космические съемочные системы постоянно совершенствуются в направлении повышения пространственного и радиометрического разрешения снимков, увеличения ширины полосы охвата территории и количества рабочих диапазонов. Благодаря этому космические снимки являются весьма информативным источником для оценки состояния растительного покрова в регионе и на ООПТ.

Для мониторинга состояния растительных сообществ ООПТ требуются космические снимки, позволяющие решать следующие задачи: контроль за уничтожением лесов, выявление породного состава древостоев, оценка запасов леса, оценка биомассы, картографирование лесов, оценка ущерба в лесных массивах, решение лесоводческих задач, исследование водоохранных зон, выявление геоэкологического состояния лесных экосистем и организации мониторинга ООПТ (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Требования к космическим снимкам при решении задач мониторинга состояния растительных сообществ (Гарбук, Гершензон, 1998 с авторскими изменениями) [20]

№ п/п	Задачи мониторинга растительных сообществ	Характеристики объектов	Масштаб	Периодичность	Спектральный диапазон	Пространственное разрешение, м
1	Контроль за уничтожением лесов	цвет, температура, текстура	Гл	К	В, ИК, МВ	10–30
2	Выявление породного состава древостоев	цвет, температура, текстура	Л	К	В, ИК	1–10
3	Оценка запасов леса	высота и плотность деревьев	Л	Г, К	В, ИК	6–10
4	Оценка биомассы	высота и плотность деревьев	Н	Г / К	В, МВ	6–10
5	Картографирование лесов	высота и плотность деревьев	Н	Г / К	В, МВ	30
6	Оценка ущерба в лесных массивах	высота и плотность деревьев	Л, Р	Т	В, ИК, БЛИК, Т	6–100
7	Решение задач лесоводства	цвет, температура, текстура	Н	К	В, ИК, БЛИК, Т	100
8	Исследование водоохранных зон	цвет, температура, текстура	Г	К	В, ИК, МВ	15–100

В таблице 1.2 буквами обозначены:

- масштабы обзора территории: Г – глобальный; Н – национальный; Р – региональный; Л – локальный;
- периодичность наблюдений: Г – годовая, К – квартальная, Т – по требованию;
- спектральный диапазон: В – видимый; ИК – инфракрасный; БЛИК – ближний ИК; Т – тепловой ИК; МВ – микроволновой.

Съемки, произведенные с первых искусственных спутников Земли, показали, что они могут служить великолепным инструментом для исследования объектов окружающей природной среды. Самые широкие возможности открылись для исследований атмосферы и объектов на земной поверхности. Космические съемки дали возможность регулярно получать информацию о состоянии природных комплексов. В целом мировая отрасль дистанционного зондирования Земли демонстрирует высокие темпы развития и обеспечение доступности оперативных данных. За время, прошедшее с 70-х гг. XX в. до 20-х гг. XXI в. наметились две тенденции в развитии систем космического мониторинга: усиление востребованности многозональных сканерных изображений и снимков высокого и сверхвысокого разрешения. Эти тенденции только увеличивают зависимость дистанционного зондирования от атмосферных условий в оптическом диапазоне и приводят к уменьшению ширины полосы обзора в угоду повышению высокой разрешающей способности.

Системы космического мониторинга (СКМ) земной поверхности состоят из двух подсистем: контактной и дистанционной. Контактная наземная подсистема состоит из эталонных объектов, где выполняются подспутниковые и подсамолетные эксперименты: изучается влияние антропогенных и природных факторов на спектрально-отражательные и излучательные характеристики наблюдаемых объектов, проводится отработка методик, испытание и калибровка приборов, необходимых для дистанционных исследований, технических и программных средств обработки полученной информации. Дистанционная подсистема обеспечивает наблюдения с помощью средств космического базирования [64].

Спектральный диапазон и технология съемки позволяют классифицировать космические снимки, ими определяются качество снимков и их измерительные и изобразительные свойства [64].

Для исследования растительного покрова оптимально использовать снимки, выполненные в видимой части спектрального диапазона, которые могут быть получены с помощью различных технологий с различных носителей аппаратуры. Снимки в световом диапазоне подразделяются по этому признаку на три подгруппы (рисунок 1.1):

- фотографические;
- сканерные снимки, получаемые при оптико-механическом сканировании;
- ПЗС-снимки, получаемые при оптико-электронном сканировании.

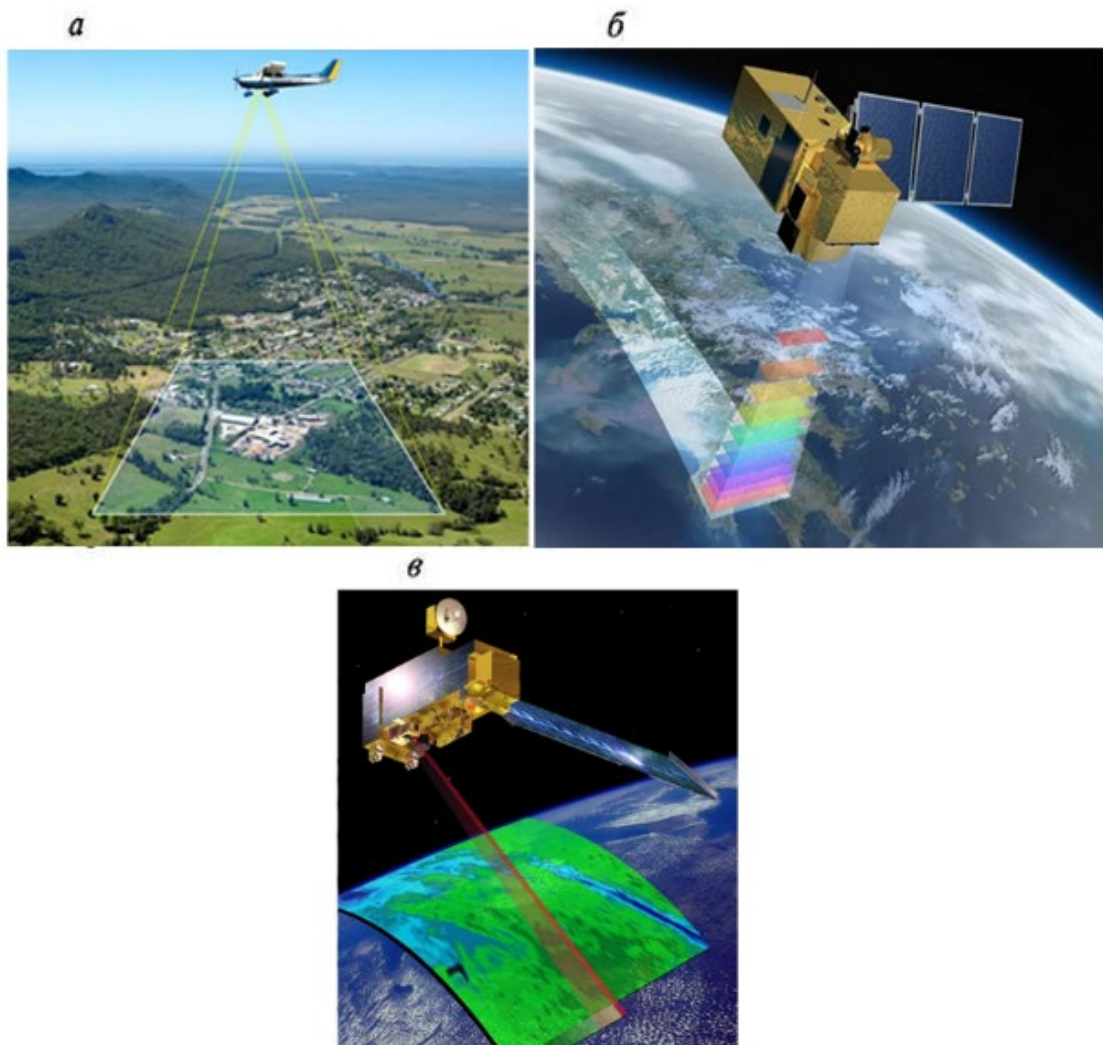


Рисунок 1.1 – Технологии получения аэрофотоснимков (а), космических фотоснимков (б) и оптико-электронных сканерных изображений (в) (по Малинникову и др., 2009 с изменениями) [64].

Для исследования растительных сообществ подбираются космические снимки соответствующих масштабов и линейных пространственных разрешений, которые в совокупности определяют дешифровочные свойства снимков. К таким снимкам относятся:

- мелкомасштабные (региональные), отображающие региональные земные структуры и имеющие пространственное разрешение 50–100 м;
- среднемасштабные (локальные), отображающие значительные по охвату территории размером порядка  $50 \times 50$  км и имеющие пространственное разрешение до 3–8 м;
- крупномасштабные (детальные), отображающие небольшие участки местности с охватом территории порядка  $10 \times 10$  км и менее и имеющие достаточно высокое пространственное разрешение порядка долей метров.

Современные системы космического мониторинга выполняют регулярное ДЗЗ, используя аппаратуру, снимающую в видимом, инфракрасном и радиоволновом диапазонах электромагнитного излучения. В зависимости от размеров деталей, различаемых на изображениях, их можно отнести к снимкам малого, среднего, высокого и сверхвысокого разрешения [94]. Полученные изображения помогают отслеживать состояние компонентов экосистем, природные процессы, прогнозировать антропогенные изменения, стихийные бедствия, а также оценивать их последствия [2, 12, 19, 26, 31, 101]. Обеспечение производства подобных работ и управление ими требуют соответствующих знаний в области эксплуатации средств ДЗЗ и разработки новых технологических решений в области совершенствования методов информационно-аналитического анализа данных.

Космические системы, предназначенные для решения разноплановых задач мониторинга природной среды в рамках действующих программ исследования Земли из космоса, снабжены аппаратурой высокого пространственного разрешения, которая дает возможность при правильном выборе режимов зондирования получать снимки, позволяющие извлекать информацию, уникальную по составу и содержанию. Спутниковые системы передают информацию, получаемую различными устройствами, которыми снабжены космические аппараты, выведенные на

различные околоземные орбиты: геостационарные, близкие к плоскости экватора и низкие околоземные приполярные круговые и околокруговые (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Космические системы мониторинга Земли на низких околоземных орбитах (НОО)

Космические аппараты, годы запусков, страна	Орбита, высота средняя	Измерительные устройства на борту	Назначение
«Ресурс-П», 2013 – по н. в., Россия	НОО ПО СС 475 км наклонение – 97,276°	Оптико-электронная аппаратура «Геотон-Л1» (панхром. диапазон < 1 м, в других – 3-4 м). Гиперспектральная аппаратура 216 спектральных каналов со спектральным разрешением от 5 до 10 нм. Широкозахватная мультиспектральная аппаратура высокого (пан. 12, остальные – 23,8 м) и среднего (пан. 60, 120 м) разрешения с захватом 97 и 441 км	География, сельское хозяйство, геология, изучение природных ресурсов
Канопус-В-ИК», Канопус-В» № 3-6 2017 – по н. в., Россия	НОО ПО СС 675 км наклонение – 98,1°	Панхроматическая (2,5 м, захват - 23 км) и многозональная (12 м, 20 км) съемочные системы	Информация предоставляется по заявкам
Международная космическая станция. 1995 (первые модули), 2000 – по н. в., Россия	НОО НО 340–417 км наклонение – 51,66°	Видеоспектральная система 273 зоны 390-960 нм со спектральным разрешением 3 нм, поле зрения 40,3×40,3 м	Глобальные и региональные задачи экологии
Landsat 1-8, 1972 – по н. в., США	НОО ПО СС 675–705 км наклонение – 98,2°	Сначала: TV-камеры RBV, многоспектральный сканер MSS, тематический картограф TM. Теперь: OLI – 30 м (видимый, NIR, SWIR); 100 м (Term); и 15 м (панхром.) Всего – 11 каналов	География, сельское хозяйство, геология, гидрология, изучение природных ресурсов
TIROS, 1960-1978; ESSA, 1966-1969; NOAA 6-19, N. 1970 – по н. в., США	НОО ПО СС ~ 800–870 км наклонение – 98,7°	VIIRS 22-канальный радиометр, аналог MODIS (Terra и Aqua) 375 м (панхр.), 750 м; усовершенствованный радиометр инфракрасного излучения высокого разрешения (HIRS/3)	География, сельское и лесное хозяйство, экология, ледовая обстановка
SuomiNPP (NPOES) 2011 – по н. в., США Работает в паре с NOAA-19	НОО ПО СС 824 км наклонение – 98,8°	VIIRS 22-канальный радиометр. Разрешение -375 м; 750 м. CERES система изучения облаков и лучистой энергии Земли. CrIS зондировщик атмосферы	Ледовая обстановка, лесные пожары, засухи, наводнения, вулканы
SPOT, 1986-2013. Франция	НОО ПО СС 825 км наклонение – 98,7°	Оптико-электронные камеры HRV, радиометры HRVIR и VGT/ Диапазоны – видимый, NIR SWIR 20 м; панхром.- 10 м	Картографирование, землепользование, сельское хозяйство, лесопользование, экология
Terra (EOS AM-1) / Aqua, Aura США, Япония и Бразилия, программа Earth Observing System	НОО ПО СС 655–686 км наклонение – 98,24°	Радиометр MODIS, 36 диапазонов спектра, с длиной волны от 0,4 мкм до 14,4 мкм и разрешением от 250 м до 1 км. ASTER - радиометр теплового излучения и отражения	Исследование атмосферы, влажности почвы, погоды, мониторинг экосистем

## Окончание таблицы 1.3

Космические аппараты, годы запусков, страна	Орбита, высота	Измерительные устройства на борту	Назначение
Sentinel 1A-1D – Sentinel 6 2014 – по н. в., Европа (запуски Союз-СТ-А, Россия; Ariane-5 (ESA))	НОО ПО СС 695–788 км наклонение – 98,2–98,58°, а также 1 336 км	Радиолокатор С-диапазона с синтезированной апертурой (РСА). Мультиспектральный инструмент (MSI) с разрешением от 10 до 60 м	Метеорология, прогноз погоды, картографирование, вулканопасность, лесопользование, экология
IRS 1- P5 (Cartosat 1), Cartosat 2 -3 В 1988 – по н. в., Индия	НОО ПО СС 720 и 495 км; наклонение – 97,56°	Панхроматическая камера PAN (0,25 м панхр. 1,13 м мультиспек.), широкоугольная камера WiFS, сканирующий спектрометр MOS, спектрометр OCM	Изучение природных ресурсов
EROS-A, EROS-B, 2000 – по н. в., Израиль	НОО ПО СС ~ 510 ± 40 км наклонение – 98,6°	Оптические снимки в панхроматическом режиме (0,45-0,90 мкм): базовое – 14×14 км (1,9; 0,7 м); векторное – 14 × до 40 км, а также стерео.	Широкий спектр по заказу, доставка FTP
FORMOSAT-2 FORMOSAT-5 2004 – по н. в., Тайвань (запуск США)	НОО ПО СС ~ 891 и 720 км; наклонение – 99,1°; 98,28°	2 съемочных аппарата: в панхром. режиме с разрешением 2 м и многозональном режиме (видимый и ИК) с разрешением 4 (ранее 8) м	Мониторинг окружающей среды, предупреждение стихийных бедствий
ALOS 1-4, 2001 – по н. в., Япония	НОО ПО СС 669 км; наклонение – 97,8	Широкоформатный оптический тепловизор высокого разрешения ALOS-3/PRISM-2. Разрешение в панхром. 0,8 м с шириной полосы: 70 км в надире, многозональные – 3,2 м и шириной полосы 70 км в надире. Диапазоны: УФ, синий, зеленый, 2 красных, и ближний ИК	Землепользование, городское планирование, картографирование, наблюдение за опасными природными явлениями
Примечания: НОО – низкая околоземная (опорная) орбита высотой 160–2 000 км; ПО – приполярная околокруговая при наклонении 70–99°; НО – наклонная орбита; СС – солнечно-синхронная орбита.			

Несомненным преимуществом размещения космических аппаратов на геостационарных орбитах является их долговечность, обусловленная отсутствием энергетических затрат на движение, в результате уравнивания гравитационного притяжения Земли и собственной инерции спутника при линейной скорости 3,074 км/с. Вследствие равенства угловой скорости геостационарных спутников и скорости вращения Земли первые неподвижно «зависают» над земной поверхностью на постоянной высоте, что способствует применению технологически про-

стных принимающих устройств, пригодных для массового использования. Изображения, полученные аппаратурой, размещенной на геостационарных спутниках, имеют невысокое пространственное разрешение, но при этом обладают высокой обзорностью.

Фотографические и сканерные изображения, которые принимаются с низкоорбитальных спутников, оснащенных аппаратурой с разрешающей способностью, достаточной для дешифрирования деталей на земной поверхности с различными спектральными характеристиками, составляют в совокупности логическую картину, свойственную определенным объектам. Многозональные снимки дают возможность уверенно дешифрировать разнообразные растительные сообщества и их состояние.

Данные космических съемок территории со спутников Landsat, Канопус-В, Sentinel обеспечивают получение изображений среднего и высокого разрешения, дают возможность оценивать масштаб происходящих процессов и современное состояние лесных ландшафтов [93, 127, 128, 137–139]. Изучение многозональных снимков с использованием вегетационных индексов помогает определить суть процессов, происходящих на территориях, и выявить особенности изменений состояния экосистем [18, 19].

Оперативный мониторинг состояния растительных сообществ проводится с использованием средств ДЗЗ преимущественно оптического и инфракрасного диапазонов. Краткий обзор космических систем мониторинга Земли показал, что направление исследований с использованием данных, получаемых с разнообразных датчиков, весьма перспективно для решения задач изучения растительных сообществ ООПТ. Космическое базирование средств наблюдения обеспечивает возможность контроля над обширными районами поверхности Земли и атмосферы. Сенсоры оптического и инфракрасного диапазонов электромагнитных волн позволяют проводить наблюдения в интересах решения разнообразных тематических задач исследования растительного покрова. Правильный выбор режимов космической съемки сканерами высокого пространственного разрешения позволяет полу-

чать дополнительную информацию к материалам традиционных наземных и авиационных наблюдений.

Разработка технологий и методик распознавания растительных сообществ лесопокрываемых территорий, нуждающихся в охране, всегда остаются важнейшими направлениями в сфере природоохранной деятельности, нацеленной на сохранение экосистем и биоразнообразия.

### 1.3 Системный анализ существующих технологий и методов определения растительных сообществ

Лесной растительностью в России покрыты огромные территории. Их исследование очень трудоемко и не представляется возможным без использования материалов космических съемок и обработки данных с помощью геоинформационных технологий, использующих методы математического анализа и моделирования. Экстраполяция способа обработки по определенному алгоритму на большие площади требует регулярной проверки достоверности результатов, подтверждаемой оценкой точности распознавания образов при дешифрировании космических снимков, которая сравнивается с данными полевых наземных исследований.

Дешифрирование космических снимков опирается на измерение спектральной отражательной способности исследуемых растительных сообществ, которая служит в качестве основного дешифровочного признака при выявлении структуры растительного покрова.

Отражательные свойства растительности определяются следующими факторами [47]:

- особенностями прохождения волн оптического диапазона через листовые пластины;
- геометрией крон и угловым распределением листьев;
- собственным излучением поверхности почвы в случае неполного проективного покрытия растительностью;

– неравномерностью распределения растительного покрова.

Энергетический спектр отражения листовых пластин детально исследовался П. Кронбергом (рисунок 1.2). [46]. Пластины хлорофилла поглощают листовыми энергиею волн красной области спектра (680–690 нм), которая на графиках отражательной способности проявляет себя как «хлорофиллова яма». Зеленые лучи (500–600 нм) максимально отражаются от свежей здоровой листвы (максимум в этой части спектра – «зеленый пик»). Зерна хлорофилла поглощают волны голубого (400–480 нм) и красного (600–700 нм) диапазонов спектра. В ближней ИК-зоне (700–1 300 нм) листья отражают 40–50 % и поглощают менее 5 % падающего излучения. Высокое отражение в ИК-области объясняется тем, что луч света внутри листа отражается многократно. В диапазонах волн около 1 450 и 1 950 нм отражательная способность здоровых листьев обратно пропорциональна содержанию влаги в листе: чем больше влаги, тем ниже яркость [46].

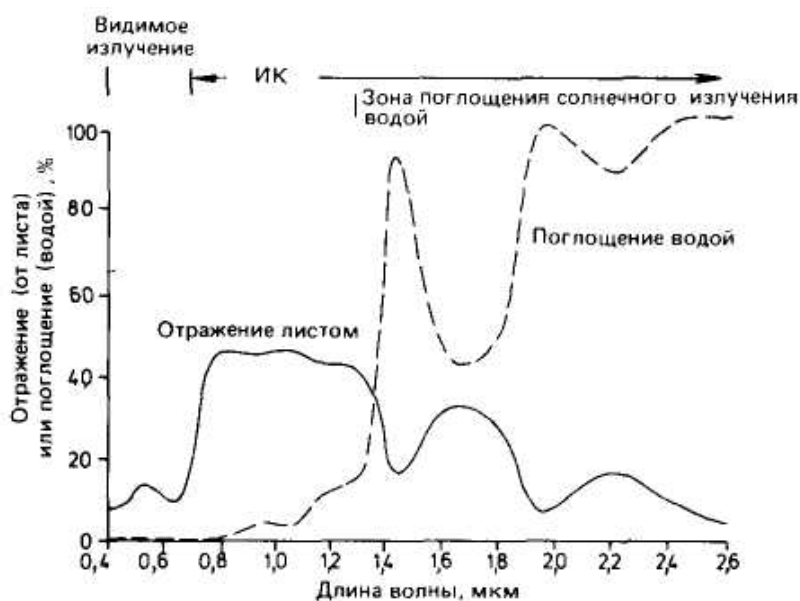


Рисунок 1.2 – Спектральная отражательная способность зеленой листвы здоровых растений (по Кронбергу, 1988) [46]

Для обработки спектральных данных дистанционного зондирования важное значение имеет то, что графики спектрального отражения отдельных типов растительных сообществ имеют свои характерные особенности, обусловленные зависимостью отражательной способности от строения листовых пластин (рисунок 1.3) [46].

