

На правах рукописи



ХОВРАТОВИЧ ТАТЬЯНА СЕРГЕЕВНА

УДК 528.8

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ
СТРУКТУРЫ ЛЕСОВ ПО ОПТИЧЕСКИМ ДАННЫМ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Специальность: 25.00.34 –

Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Барталев С.А.

МОСКВА – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Раздел 1. Задачи и методы оценки показателей горизонтальной структуры лесов на основе данных спутниковой съёмки	
1.1 Необходимость оценки показателей горизонтальной структуры лесов для определения их ресурсно-экологического потенциала.....	11
1.2 Возможности данных оптических систем дистанционного зондирования Земли для оценки показателей горизонтальной структуры лесного покрова.....	18
1.3 Опыт использования данных оптических систем дистанционного зондирования Земли для оценки показателей горизонтальной структуры лесов.....	25
Выводы к первой главе.....	36
Раздел 2. Методы и результаты дистанционной оценки показателей горизонтальной структуры лесов по данным спутниковых наблюдений	
2.1 Метод дистанционной оценки проективного покрытия древесного полога леса.....	37
2.2 Анализ и валидация результатов оценки проективного покрытия древесного полога леса.....	43
2.3 Метод дистанционной оценки лесистости территории и сомкнутости крон леса.....	49
2.4 Анализ и валидация результатов оценки лесистости территории и сомкнутости крон леса.....	54
Выводы ко второй главе.....	66
Раздел 3. Детектирование изменений лесов на основе динамики показателей горизонтальной структуры древесного полога	
3.1 Оценка изменений в лесах на основе разновременных данных спутниковой съёмки.....	67

3.2 Метод детектирования рубок леса по данным Landsat 8 OLI и Sentinel-2 MSI на основе изменения проективного покрытия древесного полога леса.....	76
3.3 Разработка и апробация программного комплекса детектирования рубок леса по разновременным данным спутниковой съёмки	84
Выводы к третьей главе.....	96
Заключение.....	97
Список сокращений.....	99
Библиографический список.....	102
Приложение 1. Список научных конференций и семинаров, на которых докладывались результаты диссертационной работы.....	116
Приложение 2. Список публикаций по результатам диссертационной работы.....	119

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса являются одним из основных источников регулярно обновляемой информации о состоянии и изменениях лесного покрова. С начала XXI века с повышением качества и доступности данных ДЗЗ, развитием технологий их обработки, применение спутниковых данных для решения научных и прикладных задач мониторинга лесов получило широкое распространение.

Леса являются важным компонентом биосферы, выполняя ряд экологических и природоохранных функций, а также источником ценных ресурсов. Согласно данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО ООН) в 2015 году покрытая лесом площадь России составляла около 20% площади лесов мира, превышая 800 млн. га. Вместе с тем по данным Счетной палаты РФ в 2019 году лишь для 15% площади российских лесов имелась относительно актуальная информация, давность получения которой не превышала 10 лет. При этом часть лесов значительных по площади северных регионов Центральной Сибири и Дальнего Востока остается обследованной лишь приближенными аэровизуальными методами в середине прошлого столетия. Очевидно, что информация о текущем состоянии лесов России не отвечает критериям полноты и актуальности и нуждается в уточнении. Наряду с этим необходимо учитывать, что леса России ежегодно претерпевают масштабные, охватывающие по площади миллионы гектаров, изменения под воздействием природных (пожары, биогенные усыхания, экстремальные метеорологические явления) и антропогенных (вырубки, техногенные загрязнения) факторов. Необходимость регулярной оценки состояния и динамики лесного покрова на огромной территории диктует наличие острой потребности развития методов его мониторинга по данным спутниковых наблюдений, определяя актуальность диссертационной работы.

Степень разработанности темы. Современные инструментальные возможности спутникового картографирования лесов характеризуются не только построением тематических продуктов в классификационных шкалах, но и наличием методов оценки количественных показателей лесного покрова, в том числе показателей его пространственной структуры. Данные ДЗЗ успешно используются для распознавания групп пород леса, определения биофизических и структурных параметров лесного покрова, оценки запасов и продуктивности насаждений (Исаев А.С., Барталев С.А., Ершов Д.В., Егоров В.А., Жарко В. О., Стыщенко Ф.В., Гаврилюк В.А.).

Изначально методы определения структурных характеристик лесов в непрерывных шкалах возникли как альтернатива традиционной тематической классификации с целью повышения детальности и точности получаемых оценок. С развитием методов обработки данных ДЗЗ картографирование структуры лесов на глобальном и континентальном уровнях выделилось в отдельное направление, в рамках которого был построен ряд информационных продуктов различного пространственного разрешения (Baret F., DeFries R., Hansen M., Carrol M., Sexton J.). Такого рода продукты позволяют характеризовать, так называемую, горизонтальную структуру лесов, выражаемую, в частности, показателями проективного покрытия или сомкнутости древесного полога. При этом в силу того, что показатели горизонтальной структуры обладают высоким уровнем чувствительности к происходящим в лесах изменениям, для выявления последних необходимо обеспечить возможность получения разновременных оценок характеристик древесного полога леса. Однако большинство имеющихся информационных продуктов с полным охватом территории страны не позволяют получать регулярные разновременные оценки показателей горизонтальной структуры лесов.

Будучи логическим продолжением ранее выполненных исследований в области методов дистанционной оценки горизонтальной структуры лесов по спутниковым данным ДЗЗ, полученные в настоящей работе результаты, открывают

новые возможности регулярного сбора в масштабах страны информации о динамике показателей проективного покрытия древесного полога, сомкнутости крон леса и лесистости территории.

Целью диссертации является разработка методов обработки данных спутниковых наблюдений оптическими системами ДЗЗ для оценки показателей горизонтальной структуры лесов. Для достижения указанной цели были решены следующие научные **задачи**:

- проведен анализ физических основ дистанционного зондирования лесов, методов обработки данных оптических спутниковых систем ДЗЗ для оценки характеристик лесного покрова;
- разработан и апробирован метод дистанционной оценки проективного покрытия древесного полога леса на основе спутниковых изображений, полученных при наличии снежного покрова на земной поверхности;
- разработан и апробирован метод дистанционной оценки лесистости территории и сомкнутости древостоя с использованием данных о проективном покрытии древесного полога леса;
- на основе разработанных в диссертации методов и данных спутниковых измерений спектрально-отражательных характеристик земного покрова спектрометрией MODIS сформированы временные ряды информационных продуктов, отражающих характеристики горизонтальной структуры лесов России за период 2001-2019 годов;
- разработан метод детектирования рубок, в том числе выборочных, по данным спутниковых измерений динамики проективного покрытия древесного полога леса;
- проведена апробация разработанного метода детектирования рубок леса с использованием данных спутниковых систем Landsat-8 и Sentinel-2 в различных регионах России.

Объектом исследования диссертационной работы являются методы количественной оценки характеристик лесов по оптическим данным ДЗЗ.

Предметом исследования являются показатели горизонтальной структуры лесов.

