

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
Карпик Александр Петрович.

Официальные оппоненты:

Шаповалов Дмитрий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет по землеустройству», проректор по научной и инновационной деятельности.

Долгополов Даниил Валентинович, кандидат технических наук, Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис», руководитель направления корпоративных ГИС систем Центра геоинформационных технологий.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» (г. Москва).

Защита состоится 21 декабря 2021 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.402.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»: <https://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/lobishcheva-inna-ivanovna/>

Реферат разослан 8 ноября 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.  
Подписано в печать 18.10.2021. Формат 60 × 84 1/16.  
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 140.  
Редакционно-издательский отдел СГУГиТ  
630108, Новосибирск, Плахотного, 10.  
Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ  
630108, Новосибирск, Плахотного, 8.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*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.

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.

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.

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 совершенству-

ется: 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., Крино́ва 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 V., Moore N., Teltscher K., Turner W., Wang K. и др. 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., Крестова П. В., Сукачева В. Н., Толмачева А. И., Щенникова А. П., Miyabe R., Sugawara Sh. и др.

*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 создания 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 количествен-

ных 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 апреля 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 Саха-

линской 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).

*Публикации по теме диссертации.* Основные результаты исследований опубликованы в девяти научных работах, три 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Во введении* обоснована актуальность темы диссертационного исследования, показана степень разработанности данного направления, сформулированы цель и задачи, обозначены объект и предмет научного исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость выполненных исследований, приведены положения, выносимые на защиту, и сведения об апробации и реализации результатов работы.

*В первом разделе* выполнен информационно-аналитический обзор научно-технической литературы о технологиях и методах дешифрирования растительного покрова, справочно-нормативных материалов в области проведения космической съемки с целью анализа состояния растительного покрова ООПТ.

На острове Сахалин располагается 42 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, картографиро-



вание лесов, оценка ущерба в лесных массивах, решение лесоводческих задач, исследование водоохраных зон, выявление геоэкологического состояния лесных экосистем и организации мониторинга ООПТ (таблица 1).

Таблица 1 – Требования к космическим снимкам при решении задач мониторинга состояния растительных сообществ (Гарбук, Гершензон, 1998 с авторскими изменениями)

| № 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 водоохраных зон              | цвет, температура, текстура | Г       | К             | В, ИК, МВ             | 15–100                         |

В таблице 1 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.

Технологии тематического дешифрирования растительности автоматизированными методами выполняются с использованием различных методов классификации. Наиболее распространенным подходом является использование линейных комбинаций, рассчитанных на основе значений коэффициентов спектральных яркостей, различных спектральных вегетационных индексов.

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. Способы повышения достоверности классификации и учета географических факторов основываются на приемах 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 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.

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

сьемочных зон. Классификация объектов, основанная на теории распознавания образов, предусматривает разделение пространства признаков на классы с конкретными значениями признаков при контролируемой классификации (с обучением), когда известна принадлежность признаков объектов к определенному классу, или классификации без обучения, позволяющей группировать пиксели без предварительного знания числа и характеристик классов объектов на местности. Набор параметров классов объектов зависит от выбранного алгоритма контролируемой классификации. Классификацию по минимальному расстоянию применяют в случае выделения незначительного числа классов (6–7) в обучающей выборке. Метод параллелепипедов целесообразно использовать в случае хорошей разделимости значений спектральной яркости при небольшом количестве классов объектов.

Вследствие того, что растительность обладает значительным разнообразием спектральных характеристик, а также близостью спектральных характеристик некоторых древесных пород, необходимо для классификации использовать метод максимального правдоподобия. Метод предполагает в пределах каждого класса во всех спектральных зонах нормальное распределение значений яркости и использует ковариации между значениями спектральной яркости.