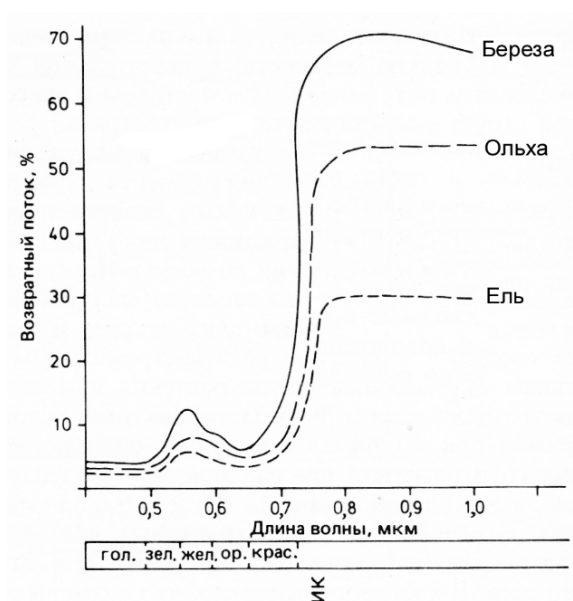


Рисунок 1.3 – Спектральная отражательная способность ели, ольхи, березы (по Кронбергу, 1988 с авторскими изменениями) [46]

Технологии тематического дешифрирования растительности автоматизированными методами выполняются с использованием различных методов классификации. Наиболее распространённым подходом являются линейные комбинации, рассчитанные на основе значений коэффициентов спектральных яркостей, различные спектральные вегетационные индексы, являющиеся функциями коэффициента спектральной яркости в нескольких спектральных каналах.

Анализ возможностей крупных зарубежных систем дистанционного зондирования Земли для оценки достоверности распознавания типов земного покрова [127, 128, 137–139] показал, что карты, созданные на глобальном уровне, имеют невысокую достоверность классификации объектов растительного покрова в связи со значительной пространственной изменчивостью спектрально-отражательных характеристик земного покрова. Способы повышения достоверности классификации и учёта географических факторов основываются на приёмах стратификации территории, гиперкластеризации.

Хорошо известны работы по глобальному картографированию растительности России, которые выполняются в Институте космических исследований Российской академии наук.

На основе снимков низкого (Terra/Aqua, NOAA) и среднего (Landsat) пространственного разрешения создан ряд картографических продуктов, характеризующих лесной покров России в целом или ее отдельных регионов. Из первых можно отметить карту наземных экосистем Северной Евразии и Карту преобладающих пород и сомкнутости лесов России [96]. Также для территории России коллективом авторов из Института космических исследований РАН создана ежегодно обновляемая карта типов растительности по спутниковым данным Terra/Aqua MODIS, основанная на использовании алгоритма локально-адаптивной классификации LAGMA [96], учитывающего пространственные вариации спектрально-отражательных характеристик, позволяющего значительно повысить достоверность автоматической классификации объектов растительного покрова земной поверхности.

Из региональных продуктов за последние годы была создана карта лесов Ханты-Мансийского автономного округа. Разработанный алгоритм обработки комбинаций разновременных оптических и радарных космических снимков позволяет выявлять изменения на лесных землях, возникающие под воздействием природных и антропогенных факторов. Для обеспечения задач мониторинга сформирована база данных выявленных дистанционными методами изменений лесных земель на территории Ханты-Мансийского автономного округа с предоставлением общего доступа к ней посредством разработанного геопортала регионального Центра космических услуг (ЦКУ) [58].

Распознавание объектов на космических изображениях сводится, в сущности, к визуальному либо автоматизированному дешифрированию. Визуальное дешифрирование выполняется дешифровщиком, а автоматизированное – посредством запрограммированной обработки снимков. Сравнение двух этих методов показывает, что каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. К основным достоинствам визуального метода можно отнести легкость получения пространственной информации, возможность использования при анализе изображения совокупности дешифровочных признаков и в особенности косвенных признаков. Недостатками визуального дешифрирования являются ограниченность совместного анализа зо-

нальных снимков, отсутствие возможности получения точных количественных оценок расстояний. Возможность преобразования яркости цифровых снимков дает существенные преимущества методу автоматизированного дешифрирования при сопоставлении разновременных картографических и съемочных материалов с целью выявления и изучения изменений объектов [24, 47].

Растительность обладает значительными различиями отражательной способности в диапазонах спектра, чем объясняется преимущество использования многозональных снимков для дешифрирования растительных сообществ.

Совокупность значений яркости на многозональных снимках представляется как пространство спектральных признаков с размерностью, зависящей от числа съемочных зон. Классификация объектов, основанная на теории распознавания образов, предусматривает разделение пространства признаков на классы с конкретными значениями признаков. Различают два вида процессов классификации контролируемая классификация (с обучением), когда известна принадлежность признаков объектов к определенному классу, и классификация без обучения, позволяющая группировать пиксели со сходными уровнями яркости в зонах спектра без предварительного знания числа и характеристик классов объектов на местности [13, 84].

В процессе автоматизированной обработки посредством неконтролируемой классификации космических изображений очень часто последовательно используются два метода: метод быстрого выделения кластеров (алгоритм быстрого выделения кластеров) и метод последовательной кластеризации (итерационный алгоритм последовательной кластеризации). Последовательное применение этих методов позволяет повысить точность выделения классов объектов [5].

Контролируемая классификация проводится поэтапно:

- выявляется состав дешифрируемых объектов, которые должны быть определены при выполнении классификации согласно решаемой тематической задаче;
- определение пикселей, характерных для каждого из классов выделенных объектов (формирование обучающей выборки);

- осуществление классификации, при которой вычисляются параметры каждого из классов;

- оценка достоверности классификации, представление результатов в виде изображения, на котором каждый пиксел отнесен к тому или иному классу, таблицы с данными о координатах пиксела и указанием его принадлежности к определенному классу.

Создание обучающей выборки, для определенных на первом этапе выполнения контролируемой классификации классов объектов, начинается с определения эталонных участков на снимке, принадлежащих соответствующему классу. Выбор эталонных областей базируется на знаниях исследователя объектов анализируемой территории, источниками которых могут являться проведенные полевые исследования, топографические карты, аэро- и космические снимки, лесоустроительные и прочие материалы, дающие дополнительные сведения об исследуемых объектах. Достоверность классификации в значительной степени зависит от достоверности и точности определения обучающей выборки. В связи с этим, обучающая выборка должна быть сформирована с учетом соблюдения следующих требований [38, 47, 113]:

- доля пикселов обучающей выборки по отношению к общему количеству пикселов снимка должна составлять от 1 до 5 %;

- количество пикселов, характеризующих один класс, – не менее 20–30;

- распределение значений спектральных характеристик, отнесенных к одному классу, должно быть близким к нормальному;

- гистограмма распределения значений яркости класса – одномодальная, с ярко выраженным пиком;

- область значений яркости одного класса не должна пересекаться с областями значений яркости других классов.

Набор параметров классов объектов зависит от выбранного алгоритма контролируемой классификации. Если поля классов не перекрываются в признаковом пространстве, то целесообразно использовать детерминированный подход при выборе алгоритма классификации. Метод классификации по минимальному расстоя-

нию, основанный на детерминированном подходе, используют в случае наличия близких значений спектральных признаков у разных классов и перекрытии диапазонов их яркости. Для этого до начала вычислений определяют средние значения яркости классов в обучающей выборке. Определяются расстояния от средних значений яркости классов до каждого пиксела, затем пиксел относят к тому классу, расстояние до которого будет иметь минимальное значение. Классификацию по минимальному расстоянию применяют в случае выделения незначительного числа классов в обучающей выборке (приемлем для 6–7 видов растительных сообществ в ООПТ).

Неоднородность природных объектов, их освещенность, пиксельная структура цифрового снимка являются причинами того, что области признаков, принадлежащих разным классам, часто соприкасаются или частично пересекаются. Среди методов контролируемой классификации довольно распространенными являются метод параллелепипедов и метод максимального правдоподобия.

Метод параллелепипедов целесообразно использовать в случае хорошей разделимости значений спектральной яркости при небольшом количестве классов объектов. Суть метода заключается в отнесении пикселов изображения к эталонным классам, характеристики которых задаются интервалами значений яркости, определенными в результате анализа гистограммы распределения яркости на изображении. В пространстве спектральных признаков интервалы значений яркости представляют в виде параллелограмма в двумерном поле признаков, параллелепипеда – в трехмерном и гиперпараллелепипеда – в четырехмерном и более поле признаков.

Вследствие того, что растительность обладает значительным разнообразием спектральных характеристик, а также близостью спектральных характеристик некоторых древесных пород, необходимо для распознавания растительных сообществ использовать метод классификации, основанный на статистическом подходе, – метод максимального правдоподобия. Суть метода состоит в определении вероятности попадания пиксела в определенный класс, в результате чего после вы-

числительных операций не остается неклассифицированных пикселей. В пределах каждого класса во всех спектральных зонах предполагается нормальное распределение значений яркости и используются ковариации между значениями спектральной яркости.

Нормальное распределение значений яркости класса в каждой спектральной зоне определяется по двум параметрам: среднему значению яркости  $B_{\lambda m}^*$  и стандартному отклонению от среднего значения яркости класса  $\sigma_\lambda$ , которое вычисляется по формуле [38]:

$$\sigma_\lambda = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (B_{\lambda i}^* - B_{\lambda m}^*)^2}{n-1}}, \quad (1.1)$$

где  $n$  – количество значений яркости пикселей в пределах класса.

Если значения стандартного отклонения  $\sigma_\lambda$  в двух спектральных зонах одинаковые, то в двумерном пространстве признаков область класса с нормальным распределением значений яркости отобразится как круг, а при разных значениях  $\sigma_\lambda$  – как эллипс. Взаимосвязанное изменение зональных значений яркости класса придает эллипсу определенный наклон.

Ковариацию определяют по формуле [38]:

$$Cov_{\lambda_1, \lambda_2} = \frac{\sum_{i=0}^n (B_{\lambda_1 i}^* - B_{\lambda_1 m}^*)(B_{\lambda_2 i}^* - B_{\lambda_2 m}^*)}{n-1}, \quad (1.2)$$

где  $B_{\lambda_1 i}^*$ ,  $B_{\lambda_2 i}^*$  – значения яркости пикселя  $i$  в двух сравниваемых спектральных зонах. Для  $n$  спектральных зон значения ковариации между яркостями во всех возможных парах зон записывают в виде матрицы ковариации размером  $n \times n$ , которая в пределах класса характеризует взаимосвязи между спектральными яркостями. На основе рассчитанных минимальных, максимальных, средних значений спектраль-

ных яркостей и матрицы ковариации производится вычисление спектрального расстояния – расстояния Махаланобиса  $DM_{ic}$  по следующей формуле [38]:

$$DM_{ic} = (X_{B_i^*} - M_{B_{ic}^*})^T \times Cov_{B_{ic}^*}^{-1} \times (X_{B_i^*} - M_{B_{ic}^*}), \quad (1.3)$$

где  $Cov_{B_{ic}^*}^{-1}$  – матрица, обратная ковариационной, для класса  $c$ ;  $X_{B_i^*}$  – значения яркости пиксела  $i$ ;  $M_{B_{ic}^*}$  – эталонные средние значения яркости класса  $c$ .

Пиксел относится к тому или иному классу при минимальном значении расстояния Махаланобиса до эталонных средних значений, если это условие не выполняется, то пиксел остается неклассифицированным или относится к классу «прочие объекты» [38].

Универсальность метода максимального правдоподобия заключается в возможности разделения классов с разными типами функций плотности распределения признаков и в минимизации ошибок классификации. В результате проведенной классификации получают карту классификации, которая имеет элементарную легенду, соответствующую определенному перечню классов объектов, где каждый класс изображен своим цветом.

Оценка достоверности классификации сначала проводится визуально на предмет выявления серьезных ошибок, в случае их наличия. Затем проводится количественная оценка достоверности. Облака точек, свойственных отражательным характеристикам выделенных классов, размещенных в декартовой системе координат на диаграммах рассеяния, показывают, насколько хорошо разделяются классы в соответствии с избранной для данного исследования обучающей выборкой. Если точки на графиках расположены близко друг от друга, это свидетельствует о сильной корреляции, и, как следствие, о качественном выделении эталонов для исследуемых объектов. Группировки точек на диаграммах рассеяния показали, что спектральные характеристики объектов имеют положительную корреляцию с характеристиками выборки. Выбросы точек, которые значительно удалены от общего кластера, показывают, что выделение классов было выполнено недостаточно точно.

Требуется выделение новых эталонных участков и замена выделов в обучающей выборке. Оформление результатов выполнения процедуры классификации представляется в виде карты, на которой каждый пиксел отнесен к тому или иному классу, а также в табличном виде.

### Выводы по разделу 1

Анализ существующих методик и технологий показывает увеличение потребности в мультиспектральных сканерных изображениях и снимках с высоким и средним разрешением для анализа состояния растительных сообществ. Однако такие тенденции ведут к усилению зависимости дистанционного зондирования от атмосферных условий в оптическом диапазоне и приводят к уменьшению ширины полосы обзора в угоду повышению разрешающей способности.

Анализ возможностей крупных зарубежных систем дистанционного зондирования Земли для оценки достоверности распознавания типов земного покрова показал, что карты, созданные на глобальном уровне, имеют невысокую достоверность классификации объектов растительного покрова в связи со значительной пространственной изменчивостью спектрально-отражательных характеристик земного покрова. Существует ряд картографических продуктов, характеризующих лесной покров России и ее отдельных регионов, созданных коллективом авторов из Института космических исследований РАН, основанных на использовании алгоритма локально-адаптивной классификации LAGMA, учитывающего пространственные вариации спектрально-отражательных характеристик. Из региональных продуктов за последние годы была создана карта лесов Ханты-Мансийского автономного округа. Разработанный алгоритм обработки комбинаций разновременных оптических и радарных космических снимков позволяет выявлять изменения на лесных землях, возникающие под воздействием природных и антропогенных факторов.

Таким образом, обоснована необходимость совершенствования технологий автоматизированного дешифрирования.

Выявлены недостатки по определению растительных сообществ ООПТ, заключающиеся в сложности их выделения, а также обособления границ объектов. В частности, установлены сложности в разделении состава древостоев.

Для определения местоположения эталонных участков достаточно использовать неконтролируемую классификацию либо методом быстрого выделения кластеров, либо методом последовательной кластеризации. Последовательное применение этих методов позволяет повысить точность выделения классов объектов.

Формирование обучающей выборки при контролируемой классификации начинается с определения эталонных участков на снимке, принадлежащих соответствующему классу. Выбор эталонных областей базируется на знаниях исследователя объектов анализируемой территории, источниками которых могут являться проведенные полевые исследования, топографические карты, аэро- и космические снимки, лесоустроительные и прочие материалы, дающие дополнительные сведения об исследуемых объектах.

Выполненный информационно-аналитический обзор методов классификации позволил обосновать целесообразности использования метода максимального правдоподобия для выявления растительных сообществ ООПТ.

## 2 УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЕШИФРИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

### 2.1 Постановка задачи усовершенствования технологии автоматизированного дешифрирования растительных сообществ

Практическая реализация мер по защите окружающей среды невозможна без объективной информации о состоянии и тенденциях ее изменения. Важнейшие качества данных, используемых для принятия управленческих решений, – достоверность, актуальность и полнота. Как правило, ООПТ занимают обширные территории и их исследование только традиционными наземными методами очень трудо- и материалоемко. Использование космических снимков позволяет оперативно и детально исследовать состояние окружающей среды и, при более низких затратах, организовать мониторинг состояния огромных площадей в единый момент времени. Технология дешифрирования растительных сообществ необходима для определения состава и состояния экосистемы ООПТ в целом и ее составляющих в частности, при этом наиболее эффективной считается технология, позволяющая извлечь со снимков максимум информации при минимальных трудовых и материальных затратах.

Существующие технологии автоматизированного дешифрирования растительности не позволяют с высокой степенью достоверности выделить в автоматизированном режиме все растительные сообщества на исследуемых территориях ООПТ острова Сахалин, поэтому необходимо усовершенствовать технологию выделения растительных сообществ, учитывающую региональную специфику.

Целью усовершенствованной технологии автоматизированного дешифрирования космических снимков является повышение качества выделения различных растительных сообществ в составе экосистем особо охраняемых природных территорий. Реализация усовершенствования технологии осуществлялась на примере острова Сахалин.

Выявление растительных сообществ ООПТ позволит определить породный состав древостоев и оконтурить зоны с различным геоэкологическим состоянием,

участки территорий ООПТ, где нарушался заповедный режим, а также участки, требующие усиления охраны. Полученная практико-ориентированная геоинформационная основа необходима для анализа состояния объектов ООПТ, создания картографических материалов, а также для принятия управленческих решений в области охраны окружающей среды.

## 2.2 Разработка принципиальной технологической схемы и технологии автоматизированного дешифрирования растительных сообществ

Предлагаемая принципиальная технологическая схема автоматизированного дешифрирования растительных сообществ ООПТ с использованием геоинформационных технологий включает шесть подсистем, функционально связанных друг с другом (рисунок 2.1).

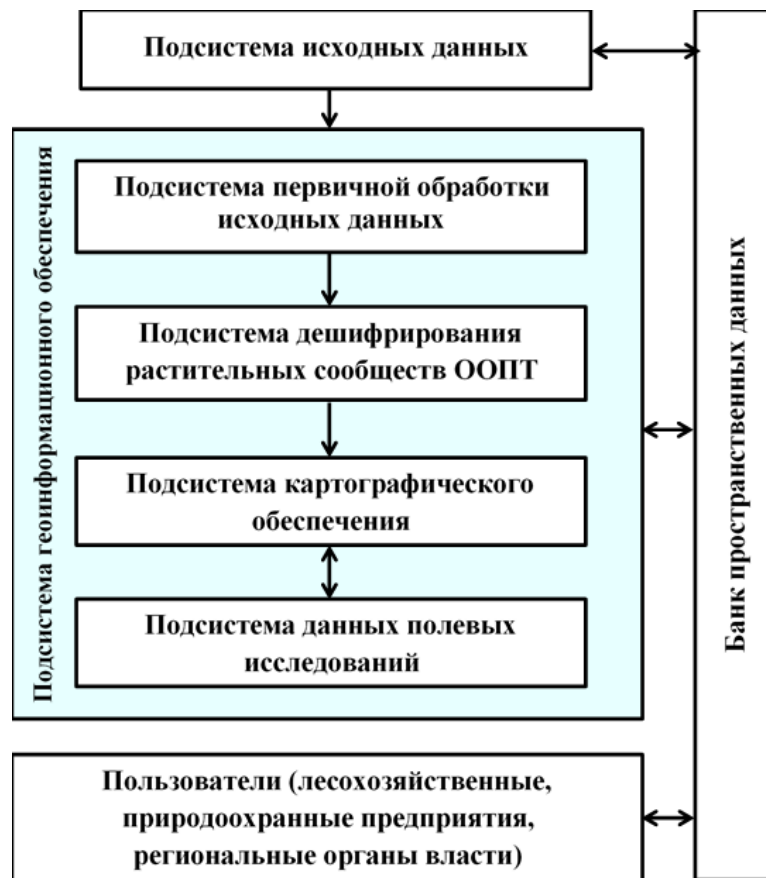


Рисунок 2.1 – Принципиальная технологическая схема автоматизированного дешифрирования растительных сообществ ООПТ с использованием геоинформационных технологий

### 2.2.1 Подсистема исходных данных

*Подсистема исходных данных* включает программное обеспечение, позволяющее собирать данные многозональных космических съемок, лесоустроительные материалы, карты топографической основы и прочие материалы, содержащие информацию об исследуемых объектах ООПТ.

Целесообразность и эффективность использования данных многозональных космических изображений при исследовании растительных сообществ ООПТ обусловлены следующими их свойствами:

- оперативностью, благодаря которой актуальные космические снимки пользователи получают в течение нескольких часов после выполнения съемки со спутника;
- периодичностью, которая зависит от частоты съемки объекта со спутника, обусловленной характеристиками орбиты (от нескольких раз в час с геосинхронных орбит до нескольких раз в месяц с низких орбит);
- ретроспективностью, которая обеспечивается сбором и хранением информации в архивах. На текущий момент собраны большие массивы данных космосъемки, обеспечивающие анализ разновременных снимков одной и той же местности и обнаружение изменений наблюдаемых объектов. Так, например, серия данных Landsat, начатая в 1972 г., является самой продолжительной непрерывной записью изменений поверхности Земли и используется для многократных наблюдений за земной поверхностью. Глобальный архив данных Landsat содержит покрытие практически всей поверхности Земли, причем некоторые регионы, в том числе и вся территория России, отсняты многократно. Ежедневно на наземные приемные пункты поступает до 400 изображений поверхности Земли, которые доступны пользователям круглосуточно;
- обзорностью, получаемой за счет одновременной съемки огромных площадей, что обеспечивает своевременность наблюдений на участках, расположенных на значительном отдалении друг от друга;
- объективностью, которая достигается за счет оперативного отображения действительной картины состояния растительности информации, получаемой в определенный момент времени.

Растительные сообщества хорошо выделяются на многозональных изображениях большинства космических систем. Для достижения достоверного выделения растительных сообществ в результате проведения автоматизированного дешифрирования целесообразно использовать данные многозональной космической съемки среднего и высокого пространственного разрешения. Наиболее информативны для дешифрирования растительного покрова спектральнозональные космические снимки, выполненные в зонах спектра 660–720 или 600–700 нм с пространственным разрешением не менее 10–15 м [17, 26].