Научная новизна диссертации заключается:

- в разработке новых методов оценки проективного покрытия древесного полога, лесистости территории и сомкнутости крон по спутниковым данным с наличием снежного покрова на земной поверхности, позволяющих регулярно получать оценки указанных характеристик на всей территории страны;
- во впервые проведенной количественной оценке показателей горизонтальной структуры лесов и формировании временных рядов данных об их многолетней динамике на территории страны за период 2001-2019 годов;
- в создании нового метода детектирования изменений в лесах по разновременным данным дистанционного зондирования Земли на основе динамики оценок проективного покрытия древесного полога леса, позволяющего детектировать изменения, не приводящие к полной смене типа покрова, например, участки выборочной рубки леса.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Автоматизированные методы дистанционной оценки показателей горизонтальной структуры лесов (проективного покрытия древесного полога, сомкнутости крон и лесистости территории), основанные на использовании спутниковых данных ДЗЗ, полученных при наличии снежного покрова на земной поверхности, построении локально-параметризованной регрессионной модели и уравнений связи между определяемыми характеристиками;
2. Полученная на основе разработанных методов и временных рядов данных ДЗЗ спектрорадиометром MODIS гармонизированная совокупность уникальных информационных продуктов, отражающих пространственное распределение различных показателей горизонтальной структуры лесов России и их динамику в период 2001-2019 годов;

3. Автоматизированный метод выявления изменений лесов на основе разновременных дистанционных измерений по данным оптических систем ДЗЗ проективного покрытия древесного полога леса на основе линейной модели спектральных смесей, обеспечивающий подпиксельное детектирование участков нарушений лесов, в том числе, мест выборочных рубок.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость состоит в усовершенствовании теории и методов автоматизированной обработки спутниковых данных ДЗЗ с целью определения показателей горизонтальной структуры лесов, в том числе, в масштабах страны. Полученные в диссертации результаты нашли применение в решении ряда научных и практических задач спутникового мониторинга лесов России, направленных, в том числе, на оценку их ресурсно-экологического потенциала и мониторинга бюджета углерода. Сформированные временные ряды данных о показателях горизонтальной структуры лесов используются при проведении исследований влияния климатических изменений на динамику лесного покрова России. Разработанный метод детектирования рубок на основе оценки изменений проективного покрытия древесного полога лесов реализован в виде программных инструментов в составе информационных систем «ВЕГА – Лес» и «Вега – Приморье».

Методология и методы исследования. Методологической основой диссертационной работы являются труды отечественных и зарубежных ученых, посвящённые проблемам мониторинга лесов по данным систем ДЗЗ из космоса и автоматизированных методов обработки данных спутниковых наблюдений. Исследование проведено на основе разновременных многоспектральных спутниковых данных, получаемых системами ДЗЗ MODIS, Landsat 8 OLI, Sentinel-2. Для решения задач диссертационного исследования были использованы программные комплексы ERDAS Imagine и LAGMA-Plus, программный язык Python, а также методы математической статистики.

Реализация и внедрение. Диссертационная работа выполнена в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). Результаты

работы использованы при выполнении проекта РАН № 01.20.0.2.00164 (тема "Мониторинг"), гранта Российского фонда фундаментальных исследований №17-05-41152 РГО_а, проекта Министерства науки и высшего образования России (соглашение ЭБ 075-15-2019-1374, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57718X0294), проекта Российского научного фонда (№19-77-30015).

Апробация работы. Основные положения диссертации и полученные результаты доложены на 23 российских конференциях в том числе, таких как «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (ИКИ РАН), «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (ИКИ РАН), «Цифровые технологии в лесном секторе» (СПбГЛТУ) и «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии» (ЦЭПЛ РАН).

Достоверность результатов диссертации подтверждается их согласованностью с экспертными оценками, другими картографическими продуктами, в том числе зарубежными, независимо полученными по другим методикам, результатами картографирования лесного покрова по данным ДЗЗ высокого пространственного разрешения, имеющимися данными наземных обследований лесов.

Соответствие паспорту специальности 25.00.34. Диссертация соответствует паспорту специальности 25.00.34 – «Аэрокосмическое исследование Земли, фотограмметрия» в части:

- пункта 4 «Теория и технология дешифрирования изображений с целью исследования природных ресурсов и картографирования объектов исследований»;
- пункта 5 «Теория и технология получения количественных характеристик динамики природных и техногенных процессов с целью их прогноза».

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе 10 научных работ в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК

России, 5 из них в журналах, входящих в международную реферативную базу данных Scopus.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы и двух приложений. Основной текст работы включает 121 страниц, 26 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 118 наименований источников на русском и английском языках.

РАЗДЕЛ 1. ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ЛЕСОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ СЪЁМКИ.

1.1 Необходимость оценки показателей горизонтальной структуры лесов для определения их ресурсно-экологического потенциала

В заданных лесорастительных условиях количество деревьев, их распределение по скорости роста, диаметру ствола и высоте, устойчивость против болезней и экстремальных для данных условий значений влажности и температуры, запас и общая продуктивность древостоев напрямую зависят от их горизонтальной и вертикальной структуры [19, 32]. Под показателями горизонтальной структуры лесов понимаются характеристики, описывающие пространственную плотность проективного покрытия земной поверхности заданной территории элементами древесной растительности на различных уровнях структурной дифференциации, включая элементарные фракции деревьев (вегетативные органы, ветви и стволы), кроны и насаждения. При описании горизонтальной структуры леса различают два явления, характеризующих ее неоднородность – комплексность и мозаичность [18, 7]. Под комплексностью понимают сочетания участков различных сообществ (разные доминирующие типы покрова), например, фрагментов болот и леса. Под мозаичностью понимают горизонтальную неоднородность внутри одного типа леса [11]. Даже небольшим по площади участкам леса свойственна неоднородность строения растительного покрова, связанная с особенностями компонентов среды – подстилающих пород, почв, особенностей рельефа, динамических процессов и т.д. Участки леса, различающиеся между собой составом, структурой, свойствами основных компонентов (древостоя, подроста, подлеска, наземного покрова), распределением их по площади, количественными показателями в связи с условиями местообитания, а также отличающиеся друг от друга (в том числе плотности населения, например, более осветленные и более затененные), называются парцеллами [11]. Для каждого типа леса характерен свой набор парцелл, которые чередуются в определенной последовательности и отражают как экологические условия, а

именно влаго- и теплообеспеченность, свойства почв и особенности микрорельефа, положение в рельефе, так и обстановку внутри ценоза, включая затенение почвы и нижележащих ярусов верхними, конкуренцию за питательные вещества и влагу, характер обсеменения.

Горизонтальную структуру древесного полога принято характеризовать на разных уровнях масштаба исследования: макроуровне – уровне лесхоза, района, страны и на локальном уровне выдела или насаждения. Для описания горизонтальной структуры полога леса на макроуровне часто используют показатель лесистости, равный отношению покрытой лесом площади к общей площади рассматриваемой территории. Лесистость выражается в процентах и отличается в разных районах страны в зависимости от физико-географических условий: климата, орографии, почв и степени хозяйственного освоения. Для таежных лесов характерна наиболее высокая лесистость (50-80%), в то время как лесистость лесостепной зоны составляет 10-25% [20]. Изменение лесистости прежде всего связывают с изменением хозяйственного режима, например, вырубкой леса или забрасыванием сельскохозяйственных земель, и с природными явлениями, такими как пожары и ветровалы, усыхание лесов вследствие разных причин и др.

На локальном уровне горизонтальную структуру древесного полога характеризуют густота древостоя, то есть число деревьев на 1 га, сомкнутость крон и проективное покрытие древесного полога леса. Сомкнутость крон леса определяется как отношение сумм площадей горизонтальных проекций крон деревьев (без учета внутрикронных просветов) с учетом их перекрытия к занимаемой площади и выражается долей от единицы или в процентах [25]. Сомкнутость крон характеризует степень использования пространства кронами деревьев и светопользования для фотосинтеза. Густота древостоя и сомкнутость крон играют большую роль в процессе роста и развития насаждения, в частности, влияют на формирование нижних ярусов растительности и успешность естественного возобновления леса [21].