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

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

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:

$$Cov_{\lambda_1, \lambda_2} = \frac{\sum_{i=0}^n (B_{\lambda_1 i}^* - B_{\lambda_1 m}^*)(B_{\lambda_2 i}^* - B_{\lambda_2 m}^*)}{n - 1}, \quad (2)$$

где  $B_{\lambda_1 i}^*$ ,  $B_{\lambda_2 i}^*$  – значения яркости пиксела  $i$  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 спектральных яркостей и матрицы ковариации производится вычисление спектрального расстояния Махаланобиса, по которому пиксел относится к тому или иному классу.

*Во втором разделе* в результате системного анализа материалов, проведенных исследований спектральных характеристик растительных сообществ определено, что существующие технологии автоматизированного дешифрирования растительности не позволяют с высокой степенью достоверности классифицировать в автоматизированном режиме состав растительного покрова исследуемых ООПТ на острове Сахалин, поэтому необходимо усовершенствовать технологию выделения растительных сообществ с учетом региональной специфики.

Принципиальная технологическая схема автоматизированного дешифрирования растительных сообществ ООПТ основана на использовании геоинформационного программного обеспечения и включает шесть подсистем, функционально связанных друг с другом (рисунок 1).

*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.

При дешифрировании растительности ООПТ Сахалина, в качестве дополнительных данных, целесообразно использовать лесоустроительную документацию, включающую в себя таксационные описания на территории лесничеств, ведомости характеристик лесного фонда, планшеты на территории лесничеств, тематические карты-схемы территорий лесничеств.



Рисунок 1 – Принципиальная технологическая схема автоматизированного дешифрирования растительных сообществ ООПТ с использованием геоинформационных технологий

*Подсистема первичной обработки исходных данных* включает преобразование цифровых пространственных данных в стандартные форматы, сканирование топографических и тематических карт, геометрическую привязку отсканированных карт и снимков, обработка цифровых моделей рельефа (ЦМР), ввод обработанных данных в картографическую систему, анализ описательных и пространственных данных, включающий в себя систематизацию описательных данных, выбор масштаба картографирования, выбор временного интервала исследования.

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

В процессе выполнения тематической обработки разновременных многозональных космических изображений, растров, векторизации и подсчета пространственно-количественных показателей использовались программные продукты ArcGIS (рисунок 2).

Обработка и анализ состава, распределения, состояния, изменения растительности исследуемой территории на основе данных космических съемок представляют 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 комплексования 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 (метод максимального правдоподобия).



Рисунок 2 – Технологическая схема обработки многозональных космических изображений

*Подсистема картографического обеспечения.* 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.

*Подсистема геоинформационного обеспечения.* Используемая в исследовании ArcGIS 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.

*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 следует проводить на выбранных эталонных участках.

Таким образом, усовершенствована технология дешифрирования растительных сообществ особо охраняемых природных территорий по космическим снимкам на примере острова Сахалин (рисунок 3).

*В третьем разделе* представлена практическая реализация усовершенствованной технологии дешифрирования растительных сообществ особо охраняемых природных территорий по космическим снимкам на примере острова Сахалин.

Для качественной практической реализации усовершенствованной технологии дешифрирования растительных сообществ ООПТ сформирован набор характеристик эталонных объектов, представленных численными значениями спектральных признаков, характерных для каждого из растительных сообществ, произрастающих на исследуемой территории.