Многозональные спутниковые изображения систем Landsat и Sentinel соответствуют обозначенным требованиям и в достаточном количестве имеются в свободном доступе (таблица 2.1).

Спутник Landsat-8 пришел на смену своим предшественникам и был выведен на солнечно-синхронную орбиту высотой 705 км 11 февраля 2013 г. Спутниковая система снабжена двумя съемочными комплексами: девятиканальным аппаратом оперативной телевизионной съемки Земли (Operational Land Imager (OLI)) и двухканальным тепловым инфракрасным сенсором (Thermal InfraRed Sensor (TIRS)).

OLI – это датчик типа push-broom с четырехзеркальным телескопом и 12-битным квантованием, собирает данные для видимого, ближнего инфракрасного и коротковолнового инфракрасных спектральных диапазонов, а также для панхроматического диапазона. Тепловизор (TIRS) поддерживает два дополнительных тепловых инфракрасных диапазона. Landsat-8 регулярно получает 725 сцен в день, что позволяет повысить вероятность съемки безоблачных сцен на суше в глобальном масштабе. Ширина полосы съемки для всех каналов равна 185 км, длина полосы съемки – 180 км, периодичность повторного наблюдения составляет 16 суток. Основными областями использования данных, полученных со спутника Landsat-8, являются: сельское хозяйство, геология, лесное хозяйство, предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций, картография, исследование глобальных изменений земной поверхности (заболочивание, опустынивание и т. п.), мониторинг окружающей среды [127, 128, 142].

Таблица 2.1 – Характеристики и соответствие спектральных каналов Landsat-8, Sentinel-2A [128, 138]

Landsat 8 (OLI, TIRS)				Sentinel-2A (MSI S2A)			
Ка-нал	Длина волны $\lambda$ , нм	Разре-шение, м	Зона спектра и назначение	Ка-нал	Длина волны $\lambda$ , нм	Разре-шение, м	Зона спектра и назначение
1	430–450	30	УФ, побережья и аэрозоли	B01	433–453	60	УФ, обнаружение аэрозолей
2	450–510	30	Синий	B02	457,5–522,5	10	Синий
3	530–590	30	Зеленый	B03	542,5–577,5	10	Зеленый
4	630–670	30	Красный	B04	650–680	10	Красный
				B05	697,5–712,5	20	Классификация растительности
				B06	732,5–747,5	20	
				B07	773–793	20	
5	850–880	30	Ближний инфракрасный	B08	773–793	10	Ближний инфракрасный
				B08a	855–875	20	Классификация растительности
				B09	935–955	60	Водяной пар
9	1 360–1 380	30	Перистые облака	B10	1 360–1 390	60	Перистые облака
6	1 570–1 650	30	Коротковолновый инфракрасный	B11	1 565–1 655	20	Различие снега/льда/облаков
7	2 110–2 290	30	Коротковолновый инфракрасный	B12	2 100–2 280	20	Различие снега/льда/облаков
8	500–680	15	Панхроматический				
10	10 600–11 190	100	Дальний инфракрасный				
11	11 500–12 510	100	Дальний инфракрасный				

Запуск спутника Sentinel-2A на солнечно-синхронную орбиту, имеющую среднюю высоту 786 км, был осуществлен европейской пусковой установкой VEGA 23 июня 2015 г. Космический аппарат производит съемку оптико-электронным мультиспектральным инструментом (MSI), который измеряет отраженную яр-

кость Земли с разрешением от 10 до 60 м в 13 спектральных диапазонах – от видимой и ближней инфракрасной (VNIR) до коротковолновой инфракрасной (SWIR). Оптическая конструкция телескопа MSI обеспечивает ширину полосы съемки 290 км, максимальное непрерывное получение изображения составляет 15 км, периодичность съемки составляет 10 суток [137–139].

Многоспектральные изображения со средним пространственным разрешением и широким спектром обзора, получаемые со спутника Sentinel-2A с высокой частотой пролета, позволяют осуществлять исследования в целях оценки земельных ресурсов, обеспечения мониторинга катастрофических природных процессов, мониторинга состояния лесов, а также решать широкий круг задач в области охраны окружающей среды на локальном, региональном, национальном и глобальном уровнях [16, 17, 19, 90, 118, 121, 124, 142, 144].

Из банка данных многозональных спутниковых изображений среднего пространственного разрешения, полученных со спутников дистанционного зондирования Земли Landsat-5–8 и Sentinel-2A в период с 2001 по 2021 г., для анализа были отобраны снимки, удовлетворяющие следующим требованиям: время съемки как в вегетационный период (июнь – сентябрь), так и в зимний период (декабрь – март), отсутствие облачности над исследуемой территорией.

При формировании подсистемы исходных данных дополнительно привлекаются самые различные материалы, дающие дополнительные сведения об исследуемых объектах. Чем лучше мы знаем объекты своего исследования, тем точнее, полнее и достовернее информация, извлекаемая из снимка.

При дешифрировании растительности ООПТ Сахалина в качестве дополнительных данных целесообразно использовать лесостроительную документацию Государственного казенного учреждения «Сахалинские лесничества», включающую в себя таксационные описания на территории лесничеств, ведомости характеристик лесного фонда, планшеты на территории лесничеств, тематические карты-схемы территорий лесничеств.

В случае, когда конечной целью автоматизированного дешифрирования растительных сообществ является получение развернутых данных, таких как, напри-

мер, высота и диаметр ствола, наличие подроста, создание цифровых топографических планов крупного масштаба и т. п., необходимых при проведении таксации лесов [49], подсистема исходных данных дополняется снимками высокого пространственного разрешения. В настоящее время при исследовании природной среды все более востребованными становятся материалы аэрофотосъемки с управляемых и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые обеспечивают координатно-и высотно-привязанной информацией о состоянии поверхности с пространственным разрешением 0,02–0,07 м. Современное состояние беспилотных авиационных технологий, уровень цифровой фотограмметрии позволяют получить пространственные данные на заданные участки территорий в виде конечного цифрового продукта для моделирования геопространства в кратчайшие сроки с достаточными точностными характеристиками [111, 112].

Для достоверности любая карта природы, в том числе карта растительности, которую нам предстоит создать на территорию ООПТ (1 : 50 000–1 : 200 000), как результат автоматизированного дешифрирования растительных сообществ особо охраняемых природных территорий острова Сахалин, должна использовать базовые источники. Такими источниками, помимо перечисленных выше ведомственных документов, аэро- и космических снимков и т. п., являются топографические карты тех же масштабов.

Топографические карты имеют ряд достоинств перед аэрокосмическими изображениями, к таковым можно отнести точность математической основы и поясненные условными обозначениями видимые элементы местности. Применение в качестве основы аэрокосмических снимков требует их предварительного преобразования и топографического дешифрирования, но вместе с тем они дают более информативный материал для локализации тематического содержания.

Выполнение стационарных и полустационарных детальных исследований, как правило, сопровождается крупномасштабным картографированием (1 : 5 000–1 : 25 000). Топографическая основа такого масштаба необходима для отражения закономерностей распределения дробных категорий растительного покрова. Объектами картографирования при этом служат ассоциации и их группы.

### 2.2.2 Подсистема первичной обработки исходных данных

*Подсистема первичной обработки исходных данных* включает преобразование цифровых пространственных данных в стандартные формы, сканирование топографических и тематических карт, геометрическую привязку отсканированных изображений и снимков, обработку цифровых моделей рельефа (ЦМР), ввод обработанных данных в геоинформационную систему, анализ описательных и пространственных данных, включающий в себя систематизацию данных, выбор масштаба картографирования, выбор временного интервала исследования [10, 11].

Наземными приемными пунктами принимаются данные ДЗЗ в необработанном, или, как еще принято называть, «сыром» виде. Для возможности использования полученных пространственных данных в решении поставленных задач необходимо провести их предварительную обработку, включающую в себя один или несколько уровней обработки пространственного изображения. От уровня обработки материалов космических съемок на подготовительном этапе зависят их свойства и содержание, которые будут использованы для организации технологического процесса дешифрирования космических снимков.

Предварительную обработку данных ДЗЗ обычно выполняют наземные приемные комплексы. Предварительная обработка включает декодирование потока данных, принятого со спутников по радиоканалу, извлечение изображений и служебной информации, сопровождающей снимок, а также обработку (геометрическую, радиометрическую, атмосферную коррекцию изображения, географическую привязку снимка) и представление информации (растровое изображение поверхности Земли, а также файл с пространственными данными о снимке) в форматах хранения.

Выполнение всех требований к виду предоставляемой космической информации, как правило, – задача довольно сложная. Так, для определения уровня обработки данных ДЗЗ существует общепринятая модель, описанная NASA во время работы над программой Earth Observing System (EOS) [92, 121]. В этой модели все процедуры радиометрической и геометрической коррекции распределяются по нескольким уровням обработки данных со съемочных систем: с уровня 0 для необра-

ботанных («сырых») изображений до уровня 3–4 для скорректированных и ортотрансформированных снимков в заданной проекции.

Широкое распространение в основных мировых космических агентствах получила международная классификация уровней обработки и представления данных ДЗЗ, разработанная Комитетом по спутниковым наблюдениям Земли (CEOS) (таблица 2.2) [8].

Таблица 2.2 – Международная классификация уровней обработки и представления данных из космоса (по Беленову, 2009) [8]

Стандартный уровень обработки данных ДЗЗ	Описание стандартного уровня обработки данных ДЗЗ	Формат файлов изображений	Формат метаданных
0	Необработанные данные съемки, содержащие информацию с ПЗС-датчиков без каких-либо преобразований. Информация может иметь сжатие и является базовой для формирования последующих уровней обработки. Продукт данного уровня недоступен пользователям	Не определен	Не определен
1А	Радиометрическая коррекция искажений, из-за разницы в чувствительности отдельных ПЗС-датчиков сканирующей системы. Используются для фотограмметрической обработки строгими методами	RAW, TIFF	CEOS, XML
1В	Радиометрическая и геометрическая коррекция систематических ошибок ПЗС-датчиков сканирующей системы, в том числе панорамные искажения, вызванные кривизной Земли, колебанием высоты орбиты спутника. Применена абсолютная радиометрическая калибровка. Материалы обрабатываются строгими и аппроксимационными методами	RAW, TIFF	CEOS, XML, ASCII
2А	Изображения приведены к стандартной картографической проекции без использования наземных опорных точек. Проецирование изображения выполняется на среднюю плоскость или используется глобальная цифровая модель рельефа (DEM) с шагом на местности 1 км	GeoTIFF	XML, ASCII
2В	Изображения приведены к стандартной картографической проекции с использованием наземных опорных точек. Проецирование изображения выполняется на среднюю плоскость или используется глобальная цифровая модель рельефа (DEM) с шагом на местности 1 км	GeoTIFF	XML, ASCII
3А	Изображения проецируются в заданную картографическую проекцию путем ортотрансформирования с использованием модели снимка, опорных наземных точек и модели рельефа местности. Полученные изображения являются ортоскорректированными. Изображения, как правило, нарезаются на стандартные картографические листы	GeoTIFF	XML, ASCII
3В	Объединение изображений уровня 3А в единые бесшовные растровые мозаики, покрывающие большие территории	GeoTIFF	XML, ASCII

Каждый последующий уровень, начиная с уровня 1А, базируется на предыдущем, с добавлением определенных радиометрических или геометрических преобразований.

Если данные поставляются с геодезической привязкой в системе WGS-84, основными операциями первичной обработки снимков являются проведение атмосферной коррекции и обрезка изображения области исследования.

### 2.2.3 Подсистема дешифрирования объектов особо охраняемых природных территорий

*Подсистема дешифрирования объектов ООПТ* позволяет выявить структуру растительных сообществ, входящих в состав ООПТ, обнаружить изменения структуры, выявить геоэкологическое состояние экосистем.

Определение структуры лесных растительных формаций производилось на примере государственных природных заказников «Макаровский» и «Долинский», которые создавались для сохранения растительных биотопов и включают наибольшее количество растительных сообществ, характерных для острова Сахалин.

В 1991 г. в Президиум Сахалинского областного совета народных депутатов поступило письмо, подписанное специалистами природоохранных организаций Макаровского района, в котором обосновывалась необходимость создания лесохотничьего заказника на землях гослесфонда в районе, где существуют уникальные биотопы горных лесов, распространен ряд редких видов растений.

03.12.1992 было принято решение малого совета Сахалинского областного Совета народных депутатов за № 316 «О создании комплексного лесохотничьего заказника областного значения «Макаровский»» [75], а 27.07.2000 постановлением губернатора Сахалинской области «Об утверждении Положения о государственном природном биологическом заказнике регионального значения «Макаровский»» статус заказника был изменен [82].

Современный статус заказника был утвержден постановлением администрации Сахалинской области № 3-па «Об утверждении новой редакции Положения о государственном природном биологическом заказнике областного значения «Макаровский»» от 09.01.2003 [80]. Границы заказника еще раз изменились после ком-

плексного экологического обследования, проведенного в 2007 г., в котором автор принимал непосредственное участие [76].

Целью создания заказника является поддержание целостности естественных сообществ, восстановление природных комплексов горной тайги, сохранение и воспроизводство редких и исчезающих видов животных, занесенных в Красные книги Российской Федерации и Сахалинской области.

Территория, которую занимает заказник «Макаровский», располагается в Макаровском районе Сахалинской области к востоку от осевой линии Камышового хребта и объединяет верхнюю часть бассейнов рек Макарова, Лесной и Лазовой, имеет общую площадь 39 148 га (рисунок 2.2).

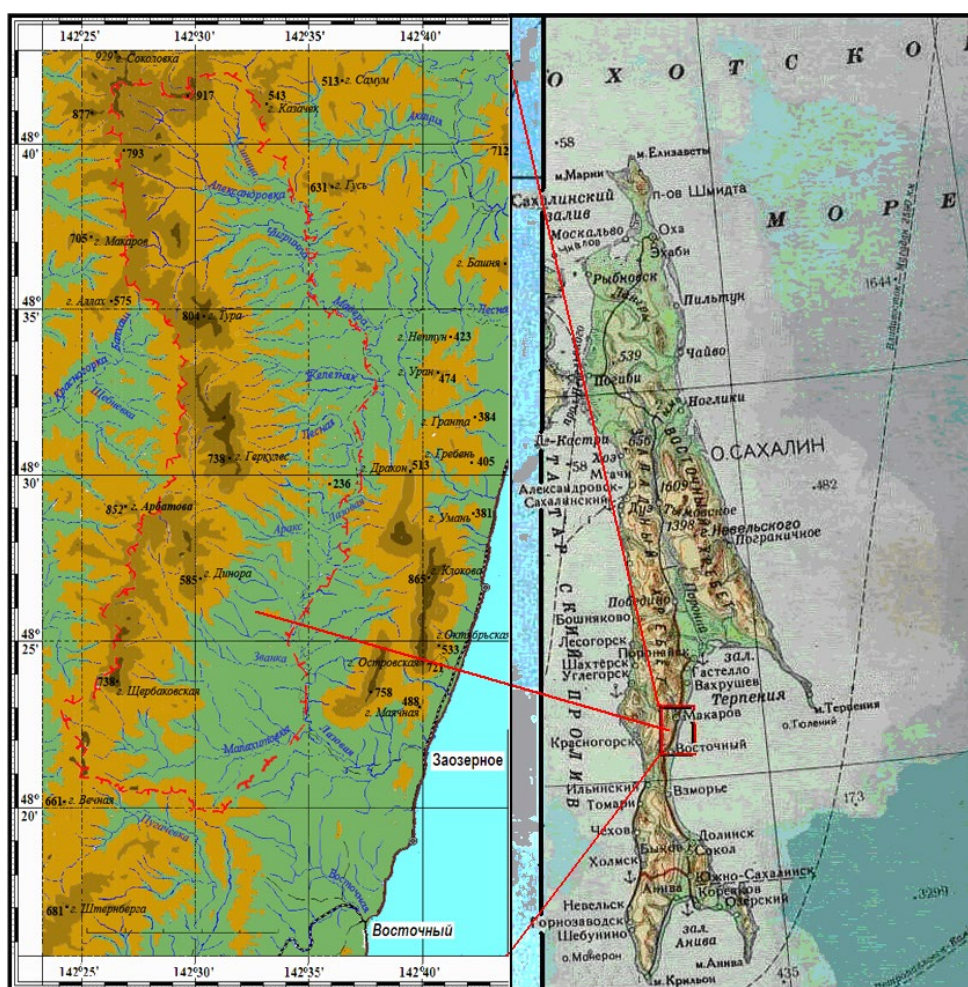


Рисунок 2.2 – Заказник «Макаровский» на карте Сахалина

Географическим положением предопределяются природные условия на территории заказника, которая полностью располагается в поясе умеренного климата северного полушария Земли с таежной растительностью.

Распространение специфических видов флоры и растительных сообществ обусловлено островным положением. На территории распространены характерные для Сахалина виды: сахалинская пихта, каменноберезовые леса с зарослями курильского бамбука и самостоятельное сообщество курильского бамбука [44].

На территории заказника являются коренными и господствуют елово-пихтовые леса, произрастающие на горно-лесных бурых почвах. В долинах рек распространены интразональные ольхово-ивово-тополевые леса на лугово-дерновых оглеенных заболоченных почвах. В поймах рек, под пологом леса, наблюдается гигантизм травяной растительности: борщевик, лабазник, японский белокопытник, осоки. Вырубки и гари занимает курильский бамбук, образующий заросли высотой до 2 м [89].

В горах отчетливо выражена высотная поясность растительного покрова. Нижняя часть склонов гор покрыта пихтово-еловыми лесами. Выше 400 м к темнохвойным деревьям примешивается каменная береза, которая формирует каменноберезовый пояс, начиная с отметки 600 м. Подлесок березняков составляют заросли бамбука и различные кустарники: кедровый стланик, голубика. Выше, начиная с высоты 700–800 м, каменноберезовые леса сменяются зарослями кедрового стланика.

В 1988 г. в Долинском районе Сахалинской области с целью охраны и воспроизводства изюбра, а также охраны среды был создан охотничий заказник «Изюбровый» [74]. В декабре 2002 г. заказник был переименован в государственный природный биологический заказник областного значения «Изюбровый» с назначением профиля «биологический» и целью поддержания целостности естественных сообществ, охраны, сохранения и воспроизводства редких и исчезающих видов птиц и животных, занесенных в Красные книги Российской Федерации, Сахалинской области, а также сохранение неповторимых, эстетически ценных лесных ландшафтов [81]. В сентябре 2008 г. название государственного природного биологического заказника областного значения «Изюбровый» было изменено на государственный природный комплексный заказник регионального значения «Долинский».

Государственный природный комплексный заказник регионального значения «Долинский» расположен в предгорьях Долинского хребта (рисунок 2.3) [28]. Для территории заказника площадью 9 176 га характерен преимущественно горный рельеф. На климат заказника сильное воздействие оказывает Охотское море: весна и осень наступают поздно, лето прохладное и короткое (160–170 дней), зима многоснежная и менее суровая, чем в северной и центральной частях Сахалина со средней температурой января  $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ , устойчивый снежный покров обычно образуется в третьей декаде ноября, а его разрушение начинается в апреле.

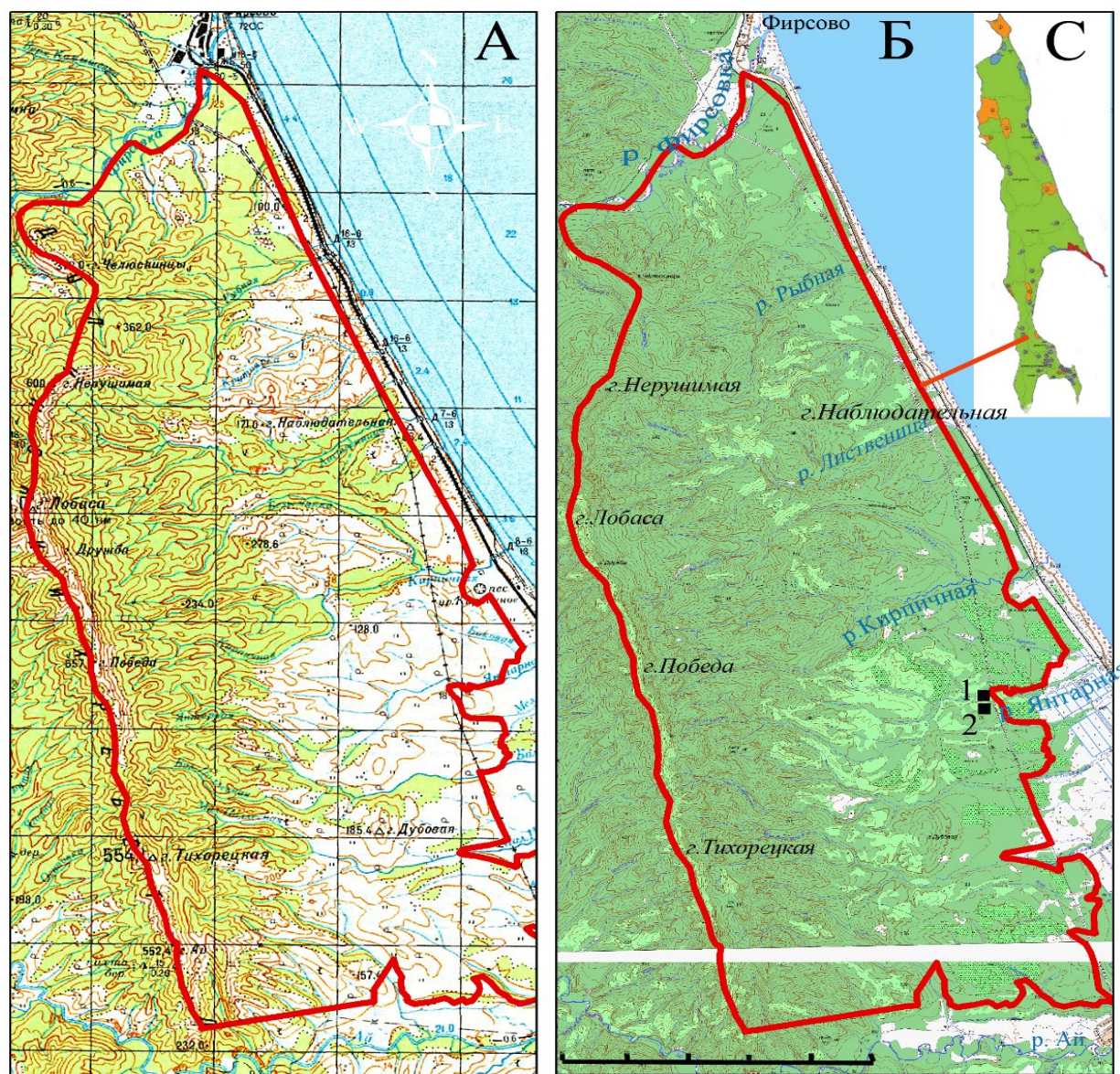


Рисунок 2.3 – Заказник «Долинский» на карте Сахалина

На территории заказника произрастают темнохвойные пихтово-еловые леса, каменноберезовые леса, долинные интразональные ивово-ольховые леса, бамбучники и кустарники (черника, багульник, малина), кедровый стланик, искусственные посадки хвойных пород (сосна, лиственница).