Под проективным покрытием древесного полога леса понимают отношение суммы площадей горизонтальных проекций крон деревьев насаждения к общей площади участка, на котором оно произрастает. Проективное покрытие древесного полога леса – характеристика близкая к сомкнутости крон, отличающая от последней учетом пространств внутри крон, через которые под полог проникает свет. Проективное покрытие древесного полога леса, как и сомкнутость крон, характеризует степень использования деревьями пространства и выражается как в процентах от площади, так и в долях единицы. Сомкнутость крон и проективное покрытие полога древостоя зависят от породы деревьев, их возраста и лесорастительных условий. Характеристики сомкнутости крон и проективного покрытия древесного полога леса являются аддитивными по породе, то есть в случае произрастания деревьев двух пород на рассматриваемом участке общая сомкнутость крон (проективное покрытие древесного полога леса) равна сумме сомкнутостей крон (проективных покрытий древесного полога леса) каждой из пород.

С точки зрения определения хозяйственной ценности древостоя горизонтальную структуру древесного полога принято характеризовать с помощью полноты древостоя, то есть степени занятости площади стволовой массой. По определению абсолютная полнота древостоя равна сумме поперечных сечений стволов на высоте 1,3 м в м² на 1 га, а относительная полнота – отношению абсолютной полноты древостоя к показателю абсолютной полноты эталонного (нормального) древостоя для определенной породы, возраста и бонитета, взятого из соответствующих таблиц хода роста [20]. Относительная полнота обычно выражается в долях от единицы. Чем выше полнота, тем больше запас древесины на единице площади. На практике абсолютная полнота используется для определения запаса насаждения, относительная — для назначения хозяйственных мероприятий.

В терминах измеряемых характеристик лесов явления комплексности и мозаичности горизонтальной структуры лесного покрова проявляются в первом

случае в увеличении диапазона значений лесистости, а во втором в расширении диапазона таких показателей горизонтальной структуры как сомкнутость крон и полнота лесов.

Для построения связи между указанными характеристиками рассмотрим некоторую территорию, или участок, на которой растет лес. Пусть S – площадь рассматриваемой площадки и в пределах неё: $S_{\text{нелес}}$ – площадь непокрытая лесом на ней, $S_{\text{лес}}$ – площадь покрытая лесом. Площадь, покрытую лесом, на которой растет n деревьев можно представить, как

$$S_{\text{лес}} = S_{\text{межкр}} + \sum_{i=1}^n (S_{\text{кр}}^i + S_{\text{внтркр}}^i), \quad (1)$$

где $S_{\text{межкр}}$ – площадь, не покрытая кронами деревьев (без учета просветов внутри крон), $S_{\text{кр}}^i$ – площадь кроны i -го дерева без просветов внутри кроны, $S_{\text{внтркр}}^i$ – площадь внутрикрупных просветов для кроны i -го дерева. Тогда рассматриваемые характеристики горизонтальной структуры могут быть определены как:

– Лесистость

$$L \stackrel{\text{def}}{=} \frac{S_{\text{лес}}}{S} \quad (2)$$

– Сомкнутость крон

$$fTC \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\sum_{i=1}^n (S_{\text{кр}}^i + S_{\text{внтркр}}^i)}{S_{\text{лес}}} \quad (3)$$

– Проективное покрытие древесного полога леса

$$TC \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\sum_{i=1}^n S_{\text{кр}}^i}{S} \quad (4)$$

Рассмотрим указанные характеристики для насаждения одной породы. Для спутниковых данных с пространственным разрешением 20 и более метров отдельные кроны деревьев не различимы на изображении. Поэтому введем μ -величину, характеризующую светопроницаемость кроны для рассматриваемой породы, такую, что есть $S_{\text{внтркр}}^i = \mu S_{\text{кр}}^i$. Тогда верно, что

$$fTC = \frac{(1 + \mu) \sum_{i=1}^n S_{кр}^i}{S_{лес}}. \quad (5)$$

Отсюда

$$TC = \frac{fTC}{1 + \mu} L. \quad (6)$$

Таким образом, при построении карт можно считать, что сомкнутость крон и проективное покрытие древесного полога леса, оцененные по спутниковым данным среднего и низкого разрешения, отличаются на лесистость, нормированную на величину, характеризующую проницаемость кроны для данной породы. Из полученного уравнения связи видно, что при оценивании показателей горизонтальной структуры по спутниковым данным на полностью покрытых лесом территориях, проективное покрытие древесного полога леса для насаждений с одной преобладающей породой с точностью до множителя совпадает с сомкнутостью крон. Для территорий, где в основном присутствуют сомкнутые леса, то есть леса с сомкнутостью близкой к единице, проективное покрытие древесного полога леса и лесистость также отличаются на константу.

Соотношение между сомкнутостью крон и относительной полнотой не постоянно и меняется в зависимости от породы, возраста, состояния насаждений и условий произрастания. Примером, когда относительная полнота существенно меньше сомкнутости крон являются густые молодые леса на зарастающих вырубках или бывших сельскохозяйственных полях [21]. На основании работ отечественных лесоводов считается, что между относительной полнотой и сомкнутостью крон существует тесная корреляционная связь. [29, 31, 27]. Смоделируем кроны и стволы рассматриваемого насаждения с помощью окружностей. Тогда сомкнутость крон можно представить, как

$$fTC = \frac{\pi(1 + \mu) \sum_{i=1}^n r_i^2}{S_{лес}} = \frac{\pi n(1 + \mu) \bar{r}^2}{S_{лес}}, \quad (7)$$

где \bar{r} – средний радиус кроны дерева. Выразим площадь леса через \bar{r} и n_{fTC}^{opt} – оптимальное количество деревьев в насаждении с заданным радиусом кроны, при котором сомкнутость крон максимальна, предположив для удобства расчётов, что рассматриваемая площадка квадратная:

$$S_{лес} = 4n_{fTC}^{opt}\bar{r}^2 \quad (8)$$

Отсюда

$$fTC = \frac{\pi}{4}(1 + \mu) \frac{n}{n_{fTC}^{opt}} \quad (9)$$

Таким образом сомкнутость крон леса в основном определяется множителем $\frac{n}{n_{fTC}^{opt}}$, который характеризует пространственную плотность относительно максимально сомкнутого насаждения на данной территории.

Относительную полноту насаждения по определению можно представить в виде

$$RS \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\sum_{i=1}^n \pi d_i^2}{\sum_{j=1}^{n_{rs}^{opt}} \pi d_j^2}, \quad (10)$$

где d_i – радиус ствола на высоте 1,3 м, n_{rs}^{opt} – количество деревьев в нормальном насаждении. Тогда относительную полноту можно выразить как

$$RS = \frac{n}{n_{rs}^{opt}} \left(\frac{\bar{d}}{d_{opt}} \right)^2, \quad (11)$$

где \bar{d} – средний радиус ствола на высоте 1,3 м, а d_{opt} – средний радиус ствола нормального насаждения. Первый множитель $\frac{n}{n_{rs}^{opt}}$ характеризует пространственную плотность относительно максимально полного насаждения на данной территории, а второй множитель, равный квадрату отношения средних диаметров рассматриваемого и полного насаждения зависит прежде всего от условий произрастания, преобладающей породы и возраста. Таким образом, при моделировании связи относи-

тельной полноты от сомкнутости крон насаждения необходимо учитывать локальные условия внешней среды для развития и роста древостоя, то есть бонитет и тип леса.

На практике для восстановления зависимости полноты от сомкнутости крон леса используются как линейные, так и более сложные модели. И.А. Рыльский использовал квадратичную зависимость для восстановления зависимости между относительной полнотой и сомкнутостью крон для сосновых, кедровых и березовых насаждений Емельяновского лесничества Красноярского края [28]. В работе [6] авторы получили слабую линейную зависимость между двумя упомянутыми выше характеристиками для смешанных лесов северотаежного района европейской части России. Авторы работы [2] применили кусочно-линейную функцию для оценки относительной полноты лесов в Междуреченском лесхозе республики Коми. Модельные зависимости между относительной полнотой и сомкнутостью крон в основном имеют локальный характер и строятся для одной породы в пределах одних лесорастительных условий, что накладывает ограничения на их применение на более обширных территориях.