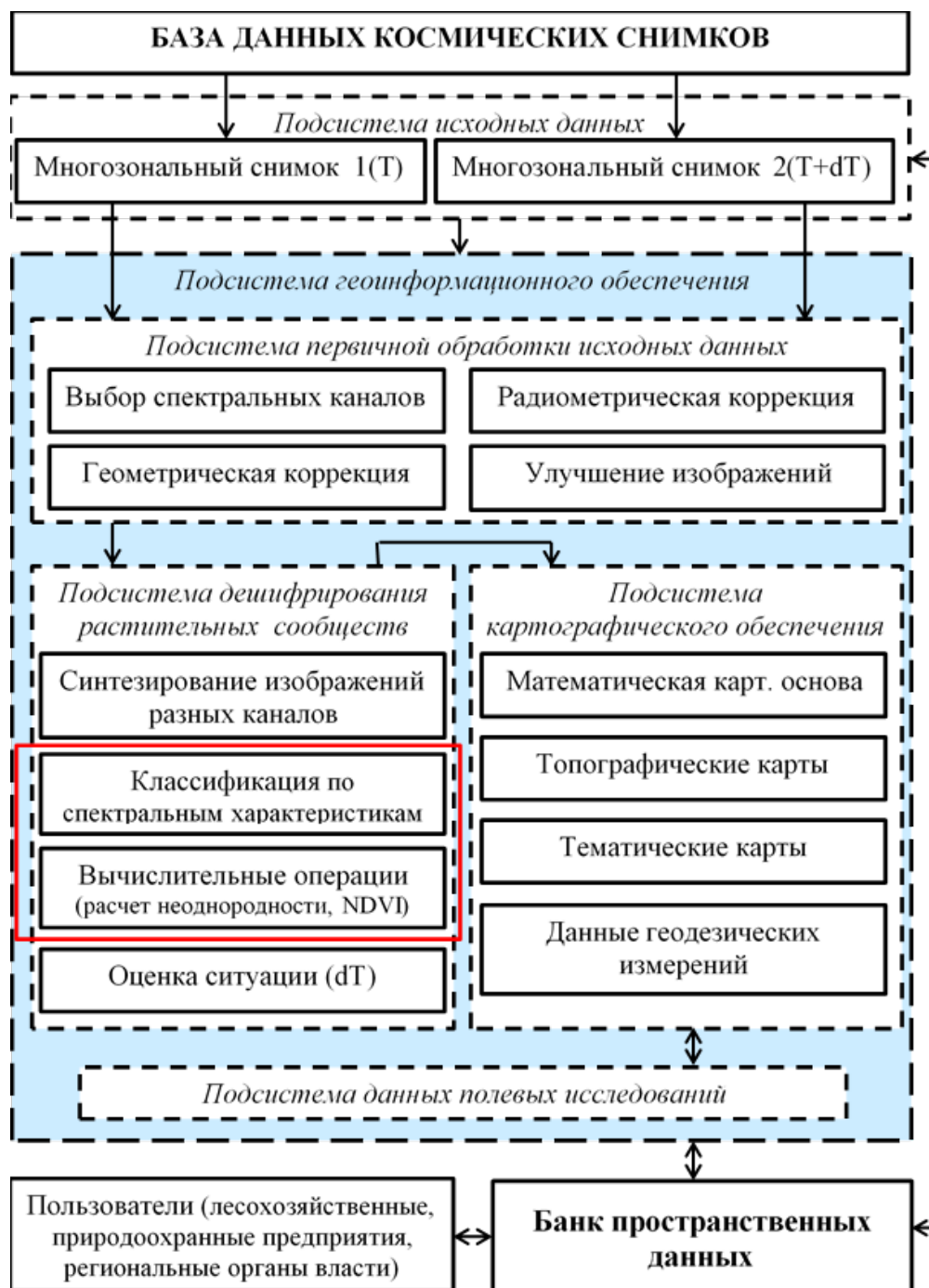


Рисунок 3 – Технологическая схема дешифрирования растительных сообществ особо охраняемых территорий по космическим снимкам (красным выделены усовершенствованные блоки)

В результате геоботанических работ в заказнике «Долинский» подтверждено наличие следующих растительных сообществ: темнохвойные пихтово-еловые леса; камениоберезняки; долинные ивово-ольховые леса; лесные культуры лиственницы и сосны; бамбучники; безлесные территории.



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 4).