Для проведения исследовательских работ, направленных на выявление структуры формаций, входящих в состав ООПТ, обнаружение изменений структуры, выявление геоэкологического состояния формаций, обнаружения техногенно-измененных объектов, были использованы имеющиеся в свободном доступе разновременные многозональные спутниковые изображения среднего пространственного разрешения, полученные со спутников дистанционного зондирования Земли Landsat 5–8 и Sentinel-2A в период с 2001 по 2021 г. [128, 138] (таблица 2.3), топографические карты разного масштаба, цифровая модель рельефа (ALOS), а также данные многолетних геоботанических исследований.

Таблица 2.3 – Спектральные диапазоны каналов Landsat-8 и Sentinel-2A спутников и их пространственное разрешение

Спектральная зона	Спутник / сенсор / пространственное разрешение, м			
	Landsat 8 / OLI / 30		Sentinel-2A / MSI / 10	
	№ канала	Спектральный диапазон, нм	№ канала	Спектральный диапазон, нм
Зеленая	3	530–590	B03	542,5–577,5
Красная	4	630–670	B04	650–680
Ближняя ИК	5	850–880	B08	773–793

Перед дальнейшими преобразованиями, в процессе выполнения тематической обработки разновременных многозональных космических изображений, посредством применения функционала GIS выполнялась обработка снимков: обработки растров, векторизации и подсчета пространственно-количественных показателей (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Технологическая схема обработки многозональных космических изображений

Для работы с векторными и растровыми данными, а также для определения пространственно-количественных показателей использовались программные продукты ArcGIS [117]. Выделение структурных компонентов опирается на классификацию спектральных признаков, свойственных всем формациям, выделенным на исследуемой территории.

Обработка и анализ состава, распределения, состояния, изменения растительности исследуемой территории на основе данных космических съемок представ-

ляют собой комплекс довольно сложных задач вследствие наличия неоднородного рельефа, значительного количества растительных сообществ, близости спектральных характеристик некоторых древесных пород. В связи с этим, для повышения качества и достоверности распознавания и выполнения дешифрирования разновременных снимков территории возникает необходимость комплексирования нескольких методов в определенной последовательности:

- для классификации растровых изображений были применены последовательно методы классификации без обучения (метод классификации без обучения ISODATA (Итерационная самоорганизующаяся методика анализа данных)) и с обучением (способ максимального правдоподобия);

- растительный покров затененных склонов северных экспозиций в условиях горного рельефа не поддается корректному автоматизированному дешифрированию, поэтому изображения этих территорий дополнительно контролировались и определялись визуально с учетом данных полевых геоботанических наблюдений;

- для контроля результатов автоматизированного дешифрирования, выявления границ участков с различным породным составом древостоев, мест лесных рубок в качестве дополнительного метода использовался нормализованный дифференциальный вегетационный индекс (NDVI) [108, 142], который является показателем количества фотосинтетически активной биомассы. Расчет индекса NDVI основан на способности хлорофилла листьев высших сосудистых растений максимально поглощать излучение в красном (RED) диапазоне электромагнитного спектра и максимально отражать излучение клеточными структурами листа в ближнем инфракрасном (NIR) диапазоне электромагнитного спектра и определяется по следующей формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (2.1),$$

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра;

RED – отражение в красной области спектра [41].

Значения вегетационного индекса NDVI могут варьироваться в диапазоне от  $-1$  до  $+1$ . Отрицательные значения индекса, как правило, получаются для облаков, воды и снега, близкие к нулю значения индекса в основном получаются для горных пород, песка и обнаженной почвы. Значения от  $0,2$  до  $0,3$  функции NDVI соответствуют кустарникам и лугам, а значения от  $0,6$  до  $0,8$  – умеренным и тропическим лесам [41, 47].

Тематическое дешифрирование с целью выявления структуры растительных формаций, входящих в состав ООПТ, обнаружения изменений структуры, выявления геоэкологического состояния формаций, обнаружения техногенно-измененных объектов традиционно является важнейшим направлением использования данных ДЗЗ. Продукты тематической обработки космических изображений, карты растительности широко используются для определения, анализа, мониторинга изменения качественных и количественных характеристик природных объектов на исследуемой территории.

Для визуального выявления растительных формаций ООПТ был использован метод комбинирования данных Landsat-8 и Sentinel-2A разных спектральных каналов и получения «псевдоцветного» изображения. Для успешного дешифрирования также подбирались снимки разных сезонов, что повысило надежность оценки породного состава лесов.

О геоэкологическом состоянии растительного покрова можно судить по составу древостоев. В растительном покрове территории должен сформироваться, характерный для нее, коренной лес. В заказнике «Долинский» таковым является пихтово-еловый лес, за исключением речных долин.

В качестве материалов для анализа состава лесных сообществ заказника «Долинский» были отобраны спутниковые снимки, полученные мультиспектральным сканером MSI S2A (спутник Sentinel-2A) и Landsat в период с 2001 по 2021 г. Отсутствие облачности над исследуемым районом являлось основным критерием отбора изображений. Обработка снимков выполнялась в ПО ArcGIS.

Для обеспечения максимальной различимости исследуемых объектов по отношению к фону использовались различные комбинации спектральных каналов. В ряде случаев комбинации каналов применялись последовательно с целью поэтапного отделения объектов и их свойств. Успешность дешифрирования также в значительной степени зависит от сезона съемки [100]. Для получения более детальной характеристики породного состава лесов были использованы разносезонные снимки, причем наиболее информативными являлись снимки осеннего сезона, полученные в период окончания вегетации, пожелтения листвы и листопада (конец сентября – октябрь). Для успешного дешифрирования также весьма полезны снимки зимнего (январь, февраль) и весеннего сезона (апрель, май), позволяющие выявить восстановление деревьев хвойных пород под пологом лиственных (березы, лиственницы).

При визуальном дешифрировании в комбинации каналов 11-8-4 (SWIR – NIR – RED) на летнем многозональном снимке темнохвойные леса имеют темно-зеленый цвет, ярко-зеленый (салатовый) присущ лиственным лесам, а смешанные леса, в зависимости от доли хвойных деревьев, отличаются различными переходными оттенками зеленого цвета (рисунок 2.5).

Темнохвойные леса на летнем снимке в синтезе каналов 8-4-3 (NIR-RED-GREEN) имеют темно-красный цвет, долинные лиственные ивово-ольховые леса окрашены в ярко-красный цвет, смешанные леса, в зависимости от долей, приходящихся на хвойные и лиственные породы, имеют переходные оттенки между ярко- и темно-красным цветами (рисунок 2.6).

Использование разносезонных снимков позволило получить более детальную характеристику растительных формаций ООПТ.

Посредством визуального дешифрирования разновременных синтезированных снимков (SWIR-NIR-RED, NIR-RED-GREEN) были выделены эталонные участки, на которых группы пикселей изображения имеют наиболее близкие спектральные характеристики.

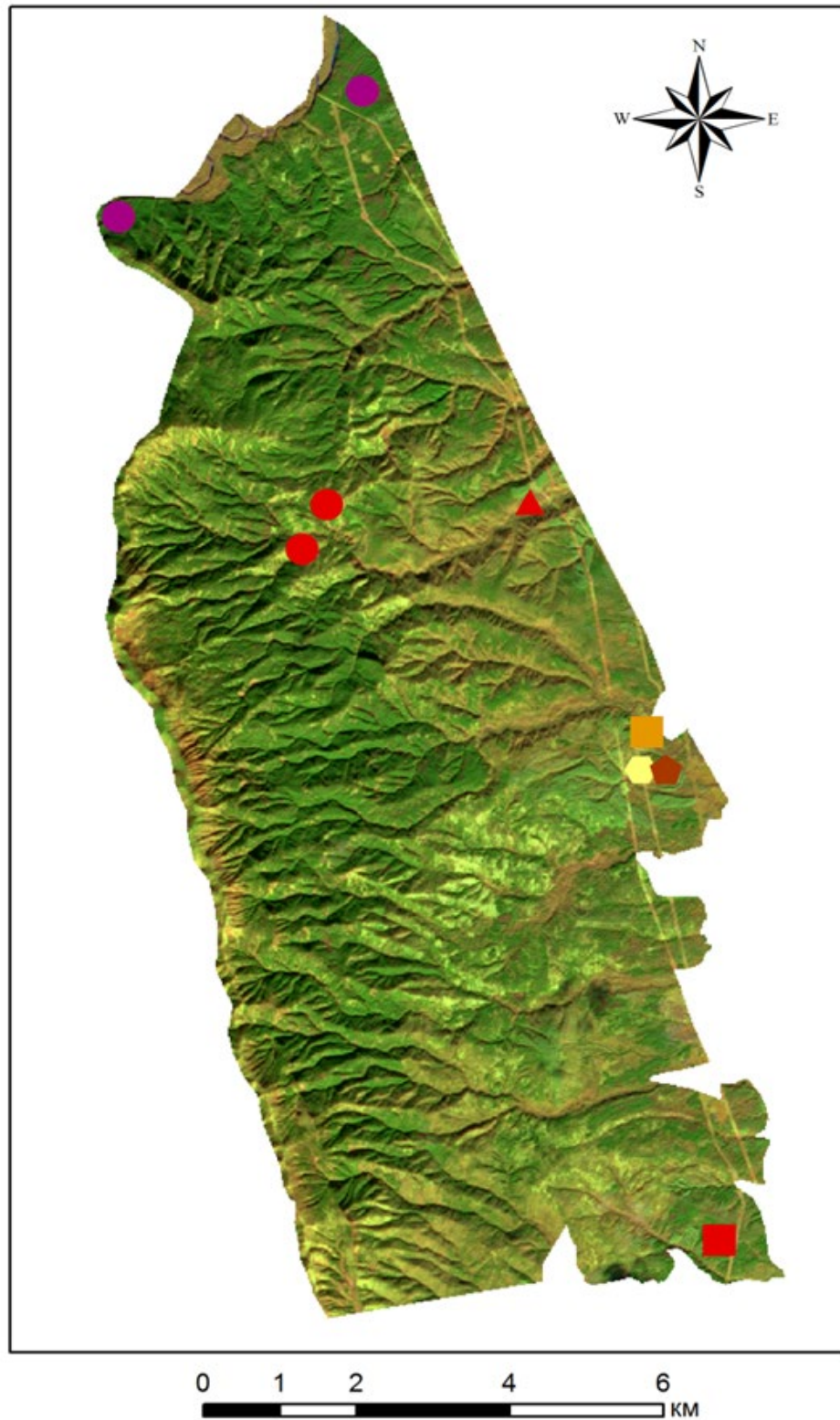


Рисунок 2.5 – Синтезированный снимок территории заказника «Долинский»  
SWIR-NIR-RED (каналы 11-8-4) от 16 июля 2020 г.



Рисунок 2.6 – Синтезированный снимок территории заказника «Долинский»  
NIR-RED-GREEN (8-4-3) от 16 июля 2020 г.

#### 2.2.4 Подсистема картографического обеспечения

В связи с появлением и развитием в мире инфраструктур пространственных географических данных (GDI) карты получили новую роль – в виртуальных средах они зачастую стали использоваться в качестве интерфейса [40]. При этом доступность данных, необходимых для анализа состояния растительности, а также топографических карт зачастую оставляет желать лучшего: необходимо произвести сложные процедуры запроса. Для быстрого получения качественных картографических изображений и топоосновы следует сформировать подсистему картографического обеспечения дешифрирования растительных сообществ ООПТ с собственным банком данных, содержащим разномасштабные карты лесов (рисунок 2.7).

Формирование подсистемы картографического обеспечения предполагает сбор, хранение топографических карт растровых и векторных, материалов дистанционного зондирования Земли, тематических карт и другой информации на исследуемую территорию. В процессе сбора осуществляются анализ и первичная обработка входящих данных (источник, точность, исходный масштаб и т. д.), определяются их объем, структура и формат. Обработанные материалы вводят в базы данных. В процессе обработки спутниковые изображения и топокарты переводятся в цифровой вид; выполняется преобразование цифровых пространственных данных в стандартные форматы; в случае необходимости производится предварительная геопривязка космических снимков. Для выполнения картографических работ разработано и используется разнообразное программное обеспечение [64].

Материалы о природных условиях исследуемой территории, хозяйственной деятельности (картографический материал, результаты полевых исследований, лесоустроительная документация) и результаты тематической обработки космических снимков являются основой формирования картографической базы данных, необходимой для решения проблемы оперативного создания карт состояния компонентов экосистем ООПТ, а также автоматизации этого процесса с помощью геоинформационного картографирования.



Рисунок 2.7 – Технологическая схема подсистемы картографического обеспечения дешифрирования растительных сообществ

### 2.2.5 Подсистема геоинформационного обеспечения

По своему назначению специализированная ГИС должна обеспечивать реализацию концепции территориального распределения земель по назначению, и позволять представлять информацию в графическом виде для интерпретации и принятия решений. ГИС обеспечивает комплексное отражение текущей ситуации в пределах исследуемой ООПТ посредством графического отображения на географической карте различной тематической информации, что значительно облегчает восприятие этих данных и повышает эффективность оценки состояния и принятия решений.

Используемая в исследовании ArcGIS [117] обладает широким набором средств анализа пространственно-распределенных данных и обработки атрибутивной информации, что дает возможность применить ее для моделирования процессов, развитых в экосистеме в целом и в пределах растительных сообществ, и анализа геоэкологического состояния на примере «Макаровского» заказника.

В качестве первичной информации в ГИС-проекте используются:

- план-схема государственного биологического заказника (1 : 100 000);
- топооснова (1 : 25 000) (рисунок 2.8);
- план лесонасаждений Пореченского лесничества (1 : 25 000);
- космические снимки Landsat территории заказника с разрешением 15 и 30 м и Sentinel с разрешением 10 м.

Для создания различных тематических карт, предназначенных для анализа состояния сообществ в заказнике «Макаровском», использовался космический снимок, привязанный к топооснове масштаба 1 : 25 000.

На основе электронной картографической базы данных, содержащей информацию о современном состоянии заказника «Макаровский», созданной в процессе работы над диссертацией, на основе ГИС с использованием информационных технологий нами решены следующие задачи:

- а) векторизована топооснова (1 : 25 000) и полигоны для построения карты растительности (1 : 25 000);
- б) обобщены и нанесены на карту атрибутивные данные;
- в) подобрано модельное и программное обеспечение, предназначенное:
  - 1) для выявления закономерностей и особенностей, характерных для почвы и растительных организмов, рельефа и растительности;
  - 2) получения различных тематических раскрасок (выбор изображений) в зависимости от задач исследования для визуального анализа;
  - 3) иллюстрации тематических подборок исследовательских материалов фотографиями с соответствующей привязкой к местности.

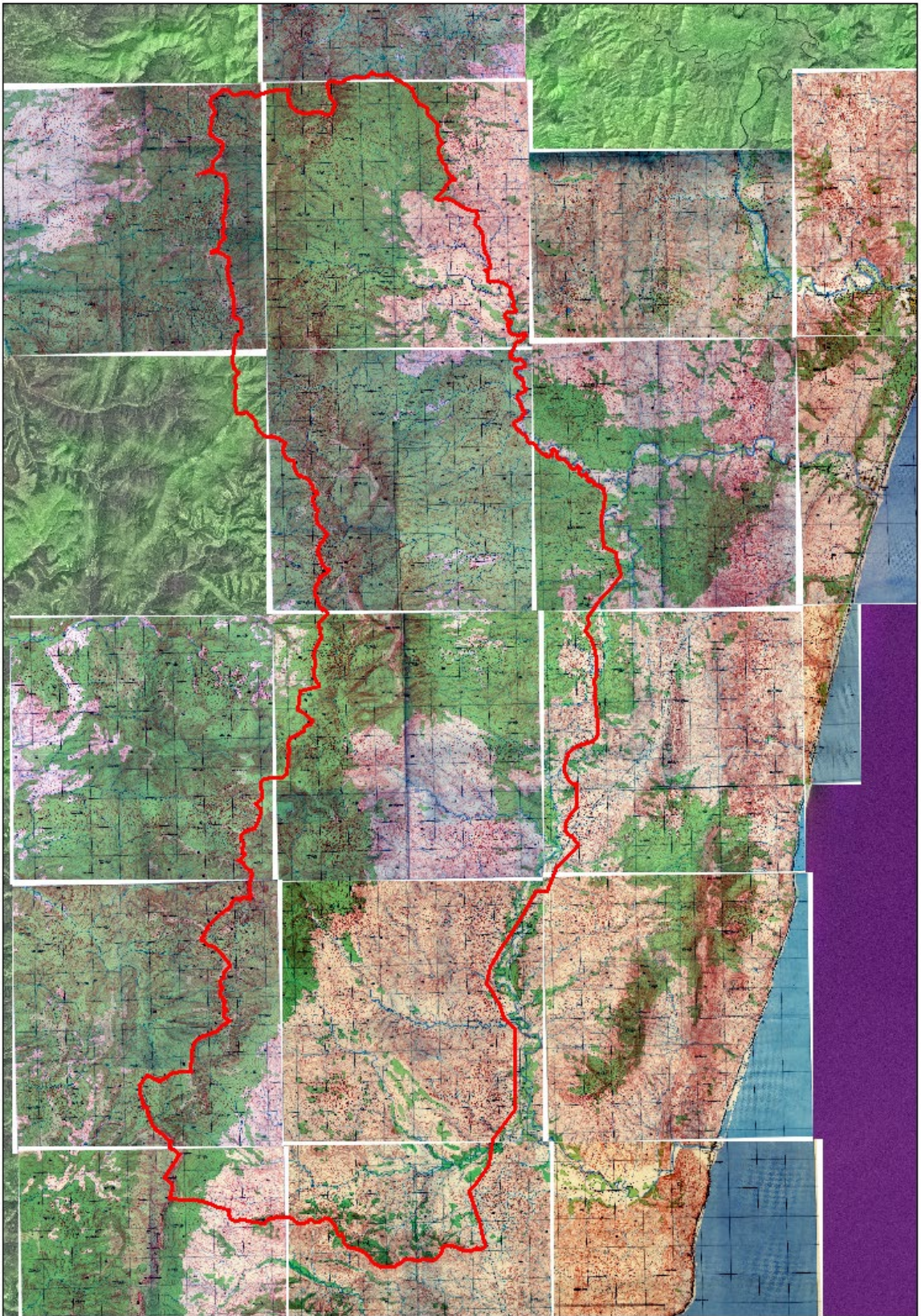


Рисунок 2.8 – Привязка листов топоосновы масштаба 1 : 25 000 на территорию «Макаровского» заказника в ГИС-проекте

Технология преобразования бумажных карт в электронные осуществлялась по следующей схеме:

- а) сканирование;
- б) работа в Photoshop:
  - 1) оцифровка отдельных слоев;
  - 2) масштабирование для привязки в единые координаты;
  - 3) склейка;
- в) работа в ArcGIS:
  - 1) подготовка отдельных слоев ГИС;
  - 2) сбор всех слоев в одну карту.

Для проекта были использованы инструментальные средства ArcGIS. ГИС для уровня конечного пользователя дает возможность создавать электронные карты (атласы) как композиции картографических слоев.

При работе над диссертацией с целью привязки отдельных объектов (например, площади учета леса) на космических снимках территории заказника «Макаровский» к топографической основе использовалась GPS – спутниковая система для высокоточного определения координат статичных и движущихся объектов.

Для обеспечения возможности совмещения разновременных снимков и представления результатов исследований динамики техногенного воздействия в виде карты следует выполнить геометрическое трансформирование снимков в единую картографическую проекцию и привязку к координатной системе. Необходимость этой процедуры дополнительно диктуется следующими причинами:

- размер пиксела снимка Landsat-8 (OLI) имеет различные размеры по горизонтали и вертикали, из-за чего экранное изображение (с квадратными пикселями) растягивается по горизонтали по сравнению с изображением на карте, затрудняя ориентировку и интерпретацию;
- принятая методика классификации разновременных снимков, включающая перенос векторных полигонов, ограничивающих обучающие выборки, на снимки

за разные даты, требует, чтобы снимки были приведены к одной проекции и системе координат;

– для оценки качества классификаций используются координатно-привязанные точки наземных наблюдений.

Для координатной привязки снимков за основу взята проекция и система прямоугольных координат Гаусса – Крюгера, принятая для обзорно-топографических карт.