Из формализованных определений характеристик горизонтальной структуры лесов можно заметить, что проективное покрытие и лесистость даны для площади некоторой территории, поэтому могут быть рассчитаны и для участка земной поверхности, покрываемого пикселем спутниковых данных. В тоже время сомкнутость и относительная полнота – характеристики, определенные для насаждения, площадь которого часто меньше часть пикселя данных MODIS или естественные границы насаждения не совпадают с регулярными границами данных. Поэтому для корректной оценки указанных характеристик на основе спутниковых данных необходимо учитывать долю площади занимаемой лесным насаждением в пикселе, то есть лесистость.

Необходимость оценки показателей горизонтальной структуры лесов России вызвана следующими причинами. Во-первых, полнота и сомкнутость крон насаж-

дения являются важными лесоинвентаризационными показателями, характеризующими наличие запасов стволовой древесины на исследуемой территории. Данные показатели необходимы для планирования лесоводственных работ и лесозаготовки. Мониторинг динамики данных характеристик является основой устойчивого управления лесами и оценки их ресурсно-экологического потенциала [5, 110]. Во-вторых, данные о горизонтальной структуре леса являются важным компонентом при построении экологических моделей. Показатели плотности расположения стволов деревьев тесно связаны с количеством биомассы и запасов углерода. Кроме того, полнота древостоя необходима в качестве связующего параметра для совместного использования оценок запасов насаждений, полученных по спутниковым данным, и моделей хода роста [33]. В-третьих, изменение проективного покрытия древесного полога леса или сомкнутости крон свидетельствуют о процессах, происходящих в лесах, таких как вырубках, пожарах, ветровалах, усыханиях и других [53, 1]. Поэтому на основе динамики показателей горизонтальной структуры возможно строить алгоритмы детектирования и количественные оценки величины изменений, происходящих в лесах [118].

1.2 Возможности данных оптических систем дистанционного зондирования Земли для оценки показателей горизонтальной структуры лесного покрова

Под дистанционным зондированием Земли (ДЗЗ) понимают регистрацию электромагнитного излучения, отраженного земной поверхностью, спутниковым (или авиационным) прибором. Полученные данные об интенсивности отражения земной поверхности свидетельствуют об свойствах рассматриваемого объекта. В зависимости от источника регистрируемого излучения дистанционное зондирование делят на активное и пассивное. Под активным дистанционным зондированием Земли понимают ситуацию, при которой сам прибор, регистрирующий излучение, является его источником. Примером активного дистанционного зондирования является использование радарных систем,

генерирующих электромагнитные волны в диапазоне от $\lambda = 1\text{мм}$ до $\lambda = 1\text{м}$. Распространение излучения в этих диапазонах спектра в основном не подвержено влиянию атмосферы, облачности и осадков, что обуславливает возможность использования радарных систем дистанционного зондирования Земли вне зависимости от времени суток и метеорологических условий [9]. Параметры радарного сигнала, отраженного растительным покровом, напрямую зависят от его горизонтальной и вертикальной структуры, что позволяет широко использовать методы активного дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне спектра для оценки его характеристик [110].

В случае пассивного дистанционного зондирования прибором регистрируется излучение самого объекта или отраженного объектом излучения внешнего источника, например, Солнца. К оптическому диапазону спектра, который наиболее часто используют при пассивном дистанционном зондировании Земли, относят излучение в диапазоне длин волн $\lambda = 0.3\text{-}15.0\text{ мкм}$. В отличие от микроволнового излучения, распространение электромагнитного излучения в оптическом диапазоне спектра подвержено заметному влиянию атмосферы, которое необходимо учитывать при изучении объектов земной поверхности. Различают три типа взаимодействия падающего излучения с земной поверхностью: отражение, поглощение и пропускание. Соотношение между данными типами взаимодействия для разных длин волн определяют спектрально-отражательные свойства объекта, выражаемые на практике коэффициентами спектральной яркости (КСЯ). Коэффициенты спектральной яркости земной поверхности зависят как от типа объекта, так и от физических условий, в которых объект находится.

Зелёная растительность обладает характерными особенностями спектрального отражения, существенно изменяющегося с длиной волны (рисунок 1.2.1).

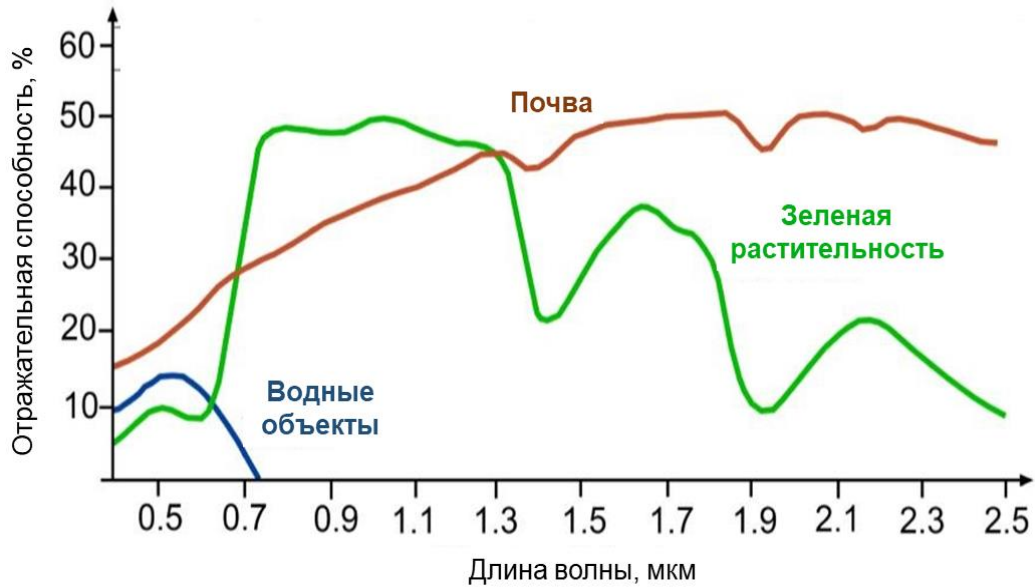


Рисунок 1.2.1 – Характерная спектральная отражательная способность зелёной растительности по сравнению с другими объектами [9]

В видимой области спектра отражательная способность листа определяется в основном наличием хлорофилла и других пигментов. Две полосы поглощения хлорофилла в синей (0,45 мкм) и красной (0,65 мкм) областях спектра, определяют низкий уровень отражения растительности в видимом диапазоне. Относительное отсутствие поглощение света на длинах волн между полосами поглощения обуславливает локальный максимум отражательной способности приблизительно на 0,54 мкм в зелёной части спектра. В ближнем ИК диапазоне растительный покров характеризуется высокой отражательной и пропускательной способностью и низким уровнем поглощения электромагнитных волн. Особенности отражения растительного покрова в этом спектральном диапазоне определяются как клеточной структурой листа, так вертикальной структурой полого. В среднем инфракрасном диапазоне спектра на длинах волн 1,4, 1,9 и 2,7 мкм на спектральный отклик растительности влияет содержание влаги и толщины воды, так как на эти длины волн приходятся полосы водного поглощения. При уменьшении влаги в листьях их отражательная способность в среднем инфракрасном диапазоне спектра увеличивается.