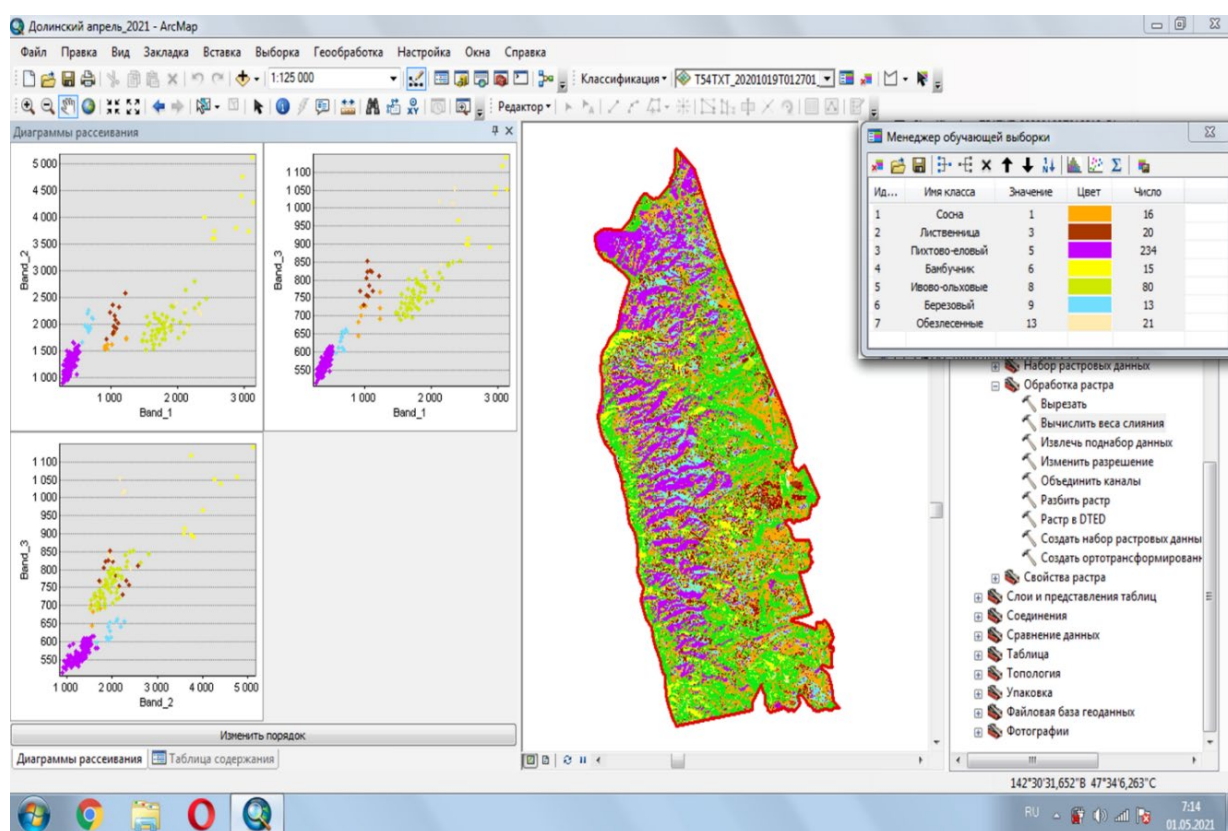


Рисунок 4 – Классификация растительных сообществ в заказнике «Долинский» методом максимального правдоподобия

В процессе исследования космических снимков с изображениями растительности в разных зонах электромагнитного спектра создан классификатор спектральных признаков растительных сообществ заказника «Долинский» (таблица 2).

Геоэкологическая обстановка на разных участках заказника «Долинский» оценивалась по степени измененности растительных сообществ. Анализ измене-

ний геоэкологического состояния территории заказника «Долинский» выполнен по показателям фотосинтетически активной биомассы NDVI за период 2001–2020 гг. (рисунок 5).

Таблица 2 – Классификатор спектральных признаков растительных сообществ в заказнике «Долинский» (разработка автора)

| Растительные сообщества                             | Средние значения спектральной яркости<br>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 |

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

$$K = \frac{m}{m-1} \left[ 1 - \sum_{i=1}^m \left( \frac{S_i}{S} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где  $m$  – количество составляющих рисунка;  $\frac{S_i}{S}$  —доля площади по составляющим ( $i = 1, 2, \dots, m$ ).