Для пересчета географических координат в прямоугольные использовалась известная формула [15], позволяющая рассчитать координаты Гаусса-Крюгера с точностью до сантиметров:

$$X = s_m + (1/2r^2) N \cos B \sin B;$$

$$Y = (1/r) N \cos B + (1/6 r^3) \cos^2 B (1 - t^2 + h^2),$$

где  $s_m$  – длина дуги меридиана в метрах;  $r$  – число градусов в 1 радиане;  $B$  – широта точки;  $N = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}$ ;  $t^2 = \tan^2 B$ ;  $h^2 = e'^2 \cos^2 B$ ;  $a = 6\,378\,245$  м (большая полуось эллипсоида Красовского);  $e^2 = 0,006\,738\,525$  (квадрат первого эксцентриситета эллипсоида);  $e'^2 = 0,006\,693\,422$  (квадрат второго эксцентриситета эллипса).

Координаты точек наблюдений, определенные в поле с помощью GPS-приемников (эллипсоид WGS-84), также пересчитаны на эллипсоид Красовского и в систему координат Гаусса – Крюгера.

Фрагменты топографических карт на изучаемый участок отсканированы с разрешением 300 dpi, для их координатной регистрации в качестве аналога проекции Гаусса – Крюгера. Среднеквадратическая ошибка при выполнении преобразования карты в проекцию Меркатора составила менее 20 м. Затем фрагменты снимков на изучаемый район трансформировались в картографическую проекцию и привязывались к топографической карте по выбранным опорным точкам со средней квад-

ратической ошибкой менее 20 м. В итоге суммарная ошибка трансформирования не превысила размера пиксела.

### 2.2.6 Подсистема полевых данных

Полевые исследования являются обязательным элементом выявления объектов ООПТ с использованием материалов космической съемки. Основная задача данных исследований заключается в том, чтобы установить дешифровочные признаки по спектральной яркости для растительных формаций ООПТ и подтвердить достоверность результатов, полученных при автоматизированном дешифрировании космических снимков. Полевые исследования проводятся на выбранных эталонных участках.

На космическом снимке, выполненном при помощи системы Landsat, при визуальном дешифрировании нами были выделены эталонные участки с однородными по оптической плотности группами пикселов, принадлежащих разным растительным сообществам. Правильность априорного выделения эталонных участков впоследствии была подтверждена проведенными в заказнике полевыми исследованиями. Изначально на территории заказника «Макаровский» были выделены эталонные участки в пределах основных растительных сообществ, определенных на космическом снимке (рисунок 2.9):

- темнохвойных лесов;
- каменноберезовых лесов;
- долинных лесов;
- зарослей кедрового стланика;
- альпийских лугов и гольцовых тундр;
- луговых сообществ долин.

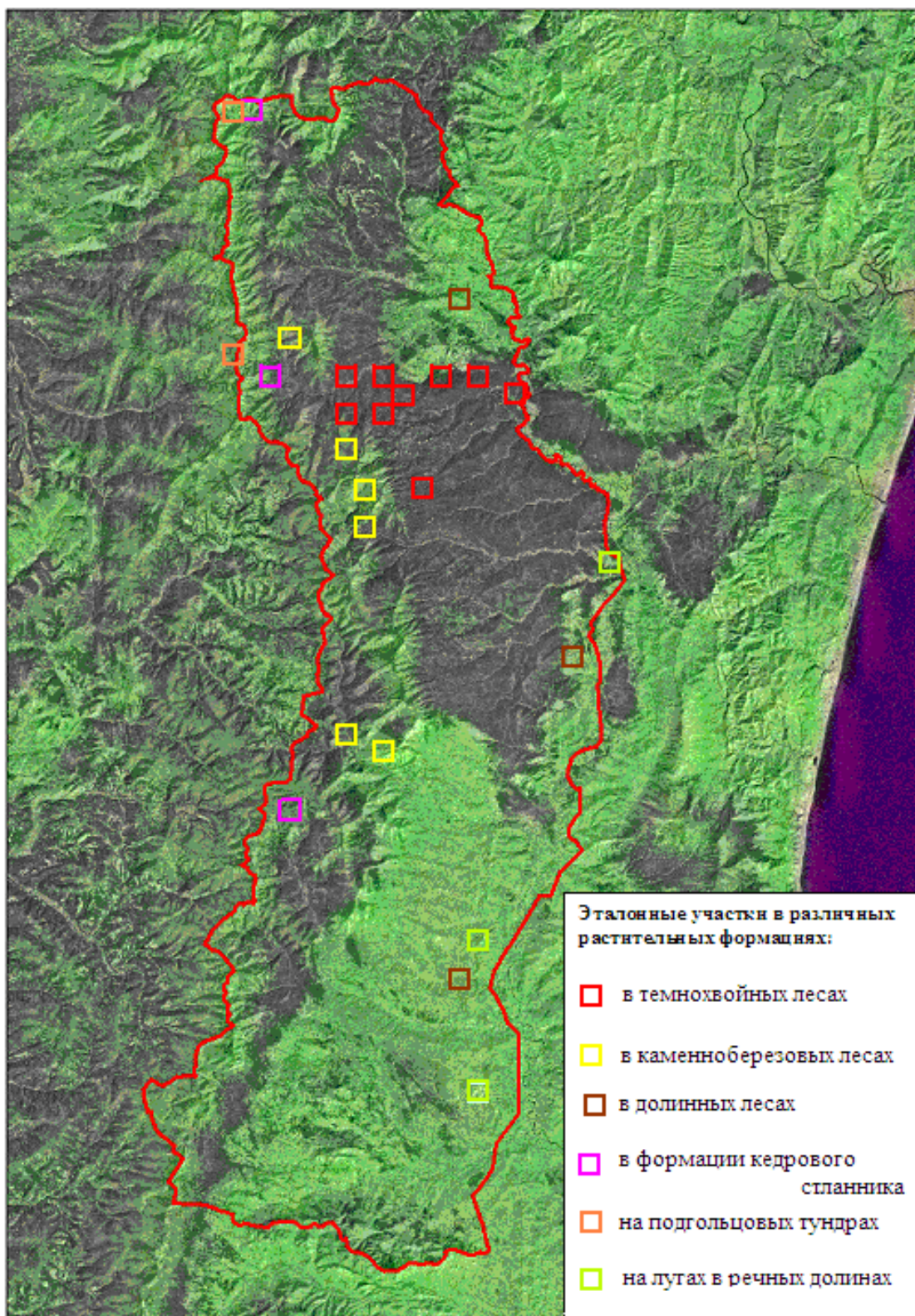


Рисунок 2.9 – Схема расположения эталонных участков, выбранных для наземных исследований различных растительных формаций на территории заказника «Макаровский»

Всего было выделено девять эталонных участков в темнохвойных лесах, шесть – в каменноберезовых лесах, три – в долинных лесах, три – в формации кедрового стланика, два – на подгольцовых тундрах с альпийской растительностью и три – в пределах луговых сообществ долин. В пределах каждого эталонного участка были разбиты площадки, на которых были выполнены геоботанические исследования по общепринятым методикам [1, 72, 88, 120].

Таким образом, усовершенствована технология дешифрирования растительных сообществ особо охраняемых природных территорий по космическим снимкам на примере острова Сахалин, представленная в общем виде технологической схемой (рисунок 2.10).

Для отслеживания динамики геоэкологической обстановки за определенный промежуток времени из баз данных (БД) выбираются несколько спутниковых изображений одного и того же исследуемого района, полученных с определенной периодичностью  $dT$ . Пусть изображение 1 получено в момент времени  $T$ , изображение 2 получено в момент времени  $T + dT$ , изображение 3 получено в момент времени  $T + 2dT$  и т. д. (изображение  $n$  получено в момент времени  $T + (n - 1) dT$ ).

Таким образом, мы имеем возможность подсчитать в процентном отношении прирост территорий, на которых отмечались изменения ландшафтов за определенный интервал в исследуемом районе. Космические снимки накапливаются и хранятся в БД ГИС, а в случае обнаружения существенных изменений подбираются крупномасштабные материалы космических снимков на территорию исследуемой ООПТ.

После классификации разновременные изображения накладывают одно на другое, совмещают по опорным точкам и выявляют произошедшие изменения посредством вычитания. Результирующее изображение территории, на которой произошли изменения за период времени  $dT$ , покажет положительную или отрицательную динамику состояния растительного покрова.



Рисунок 2.10 – Технологическая схема дешифрирования растительных сообществ особо охраняемых территорий по космическим снимкам (красным выделены усовершенствованные блоки)

Анализ происходящих изменений позволяет оценить геоэкологическую обстановку и дать рекомендации для решения различных практических задач, например, определять пораженность территории в результате негативного воздействия (распространение короеда-топографа) и темпы разрастания изменений за временной интервал  $T + dT$ . Оценивая результаты, полученные для данного интервала, можно составлять карты увеличения изменений. Эти карты могут сравниваться с материалами картографического обеспечения (архивы тематического дешифрирования, карты топоосновы).

ArcGIS позволяет собирать, хранить и обрабатывать большое количество атрибутивной информации [22, 102, 117]. В базу данных можно включить всевозможные справочники и нормативные документы, а также дополнить систему специальными модулями [1, 56, 72, 88, 123, 146].

## Выводы по разделу 2

Системный анализ результатов проведенных исследований растительных сообществ, которые являются основными объектами ООПТ, находящихся в различном геоэкологическом состоянии, позволил сформировать принципиальную технологическую схему выявления растительных сообществ и определения границ их распространения. Анализ исследований, проведенных по технологической схеме, показал, что определение спектральных характеристик объектов ООПТ подтверждается результатами комплексных исследований на эталонных площадках, характеризующих растительные сообщества.

Принципиальная технологическая схема автоматизированного дешифрирования объектов ООПТ представляет технологию, основанную на использовании геоинформационного программного обеспечения, которая включает шесть подсистем, функционально связанных друг с другом:

– *подсистему исходных данных*, включающую данные многозональных космических съемок, лесоустроительных материалов, топографические карты;

– *подсистему первичной обработки исходных данных*, позволяющую преобразовывать цифровые пространственных данные в стандартные форматы, геометрическую привязку и пр.;

– *подсистему дешифрирования объектов ООПТ*, обеспечивающую выявление структуры распределения растительных сообществ, входящих в состав ООПТ на основе классификации спектральных признаков, обнаружение изменений этой структуры и выявление геоэкологического состояния формаций;

– *подсистему картографического обеспечения*, предназначенную для сбора и хранения топографических и тематических карт;

– *подсистему геоинформационного обеспечения*, которая обеспечивает комплексное отражение текущей ситуации за счет графического отображения различной информации, привязанной к топографической карте исследуемой территории, что значительно облегчает восприятие этих данных. Используемая в работе ArcGIS использует достаточно большой набор средств анализа пространственных данных и обработки атрибутивной информации. В случае необходимости подсистема приспособлена к расширению за счет использования иного программного обеспечения, совместимого с ArcGIS;

– *подсистему полевых данных*, обеспечивающую достоверность результатов дешифрирования растительных сообществ ООПТ по спектральной яркости, полученных при автоматизированном дешифрировании космических снимков.

Таким образом, усовершенствована технология дешифрирования растительных сообществ особо охраняемых природных территорий по космическим снимкам на примере острова Сахалин.

### 3 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЕШИФРИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

#### 3.1 Характеристика растительных сообществ особо охраняемых природных территорий

Для качественной практической реализации усовершенствованной технологии дешифрирования растительных сообществ особо охраняемых природных территорий по космическим снимкам на примере острова Сахалин сформирован набор характеристик эталонных объектов, представленных численными значениями спектральных признаков, характерных для каждого из растительных сообществ, произрастающих на исследуемой территории, а также обезлесенных территорий. Исследования производились в заказнике «Долинский».

Первоочередной задачей перед выполнением процедуры классификации растительных сообществ для выделения их распределения по территории является исключение из изображения всех объектов, которые не принадлежат к классам растительности, т. е. обособление и удаление безлесных территорий.

При дешифрировании снимков территории заказника «Долинский» среди непокрытых лесом площадей выделены следующие категории.

- 1 Трасса нефтегазовых трубопроводов.
- 2 Луга.
- 3 Кустарники.
- 4 Болота.
- 5 Вырубки.
- 6 Водные поверхности.

Перечисленные категории на космических снимках выделяются по следующим признакам:

1 Трассы трубопроводов резко выделяются на фоне лесной растительности. На этапе строительства, как правило, трассы абсолютно лишены растительности. Через несколько лет после завершения строительных работ трассу на участках, проходящих в местах, где нет древостоев, трудно отличить от окружающей территории.

2 Луга на снимках отображаются ровным однообразным фототоном. Дешифрирование осуществляют по комплексным признакам и местоположению участков, характерному для луговых сообществ. Например, ровный серый тон на берегу реки. Отличить суходольный луг от заливного на изображении возможно по характеру более темного фототона последнего.

3 Распространение кустарников зачастую носит куртинный характер. Изображения отдельных кустов на аэрокосмических снимках имеют форму небольших по размеру кругов. Крупные тени от кустарников отсутствуют даже на границах с пустошами.

4 Болота, как правило, покрыты редкой низкорослой древесной растительностью, имеют серый однообразный, иногда волнистый рисунок, форма неправильная, вклинивание в покрытую лесом площадь бессистемное. Древесная растительность чаще всего располагается рядами, создавая своеобразный сложный рисунок, который встречается исключительно на изображениях болота.

5 Вырубки имеют фототон, отличающийся от лесопокрытой территории. Отличительный признак вырубок – их правильные четкие границы, свидетельствующие об искусственном происхождении. Отмечаются куртины растущего леса. В отличие от гарей, куртины располагаются равномернее. Лесосеки сплошной лесосечной рубки выделяются правильной прямоугольной формой.

6 Водные поверхности. Резко отличаются от поверхностей, покрытых растительностью, по отражательным способностям и, как следствие, хорошо обособляются по фототону на изображении.

Часть территорий, не покрытых лесной растительностью (гари, вырубки, трассы трубопроводов), свидетельствует об активном антропогенном воздействии и значительной измененности естественных растительных сообществ.

Оценка состояния растительных сообществ по космическим снимкам является довольно трудоемкой, потому что исследуются объекты, обладающие крайне сложным и разнообразным набором спектральных характеристик на одном изображении.

При оценке состояния лесных растительных сообществ по данным дистанционного зондирования характеристика лесного сообщества определяется преимущественно составом, возрастом, классом бонитета, полнотой древостоя, состоянием леса в биологическом и санитарном отношении.

*Определение состава леса.* Разница между спектральными характеристиками деревьев различных пород хорошо изучена и описана в работах многих исследователей [45, 46, 96, 109, 125, 119, 130, 136, 145], поэтому достаточно известна. Разница спектральных характеристик хвойных и лиственных пород резко выражена и ощутима при любом дешифрировании. Лиственные древостои, как правило, имеют на снимке более светлый тон, чем хвойные. Разницу же в интенсивности фототона проекций кроны единичного дерева: ели, пихты или сосны – нельзя обнаружить при хорошем разрешении снимков. По-видимому, более светлая окраска хвои сосны по сравнению с елью и пихтой объясняется спецификой отражения света от листовых пластинок хвои.

*Отличие по форме крон.* Кроны елей и пихт – острые в верхней части, густые, низко прикрепленные, имеют большое протяжение сверху вниз, по общей форме приближаются к конусу. Крона березы – овальная в верхней, части, густая, низко прикрепленная, имеет большое протяжение сверху вниз, по общей форме приближается к параболоиду. Крона осины – резко закругленная, иногда приплюснутая в верхней части, густая, высоко прикрепленная, имеет небольшое протяжение сверху вниз. Крона сосны – закругленная (овальная) в верхней части, редкая, высоко прикрепленная, имеющая небольшое протяжение сверху вниз, по общей форме похожа

на параболоид. Главные отличия крон – цвет, форма и размеры. Прочие отличия на космических снимках не отражаются.

Успешность реализации технологии дешифрирования космической информации неразрывно связана с использованием априорной информации, в качестве которой выступают базы знаний и картографические материалы. Правильная постановка задач интерпретации данных космического зондирования должна вытекать из четкого представления сущности анализируемых объектов и процессов, свойственных этим растительным сообществам [6, 7, 9, 36, 60, 97].

На выделенных эталонных участках в заказнике «Долинский» были проведены геоботанические исследования: разбиты площадки размером 30 × 30 м с координатной привязкой их центральных точек для изучения состава растительных сообществ. Результатом проведенных геоботанических работ стало выделение следующих растительных сообществ и безлесных территорий:

- темнохвойные пихтово-еловые леса;
- каменноберезники;
- долинные ивово-ольховые леса;
- лесные культуры лиственницы и сосны;
- бамбучники;
- безлесные территории.

В темнохвойных лесах заказника «Долинский», как на всем юге острова Сахалин, древостой образует пихта сахалинская (*Abies sachalinensis*). Обычно в этих лесах постоянным спутником пихты является ель аянская (*Picea ajanensis*) (рисунок 3.1) [59]. В некоторых местах встречаются участки с примесью каменной березы (*Betula ermanii*). Пихтово-еловые леса представлены в заказнике II и III классами бонитета.

Широкое распространение пихтово-еловых лесов на горных склонах отмечается повсеместно независимо от их крутизны и экспозиции. На пониженных участках рельефа леса представлены зеленомошниковыми типами, на горных склонах – кустарниковыми типами. На дренированных террасах речных долин развиваются папоротниковые пихтово-еловые леса [54, 55, 89].



Рисунок 3.1 – Пихтово-еловое растительное сообщество  
в заказнике «Долинский». Фото автора

Следующей по распространенности в заказнике «Долинский» является растительная формация каменноберезников и березовых лесов с примесью пихты и ели, находящихся в различных стадиях сукцессии [54, 89]. Коренные каменноберезовые леса занимают пояс горных склонов выше пихтарников и образуют самостоятельный высотный пояс растительности. Доминирует в составе древостоев береза каменная (*Betula ermanii*) (рисунок 3.2). На месте вырубленных и сгоревших темнохвойных лесов активно происходят сукцессии: обезлесенные территории сначала занимают вейниковые луговые сообщества, затем появляется редколесье и куртины каменных берез, а после их смыкания под пологом появляются ель и пихта.



Рисунок 3.2– Каменноберезовое растительное сообщество в заказнике «Долинский». Фото автора

В заказнике «Долинский» интразональные долинные леса распространены небольшими участками по долинам рек, занимают они не более 6–8 % площади заказника (рисунок 3.3). Очень высока водоохранная и берегозащитная роль этих лесов.



Рисунок 3.3 – Ивово-ольховые долинные леса. Фото автора

На территории заказника «Долинский» отмечаются значительные по площади участки искусственных насаждений лиственницы (рисунок 3.4). Лиственничники распространены на заболоченных низинах, примыкающих к рекам. Гористый характер большей части территории заказника не способствует широкому развитию болотных комплексов. В заказнике встречаются участки с посадками культур лиственничников, располагающихся на равнинных и предгорных территориях. Лиственничные леса территории в основном имеют искусственное происхождение. Посадки были произведены на месте темнохвойных лесов, сведенных в свое время японцами на строительные нужды и для обеспечения работы Долинского целлю-

лозно-бумажного завода. Также посадки лиственницы осуществлялись на месте елово-пихтовых лесов, погибших в начале 20-х гг. XX в. во время инвазий японского короеда и сибирского шелкопряда.



Рисунок 3.4 – Посадки культуры лиственницы в заказнике «Долинский».

Фото автора

В заказнике есть растительные сообщества сосны (*Pinus sylvestris* L.), которая является интродуцированной породой, встречающейся на незначительных участ-

ках. Приемлемые условия произрастания сосны в заказнике существуют лишь в местах, защищенных от холодных морских ветров. Кроме этого, почвы с тяжелым механическим составом не позволяют достичь культурам сосны своих потенциально возможных морфометрических параметров, следовательно, формировать высокобонитетные и качественные насаждения (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Посадки культуры сосны в заказнике. Фото автора

Курильский бамбук (*Sasa kurilensis*) является светолюбивым видом и предпочитает открытые, освещенные места для произрастания. В составе темнохвойных лесов занимает участки с разреженными древостоями с малой сомкнутостью крон. Темнохвойные леса с бамбучниками формируются в горных условиях. Курильский бамбук также распространен в каменноберезниках Долинского хребта. Заросли курильского бамбука нередко составляют самостоятельное растительное сообщество, занимающее участки, укрываемые в зимний период снежным покровом значительной мощности (2 м и более), рисунок 3.6.



Рисунок 3.6 – Бамбуковая формация. Фото автора

Безлесные территории в заказнике в основном представлены участками трассы трубопровода проекта «Сахалин-2», на которые приходится около 1 % всей территории. Растительность за пределами полосы землеотвода претерпела незначительные изменения, при этом отмечается частичное усыхание хвойных древостоев на границе трассы, что обусловлено проявлением «краевого эффекта», вызванного из-

менениями микроклимата в связи с изменением освещенности и появлением открытых зон (рисунки 3.7, 3.8).



Рисунок 3.7 – Безлесные территории. На заднем плане Долинский хребет.

Фото автора



Рисунок 3.8 – Трасса газопровода. Фото автора

Проведенные геоботанические работы подтвердили правильность выделения эталонных участков на синтезируемых снимках при визуальном дешифрировании. Это позволило включить обозначенные площадки в состав выделов, по которым сформированы обучающие выборки спектральных характеристик для автоматизированного дешифрирования.

### 3.2 Классификатор дешифровочных признаков со спектральными характеристиками растительных сообществ заказника «Долинский»

Контролируемая классификация спектральных характеристик всех пикселей изображений территории заказника «Долинский» была выполнена в трех зонах электромагнитного спектра: «тепловой», «красной» и «ближней инфракрасной». Для этого на изображении выделялись пиксели в пределах эталонных участков, на которых выполнялись наземные исследования. В результате для каждого участка были определены эталоны – совокупности спектральных признаков, задающие один класс пикселей на цифровом снимке. После этого все изображение было разделено на спектральные классы, которые соответствовали определенному растительному сообществу.