Естественная фенологическая динамика растительности, являясь причиной накопления и разрушения пигментов, изменениями в содержании влаги и клеточной структуре растительности, влияет на ее спектрально-отражательные отклик. Как следствие этого спектрально-отражательная способность является непрерывной функцией времени. Анализ временной динамики характеристик отраженного излучения растительного покрова лежит в основе использования оптических данных дистанционного зондирования Земли для оценки структурных характеристик растительности.

Помимо оптических свойств объекта исследования детальность и свойства спектрально-отражательной кривой определяются характеристиками прибора, с помощью которого она была получена. Наиболее часто используемые спутниковые системы для оценки параметров растительного покрова представлены в таблице 1.2.1. Основными параметрами набора предоставляемых сенсором данных являются: спектральное, пространственное, радиометрическое и временное разрешения. Спектральное разрешение определяется набором и диапазоном спектральных каналов сенсора. Большинство используемых сенсоров для детектирования растительности имеют спектральные каналы в видимом (VIS), ближнем инфракрасном (NIR) и среднем инфракрасном (SWIR) диапазонах спектра (таблица 1.2.1).

Радиометрическое разрешение характеризует наименьшую разность уровней энергии, которые может зафиксировать прибор. Данный параметр указывает на уровень дискретизации, то есть на количество информации, содержащейся в изображении.

Под пространственным разрешением понимается линейный размер площадки поверхности, соответствующей одной элементарной ячейке прибора. Чем выше пространственное разрешение, тем больше детальность объектов, которые можно наблюдать, и тем больше объем спутниковых данных, необходимых для обработки.

Временное разрешение данных дистанционного зондирования Земли характеризует периодичность сбора данных с одних и тех же участков земной

поверхности. При наличии облачности в поле зрения прибора результат измерения характеристик земной поверхности оптическим прибором ДЗЗ становится неинформативным. Поэтому частота съёмки является критическим параметром при использовании данных оптических спутниковых систем, от нее зависит возможность обнаружения изменений, происходящих на рассматриваемой территории. Кроме того, временное разрешение влияет на возможность классификации и восстановления характеристик растительности по спутниковым данным [5].

Использование спутниковых данных для оценки характеристик растительного покрова определяется не только параметрами сенсора, но и спецификой задачи исследования. Таблица 1.2.2 иллюстрирует основные возможности разных типов сенсоров для оценки качественных и структурных характеристик лесов. С момента появления в свободном доступе данные оптических спутниковых систем AVHRR, MODIS, SPOT-Vegetation нашли широкое применение при картографировании лесного покрова [5, 43, 45, 56, 65, 68, 85]. Построенные на основе спутниковых данных карты растительности с пространственным разрешением от 250 м до 8 км были применены, в том числе, для параметризации климатических моделей, моделирования динамики растительности и оценки покрытой лесом площади [59]. При классификации по типам покрова использовалось разделение лесов по ключевым структурным и функциональным параметрам, включающим тип листа (хвойные / лиственные), время жизни листа (листопадные / вечнозелёные), тип растительности (травянистая / древесная). С развитием технологий и программных возможностей обработки данных подобные локальные и глобальные карты типов покрова были созданы на основе данных более высокого пространственного разрешения [8, 60].

Возможность проведения ежедневных наблюдений с помощью прибора MODIS в комбинации с достаточным пространственным разрешением позволили провести более детальную классификацию лесов по типам преобладающих пород на основе анализа динамики КСЯ в течение вегетационного [14].

Многолетнее применение данных оптических систем ДЗЗ для картографирования лесного покрова продемонстрировало их чувствительность к пространственной структуре лесов, расположению теней и просветов в пологе. Поэтому данные широко используются для оценки проективного покрытия древесного полога леса и лесистости [13, 41, 48, 54, 66, 69].

Несколько попыток оценки вертикальной структуры сомкнутых лесов и характеристик, сильно зависящих от нее, таких как биомасса, на основе спутниковых данных оптических систем ДЗЗ, полученных в течение вегетационного сезона, привели к получению результатов с недостаточной точностью [89, 99]. Так как на интенсивность отражения в видимом и ближнем ИК диапазонах в сомкнутых насаждениях основное влияние оказывают деревья верхнего яруса леса и совсем небольшое количество света проходит внутрь полога, отражение, фиксируемое оптическими приборами ДЗЗ, оказывается практически независимым от вертикальной структуры полога. Кроме того, в ближнем инфракрасном диапазоне спектра происходит многократное отражение излучения от поверхности листьев в пологе, что приводит к быстрому насыщению сигнала в спектральном канале [37]. В несомкнутых лесах, где благодаря теням от стволов, имела место возможность косвенно связать высоту древостоя с коэффициентами спектральной яркости, построенные локальные модели для оценки биомассы оказались достаточно надежны [50, 63]. Кроме того, благодаря отсутствию листового покрова в зимний сезон, а, следовательно, лучшему прохождению света сквозь полог, удалось успешно использовать данные с наличием снежного покрова спутниковой системы Landsat и MODIS для оценки запасов древесины [15, 30].

Использование спутниковых данных, полученных в период наличия снежного покрова, повышает точность и устойчивость оценки проективного покрытия древесного полога леса [34]. Повышение разделимости между подстилающей поверхностью и лесными классами в зимний период связано как с уменьшением различий между разными типами подстилающей поверхности, находящимися под снегом, так и с уменьшением различий между разными типами леса из-за сброса

листвы и отсутствия вегетационной изменчивости. Поэтому использование спутниковых данных с наличием снежного покрова для оценки проективного покрытия древесного полога леса и других показателей горизонтальной структуры в настоящее время является перспективным направлением исследований.

Необходимая периодичность построения данных характеристик, выбранный временной интервал оценивания и охват территории определяют выбор спутниковых данных MODIS в качестве основного источника данных для оценки данных показателей горизонтальной структуры лесов в данной работе. Наличие в Институте космических исследований непрерывно пополняемого архива данных ежедневных наблюдений прибором MODIS для всей территории России начиная с 2000 года дают возможность проводить анализ временных серий спутниковых [24]. На основе ежедневных данных прибора MODIS в Институте космических исследований разработан алгоритм построения безоблачных композитных изображений с наличием снежного покрова на земной поверхности [5]. Для исключения облачности и теней из спутниковых данных алгоритм использует классификацию измерений на основе спектрального индекса снега NDSI и значений коэффициентов спектральной яркости в третьем спектральном канале MODIS (0.46-0.48 мкм), а также применение геометрической модели теней. Дальнейшие шаги алгоритма включают статистическую фильтрацию временного ряда в красном и ближнем ИК канале от остаточных шумов и полиномиальную интерполяцию для восстановления пропущенных значений коэффициентов спектральной яркости регулярного временного ряда [26]. В силу особенностей образования устойчивого снежного покрова на территории России, композитные изображения строятся за период с января по апрель отдельного года. Для устранения межгодовых неоднородностей, вызванных глубиной и состоянием снежного покрова, композитные изображения проходят процедуру взаимной локально-адаптивной нормализации на основе территорий, непокрытых лесом. В результате работы алгоритма строится однородный временной ряд композитных

изображений с наличием снежного покрова, который может быть использован в широком спектре задач, касающихся оценки характеристик лесов.