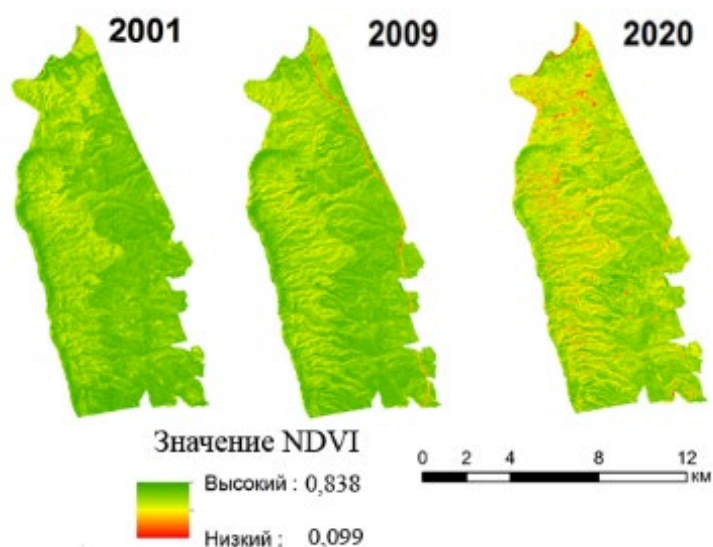


Рисунок 5 – Изменение фитомассы растительных сообществ в заказнике «Долинский» по NDVI

Динамика сукцессии растительности в результате антропогенного воздействия определена и охарактеризована на больших площадях по данным дистанционного зондирования (рисунок 6).



Рисунок 6 – График изменения фитомассы растительных сообществ в заказнике «Долинский» по NDVI в период с 2001 по 2020 г.

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 где нарушенность растительного покрова составляет менее 5 %;

– условно удовлетворительного (неблагоприятного) состояния (5–20 %).

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

В результате построена карта современного состояния растительных сообществ и схема зонирования территории по степени сложности геоэкологической обстановки (рисунок 7).

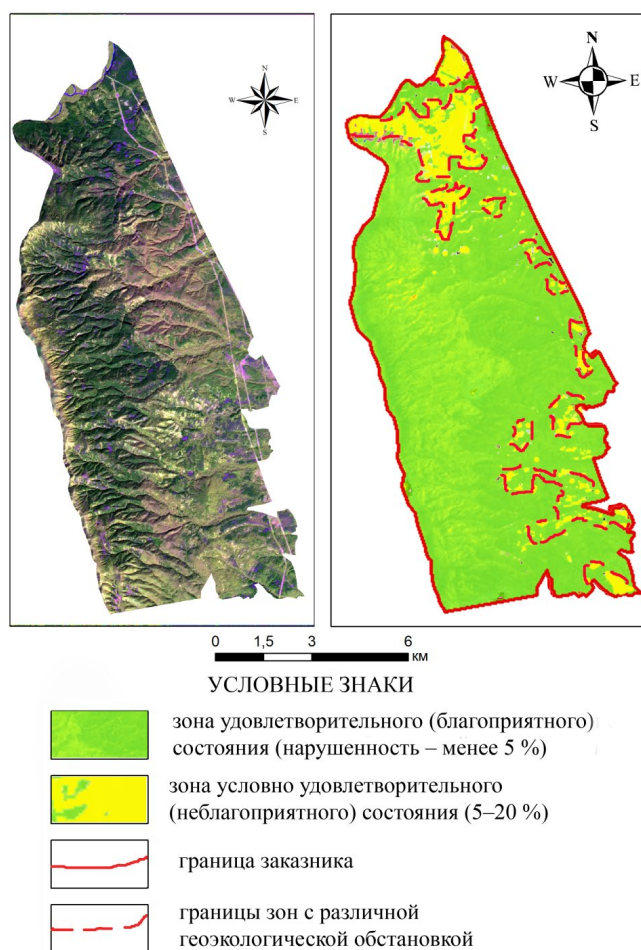


Рисунок 7 – Синтезированный снимок территории заказника «Долинский» и схема зонирования по геоэкологическому состоянию территории

## 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 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.

2 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.

3 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.

4 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.

5 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.

6 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.

7 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.

8 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.

9 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.