В результате классификации методом максимального правдоподобия фрагмента изображения Sentinel-2A выявлено распределение шести типов растительных сообществ и безлесных участков на территории заказника «Долинский».

Облака точек, свойственных отражательным характеристикам выделенных растительных сообществ, размещенных в декартовой системе координат на диаграммах рассеяния, показывают, насколько хорошо разделяются классы в соответствии с избранной для данного исследования обучающей выборкой (рисунок 3.9). Группировки точек на представленных диаграммах рассеяния показали, что спектральные характеристики практически всех растительных формаций имеют положительную корреляцию с характеристиками выборки. Точки на графиках расположены близко друг от друга, что свидетельствует о сильной корреляции, и, как след-

стве, о качественном выделении эталонов для пихтово-еловых, ивово-ольховых лесов, посадок культур лиственницы и сосны.

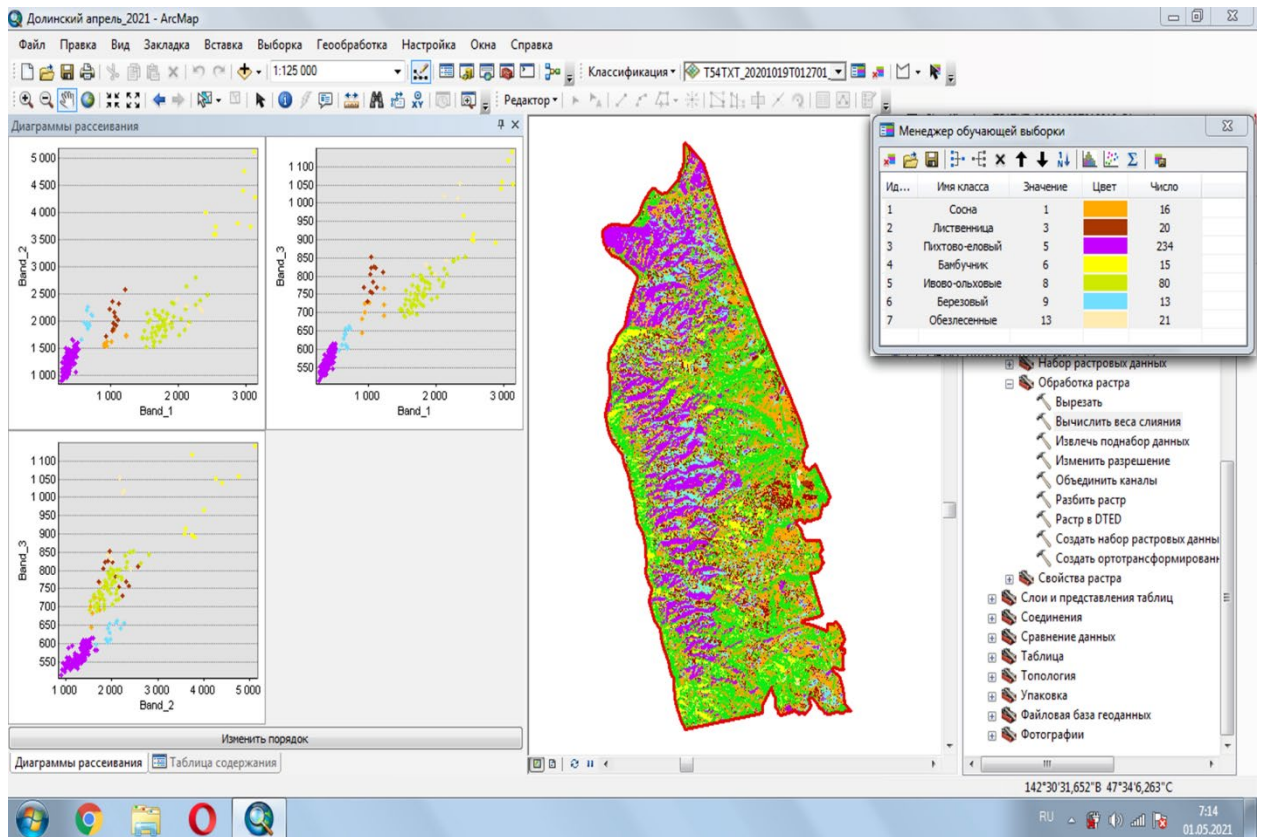


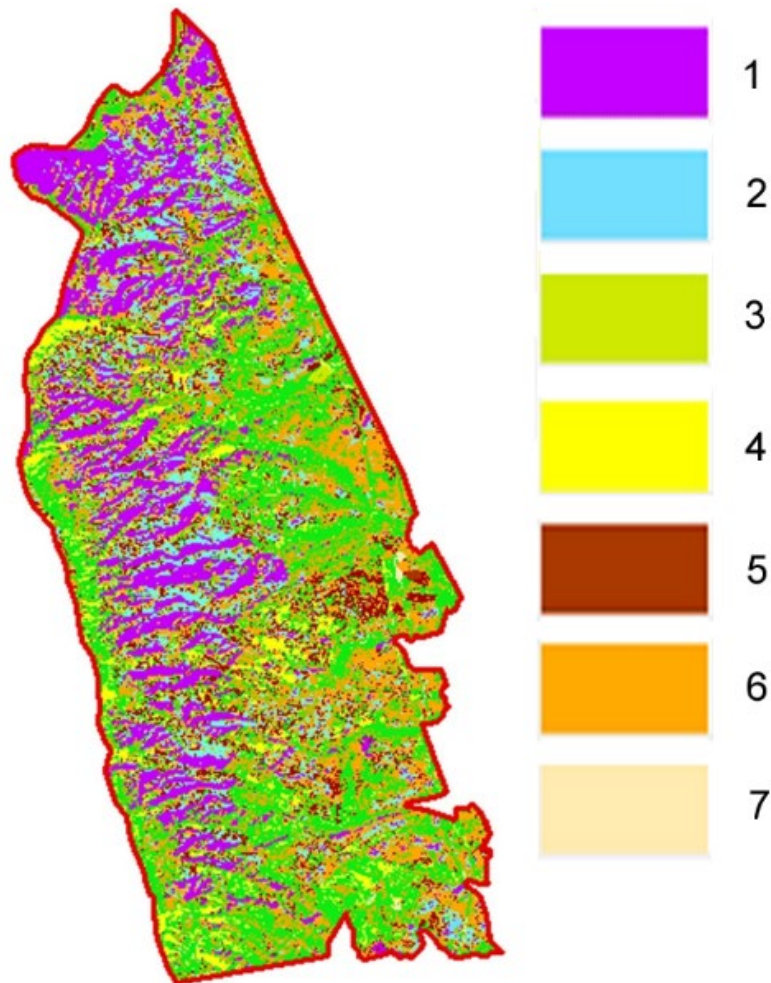
Рисунок 3.9 – Классификация растительных сообществ в заказнике «Долинский» методом максимального правдоподобия

Выбросы точек, которые значительно удалены от общего кластера, показывают, что выделение классов «бамбучники» и «безлесные территории» было выполнено недостаточно точно. Участки, занимаемые этими сообществами, сравнительно небольшие, кроме того, в бамбуковых сообществах зачастую встречается каменная береза (*Betula ermanii*). Требуется выделение новых эталонных участков и замена выделов в обучающей выборке.

Классифицированное изображение, полученное в результате автоматизированного дешифрирования растительных сообществ, легко преобразуется в карту растительности заказника «Долинский». Для этого изменена окраска пикселей вы-

деленных кластеров в соответствии со шкалой цветов, принятой для геоботанических карт [57] (рисунок 3.10).

Результаты работы позволили довольно точно выделять на снимках пихтово-еловые леса, ивово-ольховые долинные леса и посадки хвойных культур сосны и лиственницы.



1 – пихтово-еловые леса; 2 – каменноберезовые редколесья с курильским бамбуком; 3 – ивово-ольховые долинные леса; 4 – бамбучники; 5 – насаждения культур лиственницы; 6 – насаждения культур сосны; 7 – обезлесенные территории

Рисунок 3.10 – Картосхема распространения растительных сообществ в заказнике «Долинский»

Средневозрастные и небольшие участки старовозрастных пихтарников и ельников в заказнике «Долинский» сохранились только в верховьях рек и на крутых склонах Долинского хребта. Горные каменноберезовые редколесья с курильским

бамбуком и долинные ивово-ольховые сообщества сохранились практически без изменений. Большая часть растительного покрова территории заказника существенно трансформировалась в результате пожаров и промышленных рубок. В настоящее время территорию старых гарей и лесосек занимают леса, сформировавшиеся в результате естественного и искусственного лесовосстановления.

Существует множество классификаторов. Наиболее известными являются LULC (Land Use/ Land Cover Classification Sistem) Геологической службы США [113]. По ряду причин, ни один из существующих классификаторов не пригоден для анализа геоэкологического состояния растительного покрова в заказнике «Долинский»: классификаторы, предназначенные для выделения растительных сообществ Калифорнии или средней полосы европейской части России, не подходят для выявления растительных сообществ на острове Сахалин, где видовой состав растительности иной.

В процессе исследования космических снимков с изображениями растительности в разных зонах электромагнитного спектра получен классификатор спектральных признаков растительных сообществ заказника «Долинский» (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Классификатор спектральных признаков растительных сообществ в заказнике «Долинский» (разработка автора)

Растительные сообщества	Средние значения спектральной яркости в различных каналах		
	SWIR	NIR	RED
Темнохвойные елово-пихтовые леса (здоровый лес)	0,065	0,172	0,026
Темнохвойные елово-пихтовые леса (поврежденный лес)	0,105	0,142	0,046
Каменноберезняки	0,091	0,230	0,029
Долинные ивово-ольховые леса	0,186	0,327	0,035
Лесные культуры лиственницы	0,114	0,241	0,029
Лесные культуры сосны	0,139	0,265	0,035
Бамбучники	0,231	0,376	0,040
Безлесные территории	0,243	0,245	0,081

Созданный нами классификатор разработан с учетом спектральных особенностей, свойственных растительным сообществам, распространенным на исследуемой территории.

### 3.3. Оценка геоэкологического состояния исследуемых территорий

Геоэкологической обстановкой определяется состояние растительного покрова и, наоборот, по степени измененности растительности можно судить о состоянии экосистем.

В соответствии с российским законодательством [78] геоэкологическое состояние растительного покрова подразделяют по возрастанию степени нарушенности в результате природно-антропогенного воздействия:

- удовлетворительного (благоприятного) состояния растительного покрова, включающей территории без заметного снижения фотосинтетически активной биомассы. Значения прямых критериев оценки (NDVI) ниже фоновых (менее 5 % площади);

- условно удовлетворительного (неблагоприятного) состояния, с заметным снижением продуктивности фотосинтетически активной биомассы, с обратимыми нарушениями. Значения прямых критериев оценки (NDVI) ниже фоновых (5–20 % площади);

- неудовлетворительного состояния (геоэкологического кризиса) растительного покрова. Значения прямых критериев оценки (NDVI) ниже фоновых (20–50 % площади);

- катастрофического состояния. Значения прямых критериев оценки (NDVI) ниже фоновых (более 50 % площади), с глубокими практически необратимыми нарушениями растительного покрова.

Геоэкологическая обстановка на разных участках заказника «Долинский» оценивалась по степени измененности растительных сообществ. На примере темнохвойных лесов показано, что спектральные характеристики на изображениях участ-

ков с растительностью в разной степени нарушенности существенно отличаются. Нарушенность выявлялась на основе анализа расчетов NDVI. В результате изучения изображения заказника «Долинский» выявлены зоны с различным геоэкологическим состоянием растительного покрова (рисунок 3.11).

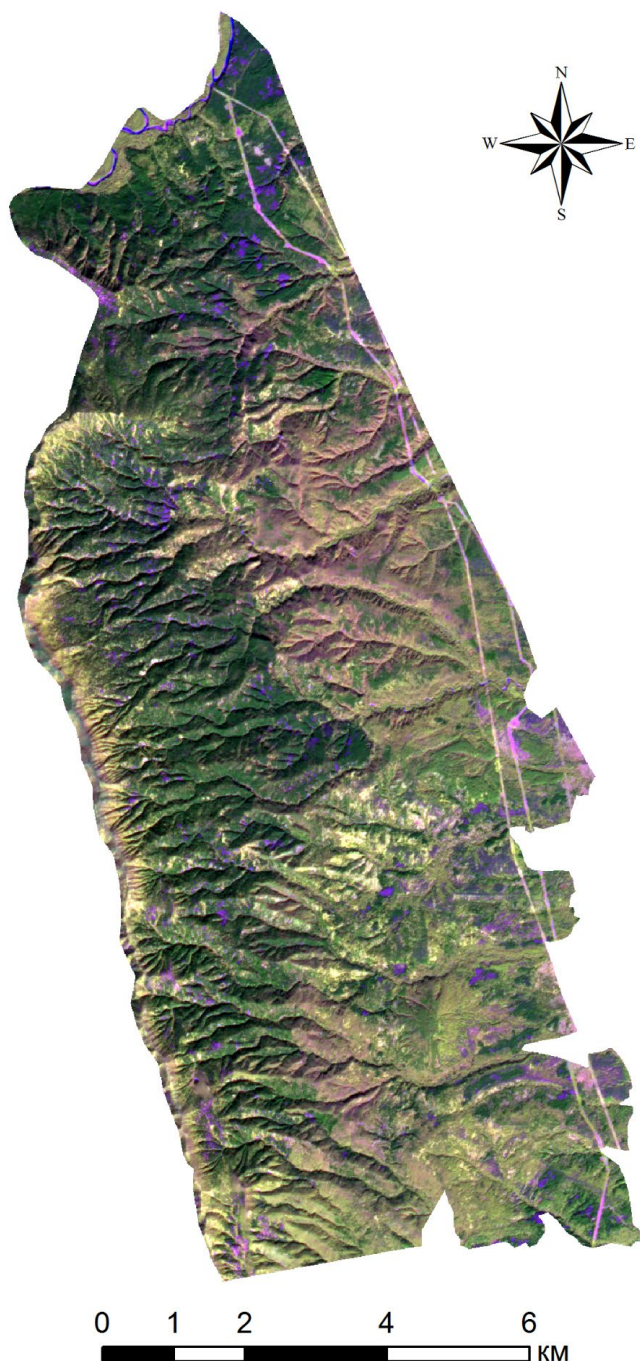


Рисунок 3.11 – Выявление участков с нарушенностью геоэкологического состояния растительного покрова

Вегетационный индекс NDVI имеет значительный динамический диапазон и высокую чувствительность к изменениям в растительном покрове. NDVI характеризует параметры растительности, которые рассчитываются для каждого пиксела снимка в красной и ИК-зонах спектра. Анализ изменений геоэкологического состояния территории заказника «Долинский» выполнен по показателям фотосинтетически активной биомассы за период 2001–2020 гг. (рисунок 3.12). Динамика сукцессии растительности в результате антропогенного воздействия определена и охарактеризована на больших площадях по данным дистанционного зондирования (рисунок 3.13).

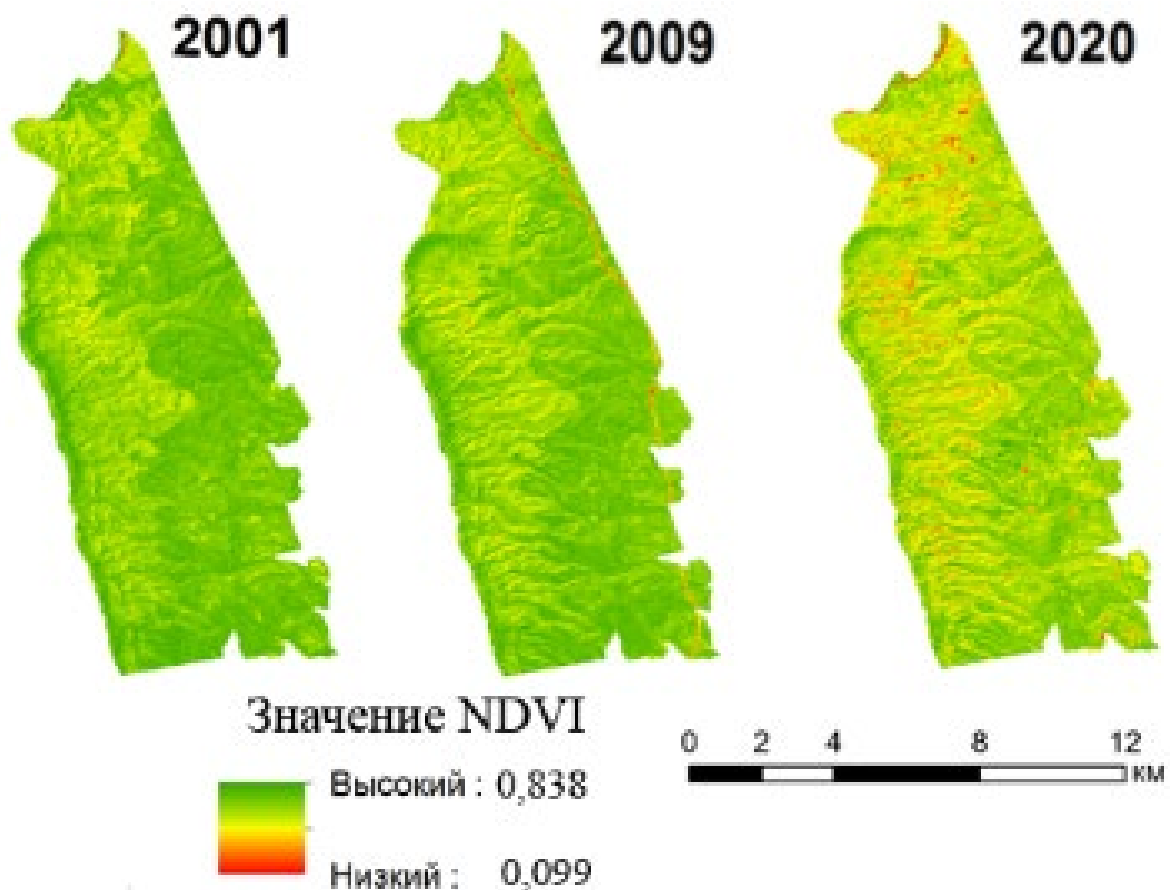


Рисунок 3.12 – Изменение фитомассы растительного покрова в заказнике «Долинский» по NDVI



Рисунок 3.13 – График изменения фитомассы растительных сообществ в заказнике «Долинский» по NDVI в период с 2001 по 2020 г.

### 3.4 Зонирование территории заказника «Долинский» по геоэкологическому состоянию

Выделение участков с одинаковой геоэкологической обстановкой основывается на представлении о том, что для них характерна определенная неоднородность в пределах кластера. Для количественной реализации этого подхода могут быть использованы численные меры неоднородности, используемые в статистическом анализе. Одной из наиболее распространенных мер неоднородности является коэффициент неоднородности.

Количественный показатель, измеряющий неоднородность рисунка, – это коэффициент ландшафтной неоднородности [67], который определяется по формуле

$$K = \frac{m}{m-1} \left[ 1 - \sum_{i=1}^m \left( \frac{S_i}{S} \right)^2 \right], \quad (3.1)$$

где  $m$  – количество составляющих рисунка;

$\frac{S_i}{S}$  — доля площади по составляющим ( $i = 1, 2, \dots, m$ ).

Анализ коэффициента ландшафтной неоднородности, примененный для кластеризованных изображений, позволяет оценить геоэкологическую обстановку в пределах исследуемой территории.

На основании распределения коэффициента ландшафтной неоднородности, а также значений NDVI выделены зоны:

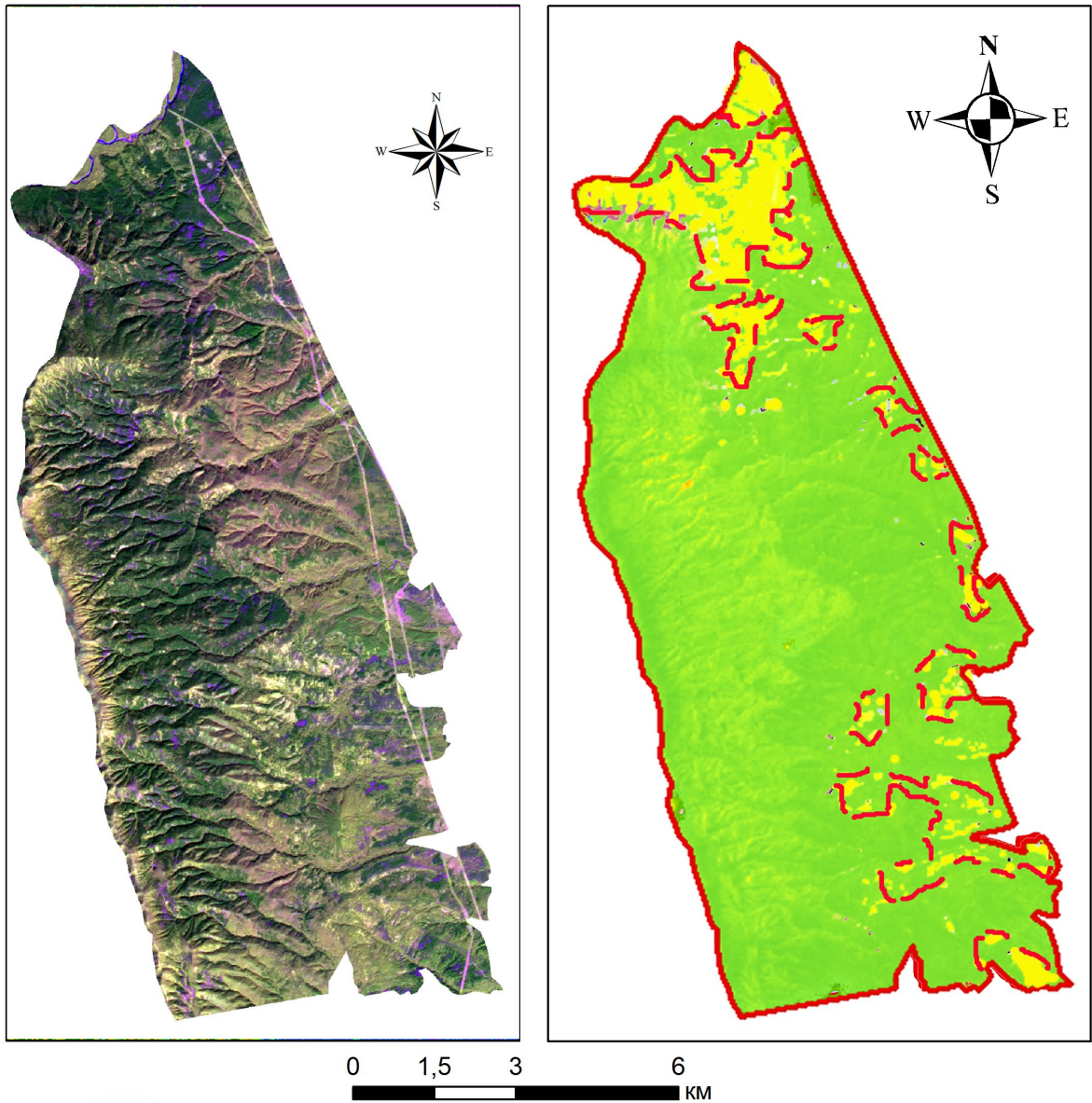
- удовлетворительного (благоприятного) состояния растительного покрова;
- условно удовлетворительного (неблагоприятного) состояния.