1.3 Опыт использования данных оптических систем дистанционного зондирования Земли для оценки показателей горизонтальной структуры лесов

Наземные измерения и данные дистанционного зондирования Земли являются двумя основными источниками информация о горизонтальной структуре растительности. Методы в определения горизонтальной структуры напрямую на основе полевых измерений включает в себя как непосредственную оценку на местности (визуальную экспертную оценку или измерение), так и использование оптических инструментов измерения, например, фотосъёмки. Методы оценки показателей горизонтальной структуры на основе оптических данных дистанционного зондирования Земли оценивают один из вышеупомянутых показателей пространственного распределения растительности в пикселе спутникового изображения на основе некоторой модели, преобразующей коэффициенты спектральной отражения земной поверхности в искомые характеристики. Наземные измерения показателей обладают более высокой точностью по сравнению с их аналогами, полученными по спутниковым данным, так как во втором случае параметры насаждения получены на основе применения модели и включают в себя ее погрешность. В тоже время использование спутниковых данных для оценки данных характеристик имеет ряд преимуществ. Космическая съёмка отличается постоянством и автономностью, так как данные собираются с одних и тех же территорий через заданные интервалы одной и той же регистрирующей системой в течение продолжительного времени. Таким образом, спутниковые данные позволяют производить оценку регулярно при минимальном вмешательстве человека. Кроме того, спутниковые данные позволяют одновременно охватывать большие площади, что невозможно при наземных обследованиях.

Таблица 1.2.1 – Характеристики наиболее часто используемых оптических сенсоров

	Сенсор	Спектральный диапазон съёмки	Пространственное разрешение, м	Радиометрическое разрешение (бит)	Временное разрешение, сут.	Время съёмки
Среднее разрешение (100 – 1000 м)	AVHRR	R, NIR, SWIR	1000	10	1	1979 – н.в.
	MODIS	R, NIR B, G, SWIR	250 500	12	1	1999 – н.в.
Высокое Разрешение (5 – 100 м)	Proba -V	B, R, NIR, SWIR	100	8	1-2	2013 – н.в.
	Landsat (MSS, ETM+, OLI)	Pan Vis, NIR SWIR	15 30 30 – 60	8	16	1984 – н.в.
	Sentinel-2	Vis NIR SWIR	10 10 – 20 20 – 60	12	5	2015 – н.в.
	SPOT (HRVIR)	Pan Vis, NIR, SWIR	1,5 5 – 20	8	26	1986 – н.в.
Сверхвысокое разрешение (< 5 м)	Ikonos	Pan Vis, NIR	1 4	11	3 – 5	1999 – н.в.
	QuickBird	Pan Vis, NIR	0,6 2,4	11	1 – 3.5	2001 – н.в.
	WorldView	Pan, Vis, NIR, SWIR	0,3 – 3,7 м	11	1.7 – 5.9	2007 – н.в.

Pan – панхроматический, Vis – видимый, NIR – ближний инфракрасный, SWIR – средний инфракрасный диапазоны электромагнитного спектра; B – голубой, G – зелёный, R – красный диапазоны видимого спектра

Таблица 1.2.2 – Возможность использования данных спутниковых систем для оценки качественных и количественных характеристик растительного покрова (на основе работы [92] и данных автора)

Параметры	Качественные			Структурные			
	Типы покрова	Породный состав	Содержание пигментов	Листовая поверхность	Проективное покрытие древесного полога	Вертикальная структура	Биомасса
Пассивное оптическое ДЗЗ, пространственное разрешение <10м (Ikonos, QuickBird, WorldView)	++	+					+
Пассивное оптическое ДЗЗ, пространственное разрешение <100м (Landsat, SPOT, Sentinel-2)	++	+		++	++		+
Пассивное оптическое ДЗЗ, пространственное разрешение >100м (AVHRR, MODIS, MERIS, SPOT-VGT)	++	+		++	++		+
Гиперспектральное ДЗЗ (AVIRIS, Hyperion, ENMAP)	++	++	++	++	++		+
Активное оптическое ДЗЗ (лидар) (ICESat, GEDI, LVIS)				+	++	++	++
Активное микроволновое ДЗЗ (радар) (JERS, PALSAR, ERS, Sentinel-1, NISAR)	+				+	+	

++ - часто использование, + - возможное использование

Методы оценки показателей горизонтальной структуры на основе оптических данных дистанционного зондирования Земли можно разделить на несколько групп: методы на основе эмпирических моделей, физических моделей и машинного обучения. Под эмпирическими моделями понимают простые статистические модели на основе регрессионного анализа. Данные методы оценки горизонтальной структуры древесного полога просты в использовании, поэтому наиболее широко распространены. Для построения статистических моделей обычно используют коэффициенты спектрального отражения или построенные на их основе вегетационные индексы (ВИ). Один из наиболее часто используемых вегетационных индексов - нормализованный разностный вегетационный индекс растительности NDVI [79]. Предыдущие исследования показали наличие корреляции между наличием растительности и NDVI. Связь между двумя данными характеристиками может моделироваться как линейной, так и более сложной зависимостью [47, 75, 113]. В работе [49] вместо NDVI используется почвенный индекс для построения линейной регрессионной модели между индексом и проективным покрытием полога растительности. Исследования показывают, что как линейные модели, так и нелинейные наиболее сильно ошибаются при оценке смешанных насаждений, так как даже при максимальном возможном значении проективного покрытия полога растительности, значение вегетационных индексов зависит от типа растительности, а именно, от содержания пигментов и структуры полога. Было получено, что различия между оценками проективного покрытия полога растительности с помощью NDVI могут достигать 40% для различных типов покрова [58]. В подтверждении данному факту в работе [84] показано что NDVI и проективное покрытие древесного полога леса не имеют достаточно надежной связи для лиственных лесов Сибири.

При моделировании показателей горизонтальной структуры с помощью физических моделей учитывают сложный процесс переноса солнечной энергии через полог растительности, который включает в себя отражение, пропускание и аккумуляцию света листьями и другими элементами растений. Поэтому данные

модели имеют повышенную сложность вычисления и часто требуют определения большого числа локальных параметров. На практике вычисления на основе подобных моделей часто проводят однократно для построения табличных функций или модели существенно упрощаются. Авторы работ [80] используют нейронные сети для оценки индекса листовой поверхности (LAI) по данным системы POLDER, а затем на основании уравнения переноса радиации рассчитывается проективное покрытие полога растительности. В работе [114] оценка проективного покрытия растительного полога происходит на основе уравнения переноса радиации в пологе леса и продукта GLASS LAI по данным системы MODIS.

Наиболее частым примером применения физических моделей является геометрическая модель разложения на чистые компоненты. Данные модели основаны на предположении что результирующее значение КСЯ пикселя представляет собой смесь значений КСЯ некоторого набора чистых компонент и КСЯ каждого пикселя не зависит от КСЯ соседних с ним пикселей. Линейная модель спектральных смесей может представлена следующим образом [107]:

$$R_b = \sum_{i=1}^n f_{i,b} r_{i,b} + e_b, \quad (12)$$

где R_b – КСЯ канала b спутникового изображения, n – количество чистых компонент, $r_{i,b}$ – КСЯ чистой компоненты i в канале b , $f_{i,b}$ – вес чистой компоненты i в канале b , e_b – чистые компоненты в канале b . Доля каждой компоненты в пикселе определяется решая систему уравнений относительно весов чистых компонент. Проективное покрытие древесного полога леса или другие характеристики горизонтальной структуры растительности вычисляются как сумма весов чистых компонент, соответствующих лесу или растительности. Устойчивость получаемого решения в основном зависит от выбора коэффициентов спектральной яркости чистых компонент [86]. Для получения устойчивого решения системы число чистых компонент не должно превосходить число используемых каналов спутниковых данных при условии их линейной независимости, что составляет наиболее существенное ограничение применения