Зоны неудовлетворительного состояния, где нарушенность растительного покрова составляет более 20 %, в заказнике отсутствуют [53].

В результате построена карта современного состояния растительных сообществ и схема зонирования территории по степени сложности геоэкологической обстановки (рисунок 3.14).

На территории заказника «Долинский» при проведении исследований обнаружены участки темнохвойных лесов, в которых наблюдаются группы деревьев, поврежденных короедом-топографом. Нарушенность лесных массивов заметно прогрессирует. Требуется принятие срочных мер, о чем извещены организации, которые занимаются мониторингом состояния лесов.

В результате проведенных исследований получены карта современного распределения растительных сообществ и схема зонирования территории заказника «Долинский» по геоэкологическому состоянию, выбраны эталонные участки для ведения экологического мониторинга в заказнике.



### УСЛОВНЫЕ ЗНАКИ

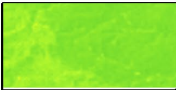



	зона удовлетворительного (благоприятного) состояния (нарушенность – менее 5 %)
	зона условно удовлетворительного (неблагоприятного) состояния (5–20 %)
	граница заказника
	границы зон с различной геоэкологической обстановкой

Рисунок 3.14 – Синтезированный снимок территории заказника «Долинский» и схема зонирования по геоэкологическому состоянию территории

## Выводы по разделу 3

1 Выявлены спектральные характеристики, принадлежащие растительности на эталонных участках, выделенных при визуальном дешифрировании и выполнении необучаемой классификации в заказнике «Долинский».

2 В процессе исследования изображений эталонных участков с растительностью в разных зонах электромагнитного спектра получен классификатор дешифровочных признаков по спектральной яркости для растительных формаций заказника «Долинский», которые являются типичными представителями в южной части острова Сахалин.

3 Геоэкологическая обстановка на различных участках заказника «Долинский» оценивалась по состоянию измененности растительных сообществ. На основании распределения значений коэффициента ландшафтной неоднородности по площади, а также значений NDVI выделены зоны:

- удовлетворительного (благоприятного) состояния растительного покрова;
- условно удовлетворительного (неблагоприятного) состояния.

Зоны неудовлетворительного состояния, где нарушенность растительного покрова составляет более 20 %, в заказнике отсутствуют.

4 В результате проведенных исследований получены карта современного распределения растительных сообществ и схема зонирования территории заказника «Долинский» по геоэкологическому состоянию

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного диссертационного исследования достигнута поставленная цель: усовершенствована технология дешифрирования растительных сообществ особо охраняемых природных территорий по космическим снимкам на примере острова Сахалин, основанная на результатах исследования спектральных характеристик растительности и ее классификации. При решении поставленных задач получены следующие основные теоретические и практические результаты, имеющие важное значение для развития технологии дешифрирования растительных сообществ ООПТ:

1 Выполнен информационно-аналитический обзор современных технологий дешифрирования космических снимков, позволяющих определять параметры состояния растительных сообществ, применительно к ООПТ, на основании которых сделан вывод о необходимости усовершенствовать технологию выделения растительных сообществ.

2 Разработан способ выделения растительных сообществ и создан классификатор их спектральных признаков на основании выделения обучающих выборок в местах проведения геоботанических исследований.

3 Усовершенствована технология для автоматизированного дешифрирования растительных сообществ ООПТ, представленных физиономическими компонентами их экосистем, опирающаяся на распознавание растительности по спектральным характеристикам на основе метода максимального правдоподобия.

4 В результате адаптации с использованием усовершенствованной технологии дешифрирования растительных сообществ, оценено современное состояние растительности в природном заказнике «Долинский» и выполнено зонирование ООПТ по геоэкологическому состоянию.

Полученная технология ориентирована на анализ состояния растительного покрова ООПТ Сахалина, но может быть использоваться для подобных исследований

на других территориях, а также при инвентаризации лесов и определении их хозяйственного назначения (лесопромышленного, рекреационного и др.).

Результаты диссертационного исследования рекомендуются к использованию предприятиями, занимающимися охраной ООПТ, а также для принятия управленческих решений местными и региональными органами власти.

Перспективными направлениями дальнейших исследований является более детальное изучение растительных сообществ в ООПТ, а также выявление взаимосвязи состава древостоев с определенными стадиями сукцессии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Агеенко, А. С. Справочник для таксации хвойных лесов о. Сахалина / А. С. Агеенко. – Долинск : ДальНИИЛХ, 1960. – Текст : непосредственный.
- 2 Анализ состояния лесных земель на острове Сахалин / В. А. Мелкий, А. А. Верхотуров, Р. Н. Сабиров, В. В. Братков. – Текст : непосредственный // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. Серия: Науки о Земле. – 2019. – № 2 (14). – С. 68–73. – DOI 10.25587/SVFU.2019.14.35448.
- 3 Антонович, К. М. Спутниковый мониторинг земной поверхности / К. М. Антонович, А. П. Карпик, А. Н. Клепиков. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2004. – № 1. – С. 4.
- 4 Анучин, Н. П. Лесная таксация / Н. П. Анучин. – Москва : Лесная промышленность, 1977. – 512 с. – Текст : непосредственный.
- 5 Асмус, В. В. Кластерный анализ в обработке данных дистанционного зондирования Земли / В. В. Асмус, А. А. Бучнев, В. П. Пяткин. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Пленарное заседание : сб. материалов (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – С. 71–78.
- 6 Атлас Сахалинской области. Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1967. – Текст : непосредственный.
- 7 Баркалов, В. Ю. Список видов сосудистых растений острова Сахалин / В. Ю. Баркалов, А. А. Таран. – Текст : непосредственный // Растительный и животный мир острова Сахалин : материалы Международного сахалинского проекта. Часть 1. – Владивосток : Дальнаука, 2004. – С. 39–66.
- 8 Беленов, А. В. Стандартные уровни обработки и форматы представления данных ДЗЗ из космоса. Мировой опыт / А. В. Беленов. – Текст : непосредственный // Геоматика. – 2009. – № 4. – С. 18–20.

9 Белоруцева, Е. В. Оценка динамики и прогноз развития негативных процессов на землях сельскохозяйственного назначения Калужской области с применением ГИС-технологий / Е. В. Белоруцева, Д. А. Шаповалов. – Текст : непосредственный // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2009. – № 9 (57). – С. 34–43.

10 Беленко, В. В. Концепция и технология мониторинга земель застраиваемых территорий / В. В. Беленко. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2019. – Т. 63. – № 3. – С. 312–323.

11 Берлянт, А. М. Геоинформационное картографирование / А. М. Берлянт. – Москва : Издательство МГУ, 1997. – 288 с. – Текст : непосредственный.

12 Бондур, В. Г. Методы аэрокосмической диагностики лесных экосистем / В. Г. Бондур, В. Ф. Крапивин, И. И. Потапов. – Текст : непосредственный // Экологические системы и приборы. – 2010. – № 3. – С. 17–26.

13 Бучнев, А. А. Классификация гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли. / А. А. Бучнев, В. П. Пяткин. – Текст : непосредственный // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2019. – Т. 12. – № 5. – С. 536–541.

14 Варламов, А. А. Мониторинг земель сельскохозяйственного назначения нечерноземья с помощью методов дистанционного зондирования земли / А. А. Варламов, С. А. Гальченко, Д. А. Шаповалов. – Текст : непосредственный // Аграрная Россия. – 2014. – № 1. – С. 20–23.

15 Вахрамеева, Л. А. Математическая картография / Л. А. Вахрамеева, Л. М. Бугаевский, З. Л. Казакова. – Москва : Недра, 1986. – 288 с. – Текст : непосредственный.

16 Верхотуров, А. А. Анализ изменений состояния экосистем на острове Атласова (Курильские острова). / А. А. Верхотуров – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 139–150.

17 Верхотуров, А. А. Использование космических снимков среднего разрешения для оценки воздействия вулканических эксплозий на экосистемы / А. А. Верхотуров, В. А. Мелкий, И. И. Лобищева. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Международный научный конгресс, 18 июня – 8 июля 2020 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 4 : Национальная научная конференция с международным участием «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. № 1. – С. 3–11. – DOI 2618-981X-2020-4-1-3-11.

18 Верхотуров, А. А. Картографирование растительных сообществ подзоны темнохвойных лесов юга Сахалина на основе космических съёмки / А. А. Верхотуров, В. А. Мелкий. – Текст : непосредственный // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2020. – Т. 26. – № 4. – С. 60–72.

19 Верхотуров, А. А. Формирование базы данных для контроля состояния вулканопасных территорий / А. А. Верхотуров, В. А. Мелкий, И. И. Лобищева. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 2. – С. 275–287.

20 Гарбук, С. В. Дистанционные системы зондирования Земли / С. В. Гарбук, В. Е. Гершензон. – Москва : Наука, 1997. – Текст : непосредственный.

21 Географическое положение и климатические условия // Официальный сайт Правительства Сахалинской области. – URL: <https://sakhalin.gov.ru/index.php?id=18>. – Текст : электронный.

22 Геоинформатика. Толковый словарь основных терминов / Ю. Б. Баранов, А. М. Берлянт, Е. Г. Капралов, А. В. Кошкарев, Б. Б. Серапинас, Ю. А. Филиппов – Москва : ГИС-Ассоциация, 1999. – 204 с. – Текст : непосредственный.

23 Геоэкологический мониторинг / В. Н. Хлыстун, Д. А. Шаповалов, В. В. Вершинин, Ю. А. Цыпкин, В. А. Широкова, П. В. Ключин, А. А. Мурашева, В. В. Братков, Т. С. Лукьянова, Э. Б. Дедова, А. О. Хуторова, С. В. Савинова, Г. В. Ломакин, А. Ф. Гуров, Н. А. Иванова, В. М. Столяров, Т. А. Соколова, Н. В. Хватыш, В. В. Горин, П. П. Лепехин и др. : учебник для академического бакалавриата, магистратуры, специалитета, аспирантуры Направление подготовки: 05.06.01 – Науки о Земле; 05.03.06 – Экология и природопользование; 20.03.01 – Техносферная безопасность; 35.06.01 – Сельское хозяйство. – Москва, 2020. – Текст : непосредственный.

24 Гук, А. П. Фотограмметрия и дистанционное зондирование : учебник / А. П. Гук, Г. Конечный. – Новосибирск : СГУГиТ. – 2018. – 248 с. – Текст : непосредственный.

25 Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Сахалинской области в 2019 году / Министерство экологии Сахалинской области. – Южно-Сахалинск : ООО «Эйкон», 2020. – 192 с. – Текст : непосредственный.

26 Долгополов, Д. В. Использование данных дистанционного зондирования земли при формировании геоинформационного пространства трубопроводного транспорта / Д. В. Долгополов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 151–159.

27 Долгополов, Д. В. Картографирование растительности Раменского района Московской области с применением технологии автоматизированного дешифрирования космических изображений / Д. В. Долгополов, Ю. М. Черниговский, Е. Ю. Семенова. – Текст : непосредственный // Изв. вузов. Геодезия и аэрофото-съемка. – 2007. – № 3. – С. 127–141.

28 Долинский (Изюбровый) // ИАС «ООПТ России». – URL: <http://oopt.aari.ru/oopt/Долинский-Изюбровый>. – Текст : электронный.

29 Ефимов, Н. В. Справочник таксатора / Н. В. Ефимов. – Хабаровск : Леспроект, 1955. – 133 с. – Текст : непосредственный.

30 Зверев, А. Т. Методологические основы экологического картографирования и создания банков данных / А. Т. Зверев, В. И. Аковецкий. – Текст : непосредственный // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1992. – № 1. – С. 81–84.

31 Исследование влияния зон разломов территории заказника «Долинский» (о. Сахалин) на состояние его растительного покрова с использованием материалов дистанционного зондирования Земли / О. В. Купцова, И. И. Лобищева, А. А. Верхотуров, В. А. Мелкий. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 5. – С. 75–85.

32 Карпик, А. П. Роль геоинформационного обеспечения территорий / А. П. Карпик. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2004. – № 12. – С. 35–36.

33 Карпик, А. П. Анализ состояния и проблемы геоинформационного обеспечения территорий / А. П. Карпик. – Текст : непосредственный // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 4/С. – С. 3–7.

34 Карпик, А. П. Основные принципы формирования единого геоинформационного пространства территорий / А. П. Карпик, Д. В. Лисицкий – Текст : непосредственный // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. научн. конгр. : Пленарное заседание : сб. материалов (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. – С. 19–24.

35 Карпик, А. П. Оценка возможностей мониторинга земель территорий спутниковым методом / А. П. Карпик. – Текст : непосредственный // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2–1. – С. 3–6.

36 Картографирование динамики растительных сообществ северной части бореальных лесов острова Сахалин на основе данных дистанционного зондирования Земли / В. В. Братков, В. А. Воробьев, В. А. Мелкий, А. А. Верхотуров. – Текст : непосредственный // Мониторинг. Наука и технологии. – 2020. – № 3 (45). – С. 6–13.

37 Киенко, Ю. П. Введение в космическое природоведение и картографирование / Ю. П. Киенко. – Москва : Картгеоцентр-Геодезиздат, 1994. – 112 с. – Текст : непосредственный.

38 Книжников, Ю. Ф. Основы аэрокосмических методов географических исследований / Ю. Ф. Книжников. – Москва : МГУ, 1980. – 137 с. – Текст : непосредственный.

39 Комиссаров, А. В. Системное представление лазерного сканирования / А. В. Комиссаров. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2015. – № 7. – С. 18–23.

40 Краак, М.-Я. Картография: визуализация геопространственных данных / М.-Я. Краак, Ф. Ормелинг ; под ред. В. С. Тикунова ; пер. с англ. М. А. Аршиновой, В. С. Тикунова, К. Б. Шингаревой. – Москва : Науч. мир, 2005. – 324 с. – Текст : непосредственный.

41 Кравцова, В. И. Космические методы картографирования / В. И. Кравцова ; под. ред. Ю. Ф. Книжникова. – М., 1995. – Текст : непосредственный.

42 Красная книга РСФСР. Растения. – Москва : Росагропромиздат, 1988. – 590 с. – Текст : непосредственный.

43 Красная книга Сахалинской области. Растения. – Южно-Сахалинск, 2005. – 348 с. – Текст : непосредственный.

44 Крестов, П. В. Ботанико-географическое районирование острова Сахалин / П. В. Крестов, В. Ю. Баркалов, А. А. Таран // Растительный и животный мир острова Сахалин. – Владивосток : Дальнаука, 2004. – С. 67–92. – Текст : непосредственный.

45 Кринов, Е. Л. Спектральная отражательная способность природных образований / Е. Л. Кринов. – Москва–Ленинград : Издательство АН СССР, 1947. – Текст : непосредственный.

46 Кронберг, П. Дистанционное изучение Земли. Основы и методы дистанционных исследований в геологии : пер. с нем. / П. Кронберг. – Москва : Мир, 1988. – 343 с. – Текст : непосредственный.

47 Лабутина, И. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков : учеб. пособие для студентов вузов / И. А. Лабутина. – Москва : Аспект Пресс. – 2004. – 184 с. – Текст : непосредственный.

48 Лебедева, Т. А. Модели лесных земель как базовые блоки геоинформационных систем мониторинга в землепользовании / Т. А. Лебедева, Л. К. Трубина. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 178–189.

49 Лесная таксация и лесоустройство / В. В. Загреев, Н. Н. Гусев, А. Г. Мошкалева, Ш. А. Селимов. – Москва : Экология, 1991. – 384 с. – Текст : непосредственный.

50 Лисицкий, Д. В. Картографическое отображение трехмерных моделей местности / Д. В. Лисицкий, В. С. Хорошилов, П. Ю. Бугаков. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2–1. – С. 98–102.

51 Лисицкий, Д. В. Картография в эпоху информатизации: новые задачи и возможности / Д. В. Лисицкий. – Текст : непосредственный // География и природные ресурсы. – 2016. – № 4. – С. 22–28.

52 Лисицкий, Д. В. Пользовательский сегмент единого территориального геоинформационного пространства / Д. В. Лисицкий, С. Ю. Кацко. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2016. – № 4 (36). – С. 89–99.

53 Лобищева, И. И. Анализ состояния растительных сообществ в заказнике «Долинский» (Сахалин) по данным космических съемок / И. И. Лобищева, А. А. Верхотуров, В. А. Мелкий. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Международный научный конгресс, 19–21 мая 2021 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 4 : Международная научная конференция «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей

среды, геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. № 1. – С. 17–24. – DOI 2618-981X-2020-4-1-21-28.

54 Лобищева, И. И. Оценка экологической обстановки и проблемы сохранения биоразнообразия в заказнике «Макаровский» / И. И. Лобищева, В. А. Мелкий. – Текст : непосредственный // Вестник Томского государственного университета. – 2010. – № 339. – С. 201–204.

55 Лобищева, И. И. Растительность альпийского пояса Западно-Сахалинских гор в заказнике «Макаровский» / И. И. Лобищева. – Текст : непосредственный // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 6. – С. 61–63.

56 Лобищева, И. И. Функциональный анализ эколого-геологических обстановок при планировании использования рекреационных ресурсов / И. И. Лобищева, В. А. Мелкий, А. В. Хатнюкова. – Текст : непосредственный // Экологическая геология и рациональное недропользование. Международная конференция «Экогеология – 2003»: материалы конференции. – Санкт-Петербург : СПбГУ, 2003. – С. 205–207.

57 Лукичева, А. Н. Принципы подбора цветовых обозначений для мелкомасштабных геоботанических карт / А. Н. Лукичева. – Текст : непосредственный // Принципы и методы геоботанического картографирования. – Москва–Ленинград, 1962. – С. 244–253.

58 Мазуров, Б. Т. Оперативный мониторинг лесных земель северных регионов на основе использования оптических и радарных космических снимков / Б. Т. Мазуров, Е. И. Аврунев, В. А. Хамедов. – Текст : непосредственный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14. – № 4. – С. 103–111.

59 Манько, Ю. И. Ель аянская. – Ленинград : Наука, 1987. – 280 с. – Текст : непосредственный.

60 Мелехов, И. С. Лесоведение. – Москва : Лесная промышленность, 1980. – 408 с. – Текст : непосредственный.

61 Мелкий, В. А. Влияние климата на состояние северной части елово-пихтовой подзоны темнохвойных бореальных лесов острова Сахалин / В. А. Мелкий, А. А. Верхотуров, В. В. Братков. – Текст : непосредственный // Региональные геосистемы. – 2020. – № 44 (4). – С. 415–431. – DOI 10.18413/2712-7443-2020-44-4-415-431.

62 Мелкий, В. А. Оценка рекреационных условий Южно-Сахалинска / В. А. Мелкий, И. И. Лобищева, А. В. Хатнюкова. – Текст : непосредственный // Экология фундаментальная и прикладная. Проблемы урбанизации : материалы Международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 3–4 февраля 2005 г.). – Екатеринбург : УрГУ, 2005. – С. 224–226.

63 Мелкий, В. А. Теоретические основы и принципы построения единой системы мониторинга природной среды и техносферы / В. А. Мелкий. – Текст : непосредственный // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2002. – № 2. – С. 89–97.

64 Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами : учеб. пособие / В. А. Малинников, А. Ф. Стеценко, А. Е. Алтынов, С. М. Попов. – Москва : Изд-во МИИГАиК. – 2009. – 140 с. – Текст : непосредственный.

65 Муллаярова, П. И. Геоэкологическая оценка и картографирование озелененных территорий специального назначения / П. И. Муллаярова, О. Н. Николаева, Л. К. Трубина. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 4. – С. 262–274.

66 Нефтяное загрязнение ландшафтов Чечни: распознавание на местности – технологии «С одного взгляда» / Д. А. Маркелов, А. В. Маркелов, Н. Я. Минеева, А. П. Акользин, Б. И. Кочуров, Д. А. Шаповалов, А. О. Хуторова, М. А. Григорьева, Е. А. Чукмасова. – Текст : непосредственный // Экология урбанизированных территорий. – 2018. – № 2. – С. 52–60.