данного метода на практике. Наиболее простым вариантом использования метода разложения на чистые компоненты является модель с двумя компонентами, соответствующими растительности и непокрытым растительностью территориям. В 1998 году группа ученых предложила использовать модель разложения на чистые компоненты на основе NDVI для оценки горизонтальной структуры растительности:

$$NDVI = fNDVI_v + (1 - f)NDVI_{nv}, \quad (13)$$

где f – доля растительности в пикселе, $NDVI_v$ – значение нормализованного разностного индекса растительности, $NDVI_{nv}$ – значение нормализованного разностного индекса для непокрытых растительностью территорий. Для вычисления последних двух параметров была проанализирована временная динамика вегетационного индекса и в качестве $NDVI_v$ и $NDVI_{nv}$ выбраны максимум и минимум NDVI растительности и непокрытых растительностью территорий [62, 116]. С. Leprieux и её коллеги использовали модель с двумя чистыми компонентами для выбора наилучшего предиктора горизонтальной структуры растительности среди наиболее часто используемых спектральных индексов [82]. Авторы работы [54] применили трехкомпонентную линейную модель спектральных смесей для оценки проективного покрытия полога древесной и травяной растительности на основе данных AVHRR. В работе [61] кроме линейной модели спектральных смесей с тремя компонентами в качестве исходных данных кроме NDVI используются показатель межгодовой чувствительности к осадкам. Авторы работы [57] используют стохастическую многокомпонентную линейную модель спектральных смесей на основе данных системы SEVIRI для оценки проективного покрытия растительного полога на территории Европы, Африки и Южной Америки. В работе [2] авторы применили трёхкомпонентную модель для оценки проективного покрытия древесного полога лиственных и темнохвойных лесов в Междуреченском лесхозе республики Коми. Д.В. Ершов в своей работе совместно использовал модель разложения на три чистые компоненты

и метод классификации спутниковых изображений без обучения для получения карты лесистости на территорию России [13].

С развитием технологий обработки данных в последнее время появляется все больше работ по оценке показателей горизонтальной структуры растительности с помощью методов машинного обучения. Методы машинного обучения являются методами поиска закономерностей в данных на основе обучающей выборки. Для построения достоверных моделей данной группой методов требуется большой объем данных пространственно-распределенной обучающей выборки. Наиболее часто используемые методы машинного обучения для оценки горизонтальной структуры растительности: нейронные сети, методы опорных векторов, деревья регрессий и случайного леса. В работе [46] авторы применили методы нейронных сетей и нелинейной регрессии многих переменных для оценки проективного покрытия древесного полога леса на северо-западе США. В работе показано, что метод на основе нейронных сетей демонстрирует лучший результат по оценке проективного покрытия древесного полога леса по спутниковым данным (коэффициент детерминации 0.57), чем методы линейной регрессии многих переменных. В работе [67] авторы использовали решающие деревья для построения продукта MODIS Vegetation Continuous Fields (MOD44B), переставляющего собой проективное покрытие древесного полога леса в пикселе данных. Авторы статьи [109] применили метод случайных лесов для оценки предсказательной способности разных спектральных каналов данных Sentinel-2 MSI для определения проективного покрытия полога растительности. В работе [74] авторы использовали метод опорных векторов для оценки лесистости территории по данным системы Landsat.

Основные континентальные и глобальные продукты показателей горизонтальной структуры растительности представлены в следующей таблице 1.3.1. Данные таблицы свидетельствуют, что частота построения картографических продуктов горизонтальной структуры лесов сильно зависит от пространственного разрешения исходных данных и сложности алгоритмов их обработки. В настоящее

время большинство ежегодных картографических продуктов глобального и континентального масштабов построены на основе данных низкого и среднего пространственного разрешения. Это связано прежде всего с сложностью алгоритмов обработки данных и современным состоянием вычислительных мощностей. В этой связи ежегодная оценка характеристик горизонтальной структуры растительности по данным Landsat TM/ETM+/OLI и Sentinel-2 MSI является предметом исследований научного сообщества.

Основной трудностью картографирования и оценки характеристик лесного покрова на протяженных территориях на основе данных дистанционного зондирования Земли является необходимость локальной параметризации моделей. Пространственная изменчивость географических климатических, и других условий окружающей среды обуславливает сильные различия между спектрально-отражательными свойствами насаждений, вызванными разными биофизическими и структурными параметрами, даже в рамках одного тематического класса. Данный факт ведет к уменьшению делимости между классами, и, как следствие, к понижению прогностической способности моделей. Одним из путей понижения внутри классового разброса признаков при ограниченности обучающей выборки и мощности используемого метода классификации/регрессии является стратификация территории на однородные с точки зрения внешних условий участки для локальной настройки используемой модели. В Институте космических исследований локальная параметризация модели реализована в виде инструмента LAGMA (Locally-Adaptive Global Mapping Algorithm) [44]. Исследуемая территория покрывается регулярной прямоугольной сеткой с шагом, обеспечивающим однородность условий окружающей среды между соседними узлами. Для каждой ячейки сетки выполняется независимая оценка характеристик классов или строится локальная регрессионная модель, при этом сбор обучающей выборки происходит в расширяющемся окне относительно выбранной ячейки до достижения достаточной представительности элементов рассматриваемого класса. В настоящее время программный комплекс LAGMA позволяет выполнять

классификацию данных дистанционного зондирования на больших территориях методом максимального правдоподобия и методом случайных деревьев, а также проводить анализ на основе линейной и множественной регрессии.

Наиболее частые параметры горизонтальной структуры, оцениваемые по спутниковым данным – проективное покрытие древесного полога леса и лесистость. Между тем, с точки зрения использования на практике гораздо больший интерес представляют такие характеристики как сомкнутость крон и полнота леса. Для полностью покрытых лесом территорий сомкнутость крон совпадает с проективным покрытием древесного полога леса. Изложенная выше связь между характеристиками использованы для разработки автором диссертации методов оценки проективного покрытия древесного полога леса, сомкнутости крон и лесистости на основе данных дистанционного зондирования Земли.

Таблица 1.3.1 – Основные используемые глобальные и континентальные показатели горизонтальной структуры растительности [83], переведено автором

Ссылка на статью	Показатель горизонтальной структуры	Название продукта	Сенсор	Разрешение	Пространственный охват	Временное охват	Используемый алгоритм
Gutman, Ignatov, 1998	Проективное покрытие полога растительности	Global Monthly Greenness Fraction	AVHRR	0.15 градусов; 30 дней	Глобальный	1985 – 1990	Линейная смесей с двумя компонентами на основе NDVI
DeFries, 1999	Проективное покрытие полога древесной и травяной растительности		AVHRR	8 км	Глобальный	1983, 1993	Линейная модель спектральных смесей
Zeng, 2000	Проективное покрытие полога растительности		AVHRR	1 км; 30 дней	Глобальный	1992 – 1993	Линейная смесей с двумя компонентами на основе NDVI
Roujean, Lacaze, 2002	Проективное покрытие полога растительности	FVC	POLDER	6 км; 10 дней	Глобальный	1996 – 1997, 2003	Нейронные сети и уравнение переноса радиации
García-Haro, 2019	Проективное покрытие полога растительности	LSA SAF FVC	SEVIRI	3 км; 1 день/ 10 дней	Европа, Америка, Африка	2005 – н.в	Линейная модель спектральных смесей
Vacour, 2006	Проективное покрытие полога растительности	TOAVEG FVC	MERIS	0.3 км; 30/10 дней	Европа	2002 – н.в	Нейронные сети
Baret, 2007	Проективное покрытие полога растительности	CYCLOPES FVC	VEGETATION	1 км; 10 дней	Глобальный	1999 – 2007	Нейронные сети