67 Николаев, В. А. Классификация и мелкомасштабное картографирование ландшафтов: монография / В. А. Николаев. – Москва : Изд. Моск. ун-та, 1978. – 62 с. – Текст : непосредственный.

68 Николаева, О. Н. Картографическое обеспечение рационального природопользования региона : монография / О. Н. Николаева. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – 170 с. – Текст : непосредственный.

69 Николаева, О. Н. О разработке картографического обеспечения для эффективного управления лесными ресурсами / О. Н. Николаева. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2015. – № 11. – С. 32–36.

70 Николаева, О. Н. О системном картографировании биологических ресурсов для обоснования рационального природопользования административного субъекта на примере Новосибирской области / О. Н. Николаева. – Текст : непосредственный // ИнтерКарто ИнтерГИС. – 2017. – Т. 23. – № 1. – С. 297–308.

71 Николаева, О. Н. Применение данных дистанционного зондирования земли для совершенствования системы учета земель лесного фонда Российской Федерации / О. Н. Николаева, Н. А. Никитина. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск : сб. материалов в 9 т. Т. 4 : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. № 2 . – С. 17–22.

72 Нормативные материалы для таксации лесов Сахалина и Камчатки. – Южно-Сахалинск : СахЛОС ДальНИИЛХ, 1986. – 814 с. – Текст : непосредственный.

73 О применении экологических карт в создании экологической компоненты инфраструктуры пространственных данных муниципального уровня / Б. Т. Мазуров, С. С. Дышлюк, О. Н. Николаева, Л. А. Ромашова. – Текст : непосредственный // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5/С. – С. 230–235.

74 О создании государственного охотничьего заказника «Изюбровый» в Долинском районе : решение Исполнительного комитета областного Совета народных депутатов от 28.12.1988 № 322 // ИАС «ООПТ России». –

URL: <http://oopt.aari.ru/doc/Решение-исполнительного-комитета-Сахалинского-областного-Совета-народных-депутатов-от-28121988-№.> – Текст : электронный.

75 О создании комплексного лесохозяйственного заказника областного значения «Макаровский» : решение малого совета Сахалинского областного Совета народных депутатов от 03.12.1992 № 316. – URL: <http://oopt.aari.ru>. – Текст : электронный.

76 Об изменении границ и утверждении Положения о государственном природном биологическом заказнике областного значения «Макаровский» по результатам комплексного экологического обследования, проведенного в 2007 году : постановление Администрации Сахалинской области от 01.08.2008 № 228-па. – URL: <http://oopt.aari.ru>. – Текст : электронный.

77 Об особо охраняемых природных территориях (с изменениями и дополнениями) : федер. закон от 14.03.1995 № 33-ФЗ. – URL: <http://ivo.garant.ru/#/document/10107990/paragraph/73179:0>. – Текст : электронный

78 Об охране окружающей среды (с изменениями и дополнениями) : федер. закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_34823/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/). – Текст : электронный

79 Об утверждении государственной программы Сахалинской области «Развитие лесного комплекса, охотничьего хозяйства и особо охраняемых природных территорий Сахалинской области» : постановление Правительства Сахалинской области от 18.07.2013 № 353 (с изменениями на 10.06.2021). – URL: <http://docs.cntd.ru/document/460161186>. – Текст : электронный.

80 Об утверждении новой редакции Положения о государственном природном биологическом заказнике областного значения «Макаровский» : постановление Администрации Сахалинской области от 09.01.2003 № 3-па. – URL: <http://oopt.aari.ru>. – Текст : электронный.

81 Об утверждении Положений о государственных природных биологических заказниках областного значения «Северный», «Тундровый», «Александровский»,

«Красногорский», «Изюбровый», «Озеро Добрецкое» и «Островной» : постановление Администрации Сахалинской области от 20.12.2002 № 149-па // Сейчас.ру. Новости России и мира. – URL: <https://www.lawmix.ru/zakonodatelstvo/2461692> – Текст : электронный.

82 Об утверждении Положения о государственном природном биологическом заказнике регионального значения «Макаровский» : постановление губернатора Сахалинской области от 27.07.2000 № 308. – URL: <http://oopt.aari.ru>. – Текст : электронный.

83 Об утверждении стратегии социально-экономического развития Сахалинской области на период до 2035 года (в ред. Постановления Правительства Сахалинской области от 13.02.2020 № 57) : постановление Правительства Сахалинской области от 24.12.2019 № 618 – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/6500201912300011>. – Текст : электронный.

84 Обработка данных дистанционного зондирования Земли: практические аспекты : учеб. пособие / В. Г. Коберниченко, О. Ю. Иванов, С. М. Зраенко, А. В. Сосновский, В. А. Тренихин ; под общ. ред. В. Г. Коберниченко. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та. – 2013. – 168 с. – Текст : непосредственный.

85 Основы государственной политики в области экологического развития России на период до 2030 года (утв. Президентом РФ от 30.04.2012). – URL: <http://ivo.garant.ru/#/document/70169264>. – Текст : электронный.

86 Особо охраняемые природные территории России (ИАС «ООПТ РФ»). Информационно-аналитическая система. – URL: <http://oopt.aari.ru/oopt/>. – Текст : электронный.

87 Парначев, В. П. Экология природных комплексов : учеб. пособие / В. П. Парначев, В. В. Кыров, С. А. Кырова. – Абакан : Хакасское книжное издательство, 2009. – 294 с. – Текст : непосредственный.

88 Полевая геоботаника. – Ленинград : Наука, 1964. – Т. 3 – 532 с. – Текст : непосредственный.

89 Растительный мир сахалинского природного заказника «Макаровский» / Р. Н. Сабиров, Н. Д. Сабирова, В. А. Мелкий, Я. П. Белянина, Е. А. Картушина. – Текст : непосредственный // Вестник Сахалинского музея. Ежегодник областного государственного учреждения культуры «Сахалинский государственный областной краеведческий музей», № 16. – Южно-Сахалинск : Сахалинский государственный областной краеведческий музей, 2009. – С. 302–318.

90 Ревзон, А. Л. Картографирование состояний геотехнических систем / А. Л. Ревзон. – Москва : Недра, 1992. – 233 с. – Текст : непосредственный.

91 Реестр особо охраняемых природных территорий (ООПТ) регионального значения Сахалинской области по состоянию на 11.05.2021 года // Официальный сайт Агентства лесного и охотничьего хозяйства Сахалинской области. – URL: <https://les.sakhalin.gov.ru/deyatelnost/osobo-okhranjaemye-prirodnye-territorii/perechen-deistvujushchikh-osobo-okhranjaemykh-prirodnikh-territorii-regionalnogo-znachenija-sakhalinskoj-oblasti/>. – Текст : электронный.

92 Родин, И. Е. Анализ и подготовка данных ДЗЗ из открытых источников для систем точного земледелия / И. Е. Родин. – Текст : электронный // Геопрофи. – 2018. – № 6. – С. 16–19. – URL : <http://www.geoprofi.ru/technology/analiz-i-podgotovka-dannyhkh-dzz-iz-otkrytyhkh-istochnikov-dlya-sistem-tochnogo-zemledeliya>.

93 Россия запустила КА ДЗЗ «Канопус-В» № 3 и № 4 // МАРЕХPERT. – URL: [http://mapexpert.com.ua/index\\_ru.php?id=188&table=news](http://mapexpert.com.ua/index_ru.php?id=188&table=news). – Текст : электронный.

94 Савиных, В. П. Оптико-электронные системы дистанционного зондирования Земли / В. П. Савиных, В. А. Соломатин. – Текст : непосредственный. – Москва : Недра. – 1995. – 240 с.

95 Сизов, А. П. Оценка экологического состояния земельных участков на особо охраняемых природных территориях города / А. П. Сизов, Н. Н. Ключев. – Текст : непосредственный // География и природные ресурсы. – 2004. – № 1. – С. 36.

96 Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России / С. А. Барталев, В. А. Егоров, В. О. Жарко,

Е. А. Лупян, Д. Е. Плотников, С. А. Хвостиков. – Текст : непосредственный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12. – № 5. – С. 203-221.

97 Сосудистые растения советского Дальнего Востока. – Ленинград–Санкт-Петербург : Наука, 1985. – Т. 1. 398 с.; 1987. Т. 2. 446 с.; 1988. Т. 3. 421 с.; 1989. Т. 4. 380 с.; 1991. Т. 5. 390 с.; 1992. Т. 6. 428 с.; 1995. Т. 7. 395 с.; 1996. Т. 8. 383 с. – Текст : непосредственный.

98 Сочава, В. Б. Растительный покров на тематических картах / В. Б. Сочава. – Новосибирск : Наука, 1979. – 190 с. – Текст : непосредственный.

99 Сукачев, В. Н. Методические указания к изучению типов леса / В. Н. Сукачев, С. В. Зонн. – Москва : Изд-во АН СССР, 1961. – 144 с. – Текст : непосредственный.

100 Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения : учеб. пособие / А. Н. Шихов, А. П. Герасимов, А. И. Пономарчук, Е. С. Перминова ; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Пермь, 2020. – 191 с. – URL : <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifrovanie-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf>. – Текст : электронный.

101 Технологические решения в области обеспечения геопространственной информации о магистральных трубопроводах и объектах их инфраструктуры / Е. И. Аврунев, Г. А. Уставич, А. О. Грекова, А. В. Никонов, В. А. Мелкий, Д. В. Долгополов. – Текст : непосредственный // Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 188–201.

102 Тиори, Т. Проектирование структур баз данных / Т. Тиори, Дж. Фрай. – Москва, 1985. – Текст : непосредственный.

103 Толмачев, А. И. Вертикальное распределение растительности на Сахалине / А. И. Толмачев. – Текст : непосредственный // Растительный покров Саха-

лина. Географический сб., вып. VIII. – Москва–Ленинград : Изд-во АН СССР, 1956. – С. 15–48.

104 Толмачев, А. И. Геоботаническое районирование острова Сахалин / А. И. Толмачев. – Москва–Ленинград : Изд-во АН СССР, 1955. – 80 с. – Текст : непосредственный.

105 Толмачев, А. И. О высокогорной флоре горы Лопатина (о. Сахалин) / А. И. Толмачев. – Текст : непосредственный // Ботан. журн. – 1950. – Т. 35, № 4. – С. 343–354.

106 Толмачев, А. И. О флоре острова Сахалина / А. И. Толмачев. – Москва–Ленинград : Изд-во АН СССР, 1959. – 104 с. – Текст : непосредственный.

107 Трубина, Л. К. Цифровые фотограмметрические технологии в информационном обеспечении экосистем / Л. К. Трубина, В. П. Пяткин, Л. К. Зятькова. – Текст : непосредственный // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 49–52.

108 Функция NDVI // ArcGIS for Desktop. ESRI. – URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/ndvi-function.htm>. – Текст : электронный.

109 Хамарин, В. И. ГИС в исследованиях природных комплексов таежной зоны / В. И. Хамарин, А. Г. Дюкарев, В. Н. Воробьев. – Текст : непосредственный // Вопросы географии Сибири. Вып. 23 : сборник статей. – Томск, 1999. – С. 367–374.

110 Хлебникова, Т. А. Комбинированный способ создания цифровых топографических планов по материалам аэрокосмических съемок / Т. А. Хлебникова, О. Б. Архипова. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15-26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 111–115.

111 Хлебникова, Т. А. Экспериментальные исследования технологии моделирования геопространства по материалам аэрофотосъемки / Т. А. Хлебникова, О. А. Опритова. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т 1. – С. 15–19.

112 Хлебникова, Т. А. Экспериментальные исследования точности построения плотной цифровой модели по материалам беспилотной авиационной системы / Т. А. Хлебникова, О. А. Опритова. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 119–129.

113 Чандра, А. М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А. М. Чандра, С. К. Гош. – Москва : Техносфера. – 2008. – 312 с. – Текст : непосредственный.

114 Шаповалов, Д. А. Дистанционный мониторинг использования лесов в Воронежской области / Д. А. Шаповалов, О. Н. Бейчук. – Текст : непосредственный // Современные проблемы эффективного землепользования : сборник научных трудов. – Москва, 2016. – С. 39–45.

115 Щенников, А. П. Введение в геоботанику / А. П. Щенников. – Ленинград : ЛГУ, 1964. – 447 с.

116 Экологическая доктрина Российской Федерации. Одобрена Распоряжением Правительства РФ от 31.09.2002. – № 1225-р. – URL: <http://government.ru/docs/all/43014/>. – Текст : электронный.

117 ArcGIS 10.4.1. Все продукты ESRI. Technical Support // ESRI. – URL: <https://support.esri.com/en/Products/Enterprise/arcgis-server/ArcGIS-Server/10-4-1#product-support> (дата обращения 10.03.2021). – Текст : электронный.

118 Athey, S. Generalized Random Forests / S. Athey, J. Tibshirani, S. Wager. – Текст : непосредственный // The Annals of Statistics. – 2019. – Vol. 47 (2). P. 1148–1178. – DOI 10.1214/18-AOS1709.

119 Co-benefits of Sustainable Forest Management for Carbon Sequestration. / N. Imai, J. Titin, S. Kita, R. C. Ong, K. Kitayama. – Текст : непосредственный // Kitayama K. (eds) Co-benefits of Sustainable Forestry. Ecological Research Monographs. Springer, Tokyo. – 2012 – P. 129–148. – DOI 10.1007/978-4-431-54141-7\_7.

120 Drude, O. Pflanzengeographie / O. Drude. – Aufl. Hannover, 1906, – p. 388 p. – Текст : непосредственный.

121 Earth Science Reference Handbook – A Guide to NASA’s Earth Science Program and Earth Observing Satellite Missions, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D. C. / C. L. Parkinson, A. Ward, M. D. King (Eds.). – 2006. – URL: <https://eospsso.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/publications/2006ReferenceHandbook.pdf>. – Текст : электронный.

122 Effects of conservation policy on China’s forest recovery / A. Viña, W. J. McConnell, H. Yang, Z. Xu, J. Liu. – Текст : электронный // Science Advances. – 2016. – 18 March: e1500965. – URL: <https://advances.sciencemag.org/content/2/3/e1500965> (accessed 10 March 2021).

123 ERDAS Field Guide. ERDAS Inc. – Atlanta, Georgia, 1995. – 627 p. – Текст : непосредственный.

124 Gonsamo A., Chen J. M. 2016. Circumpolar vegetation dynamics product for global change study / A. Gonsamo, J. M. Chen. – Текст : непосредственный // Remote Sensing of Environment. – Vol. 182 (1). – P 13–26. – DOI 10.1016/j.rse.2016.04.022.

125 Kolobov, A. N. Individual-based model of spatio-temporal dynamics of mixed forest stands / A. N. Kolobov, E. Ya. Frisman. – Текст : непосредственный // Ecological Complexity. – 2016. – V. 27. – P. 29–39. – DOI 10.1016/j.ecocom.2015.10.002.

126 Komárek, J. The potential of Unmanned Aerial Systems: A tool towards precision classification of hard-to-distinguish vegetation types? / J. Komárek, T. Klouček,

J. Prošek. – Текст : непосредственный // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2018. – Vol. 71. – P. 9–19. – DOI 10.1016/j.jag.2018.05.003.

127 Landsat Missions // United States Geological Survey (USGS). 2020. – URL: <https://www.usgs.gov/media/images/9-millionth-scene-added-usgs-landsat-archive> (accessed 10 March 2021). – Текст : электронный.

128 Landsat Science. – URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8>. – Текст : электронный.

129 Lu, B. Species classification using Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-acquired high spatial resolution imagery in a heterogeneous grassland / B. Lu, Y. He. – Текст : непосредственный // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2017. – Vol. 128. – P. 73–85. – DOI 10.1016/j.isprsjprs.2017.03.011.

130 Mahala, A. Processes and Status of Land Degradation in a Plateau Fringe Region of Tropical Environment / A. Mahala. – Текст : непосредственный // Environmental Processes. – 2017. – Vol. 4 (3). – P. 663–682. – DOI 10.1007/s40710-017-0255-6.

131 Melkiy, V. A. Cartography of the estimation of recreational conditions. 5657-42 / V. A. Melkiy, I. I. Lobishcheva, A. V. Khatnyukova. – Текст : непосредственный // Remote Sensing of Atmosphere, Ocean, Environment, and Space. SPIE Fourth International Asia-Pacific Environmental Remote Sensing Symposium (8–11 November 2004) Waikiki Beach Marriott Resort, Honolulu, Hawaii USA. Abstracts. – Bellingham, WA, SPIE, 2004. – P. 28.

132 Miyabe, K. Flora of Hokkaido and Saghalien. Pt. 1–4 / K. Miyabe, Y. Kudo. – Текст : непосредственный // Journ. Fac. Agr. Hokkaido Univ. – 1930–1934.

133 Myers, S. L. 2019. China's Voracious Appetite for Timber Stokes Fury in Russia and Beyond / S. L. Myers. – Текст : электронный // The New York Times. – 2019. – 10 April. Section A. – Page 4. – URL: <https://www.nytimes.com/>

2019/04/09/world/asia/chinas-voracious-appetite-for-timber-stokes-fury-in-russia-and-beyond.html (accessed 10 March 2021).

134 Remote sensing for biodiversity science and conservation / W. Turner, S. Spector, N. Gardiner, M. Fladeland, E. Sterling, M. Steininger. – Текст : непосредственный // Trends in Ecology & Evolution. – 2003. – Vol. 18(6). – P. 306–314. – DOI 10.1016/S0169-5347(03)00070-3.

135 Review of shadow detection and de-shadowing methods in remote sensing / A. Shahtahmassebi, N. Yang, K. Wang, N. Moore, Sh. Zhangquan. – Текст : непосредственный // Chinese Geographical Science. – 2013. – V. 23. – № 4. – P. 403–420. – DOI 10.1007/s11769-013-0613-x.

136 Romul\_Hum model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. I. Problem formulation, model description, and testing / A. N. Komarov, O. G. Chertov, S. S. Bykhovets, C. Shaw, M. A. Nadporozhskaya, P. V. Frolov, M. P. Shashkov, V. N. Shanin, P. Y. Grabarnik, I. V. Priputina, E. V. Zubkova // Ecological Modelling. – 2017. – Vol. 345. – P. 113–124. – DOI j.ecolmodel.2016.08.007.

137 Sentinel Online // European Space Agency (ESA) 2021. – URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions> (accessed 10 March 2021). – Текст : электронный.

138 Sentinel-2 Products. – URL: <https://gdal.org/drivers/raster/sentinel2.html#sentinel2-sentinel-2-products>. – Текст : электронный.

139 Sentinel-2. – URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>. – Текст : электронный.

140 Spectral analysis of wetlands using multi-source optical satellite imagery / M. Amani, B. Salehi, S. Mahdavi, B. Brisco. – Текст : непосредственный // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2018. – Vol. 144. – P. 119–136. – DOI 10.1016/j.isprsjprs.2018.07.005.

141 Sugawara, Sh. Illustrated flora of Saghalien with description and figures of phanerogams and higher cryptogams indigenous to Saghalien / Sh. Sugawara. – Tokyo. 1937–1940. – Vol. 1–4. – Текст : непосредственный.

142 Teltscher, K. Using multispectral Landsat and Sentinel-2 satellite data to investigate vegetation change at Mount St. Helens since the great volcanic eruption in 1980 / K. Teltscher, F. E. Fassnacht. – Текст : непосредственный // Journal of Mountain Science. – 2018. – Vol. 15. – P. 1851–1867. – DOI 10.1007/s11629-018-4869-6.

143 The role of respiration in estimation of net carbon cycle: coupling soil carbon dynamics and canopy turnover in a novel version of 3D-CMCC forest ecosystem model / S. Marconi, T. Chiti, A. Nolè, R. Valentini, A. Collalti. – Текст : непосредственный // Forests. – 2017. – Vol. 8 (6). – ID: 220. – DOI 10.3390/f8060220.

144 The State of Canada's Forests // Annual Report 2016. Available at: <http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/37265.pdf> (дата обращения: 10.03.2021). – Текст : электронный.

145 Uwalaka, N. O. Species diversity and Successional dynamics in the Secondary forest of Obafemi Awolowo University Biological Gardens Ile-Ife, Nigeria / N. O. Uwalaka, J. I. Muoghalu, A. O. Osewole. – Текст : непосредственный // Nature Conservation Research. – 2018. – Vol. 3(1). – P. 21–34. – DOI 10.24189/ncr.2018.002.

146 World Conservation Strategy: Living Resource Conservation for Sustainable Development. Ed.: International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN) / United Nations Environment Programme (UNEP) / World Wildlife Fund (WWF). Switzerland, Gland, IUCN–UNEP–WWF. – 1980. – DOI10.2305/IUCN.CH.1980.9.en. – Текст : непосредственный.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

АКТ О ВНЕДРЕНИИ НАУЧНЫХ РАЗРАБОТОК  
В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

## АКТ

о внедрении научных разработок

Лобищевой Инны Ивановны в исследовательскую деятельность  
Дальневосточного филиала Федерального государственного унитарного  
научно-производственного предприятия «Российский федеральный  
геологический фонд» («Росгеолфонд»)«7» октября 2010 г.

г. Южно-Сахалинск

Результаты диссертационной работы Лобищевой Инны Ивановны «Оценка геоэкологического состояния особо охраняемой природной территории по данным дистанционного зондирования (на примере заказника «Макаровский»)» в части вопросов выявления дешифровочных признаков растительных формаций, характерных для острова Сахалин, по данным дистанционного зондирования и проведения почвенно-индикационного дешифрирования представляют научный интерес и используются при проведении аэрокосмического мониторинга геоэкологического состояния территорий Сахалинской области, на которых ведется добыча полезных ископаемых.

Внедрены и используются следующие результаты:

- метод оценки геоэкологического состояния растительного покрова по данным дистанционного зондирования;
- картографические материалы, полученные в результате исследований.

Директор филиала



В. П. Тузов

Ведущий геодезист группы  
дистанционных методов

Н. С. Терентьев