Ссылка на статью	Показатель горизонтальной структуры	Название продукта	Сенсор	Разрешение	Пространственный охват	Временное охват	Используемый алгоритм
Carrol, 2011	Лесистость территории	MODIS VCF	MODIS	250 м; 1 год	Глобальный	2000 – н.в	Деревья решений
Guan, 2012	Проективное покрытие полога древесной и травяной растительности		AVHRR GIMMS и др.	10 км; 15 дней	Юго-восток Африки	1999 – 2008	Линейная модель спектральных смесей
Baret, 2013	Проективное покрытие полога растительности	GEOV1 FVC	VEGETATION	1/112 град; 10 дней	Глобальный	1998 – н.в	Нейронные сети
Sexton, 2013	Проективное покрытие древесного полога леса		MODIS; TM/ETM+	30 м; 1 год	Глобальный	2000, 2005	Линейная регрессия
Hansen, 2013	Проективное покрытие древесного полога леса		ETM+	30 м; 1 год	Глобальный	2000 , 2010	Деревья решений
Wu, 2014	Проективное покрытие древесного полога леса		AVHRR; GIMMS; MODIS	10 км; 30 дней	Глобальный	1982 – 2011	Линейная смесей с двумя компонентами на основе NDVI
Jia, 2015	Проективное покрытие древесного полога леса	GLASS FVC	MODIS; TM/ETM+	0.5 км; 8 дней	Глобальный	2000 – н.в.	Нейронные сети
Xiao, 2016	Проективное покрытие древесного полога леса	TRAGL FVC	MODIS (GLASS LAI)	1 км; 8 дней	Глобальный	2000 – 2014	Уравнение переноса радиации в пологе леса
Mu, 2013	Проективное покрытие древесного полога леса	MuSyQ FVC	MODIS; FY3A/MERSI; FY3B/MERSI	1 км; 5 дней	Китай и Азия	2013	Линейная смесей с двумя компонентами на основе NDVI

Выводы к первой главе

- Существует ограниченный набор тематических продуктов, позволяющих получать информацию о показателях горизонтальной структуры древесного полога на территории России;
- Спектрально-отражательные свойства лесов зависят от их биофизических и структурных характеристик лесного покрова, что позволяет использовать оптические данные дистанционного зондирования Земли для оценки его параметров;
- Данные дистанционного зондирования с наличием снежного покрова на земной поверхности, могут быть использованы для изучения горизонтальной структуры лесов России;
- Современное состояние методов обработки данных дистанционного зондирования Земли обеспечивает возможность регулярной оценки показателей горизонтальной структуры лесного покрова на основе использования данных спутниковых наблюдений;
- Анализ необходимых показателей горизонтальной структуры лесов и связи между ними определяет последовательность получения данных показателей на основе спутниковых данных.

РАЗДЕЛ 2. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ЛЕСОВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

2.1 Метод дистанционной оценки проективного покрытия древесного полога леса

Знания о спектрально-отражательных свойствах растительности позволяют утверждать о существовании связи между проективным покрытием древесного полога леса и коэффициентами спектральной яркости земной поверхности. Приведенные на рисунке 2.1.1 двумерные гистограммы рассеяния проективного покрытия древесного полога леса и спектральных каналов красного и ближнего инфракрасного диапазона длин волн для разных сезонов демонстрируют, что наилучшую зависимость со значениями проективного покрытия древесного полога леса имеют спутниковые данные, полученные в зимнее время при наличии снежного покрова на земной поверхности. Данный факт вызван увеличением различия между спектрально-отражательными свойствами стволов и крон деревьев и подстилающей поверхности в зимний период и, одновременно, уменьшением внутриклассовых различий между разными типами подстилающей поверхности из-за нахождения под снегом.

Для оценки проективного покрытия древесного полога леса в качестве входных данных выбраны следующие продукты, полученные на основе данных дистанционного зондирования Земли:

- временной ряд радиометрически нормализованных зимних композитных изображений MODIS с 2001 по 2019 год [5],
- данные Tree Cover 2000 и 2010 [69],
- временной ряд ежегодных карт покрытых и непокрытых лесом земель, построенный на основе карт растительности России [3].

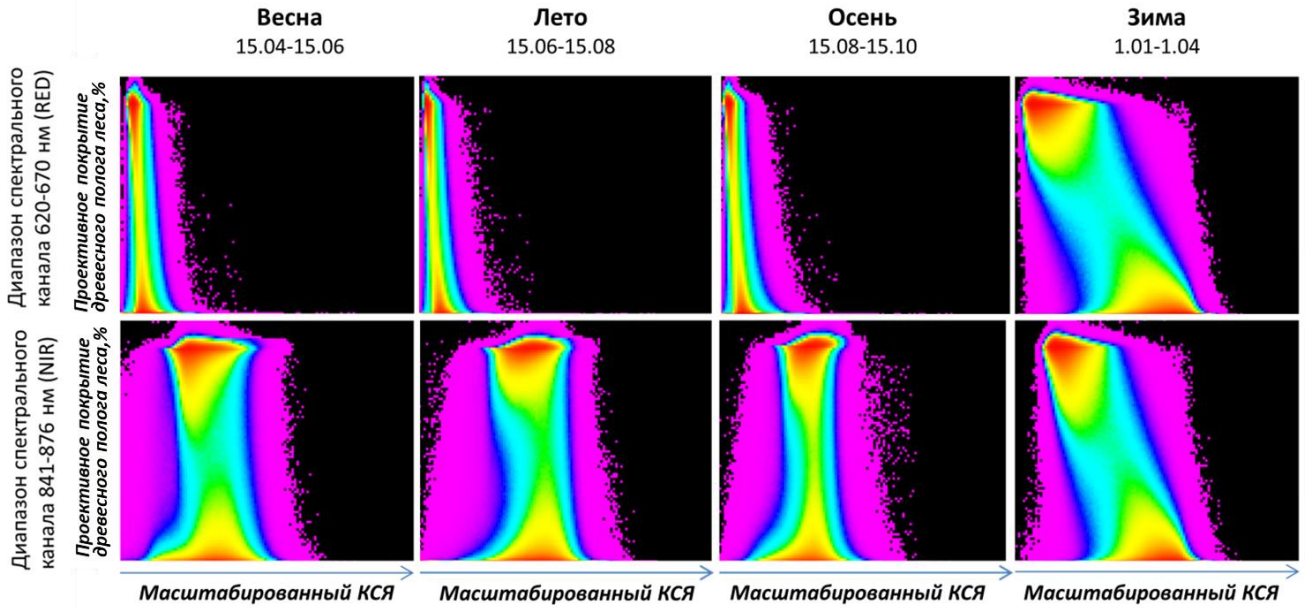


Рисунок 2.1.1 – Зависимость КСЯ спектральных каналов MODIS и значений проективного покрытия древесного полога леса

Блок-схема метода оценки проективного покрытия древесного полога леса представлена на рисунке 2.1.2 и состоит из трех основных этапов. На первом и втором этапе на основе спутниковых данных 2010 года строится локально параметризованная регрессионная модель между значениями коэффициентов спектральной яркости в красном канале и значениями проективного покрытия древесного полога леса. На третьем этапе полученная модель применяется ко всему радиометрически нормализованному временному ряду зимних композитных изображений MODIS.

Первый этап обработки данных направлен на подготовку опорной выборки с информацией о проективном покрытии древесного полога леса. Для построения опорной выборки используется глобальная карта проективного покрытия древесного полога леса Tree Cover 2010 на основе данных системы Landsat [69]. Эти данные отражают плотность покрытия кронами деревьев в пикселе по состоянию на 2010 год с пространственным разрешением 30 м. Продукт имеет следующие особенности:

- однократное покрытие, датируемое 2010 годом;

- временная неопределенность пикселя данных достигает 5 лет;
- практически полное отсутствие значений выше 90%;
- наличие шумов, вызванных сбоям в работе сенсора ETM+.

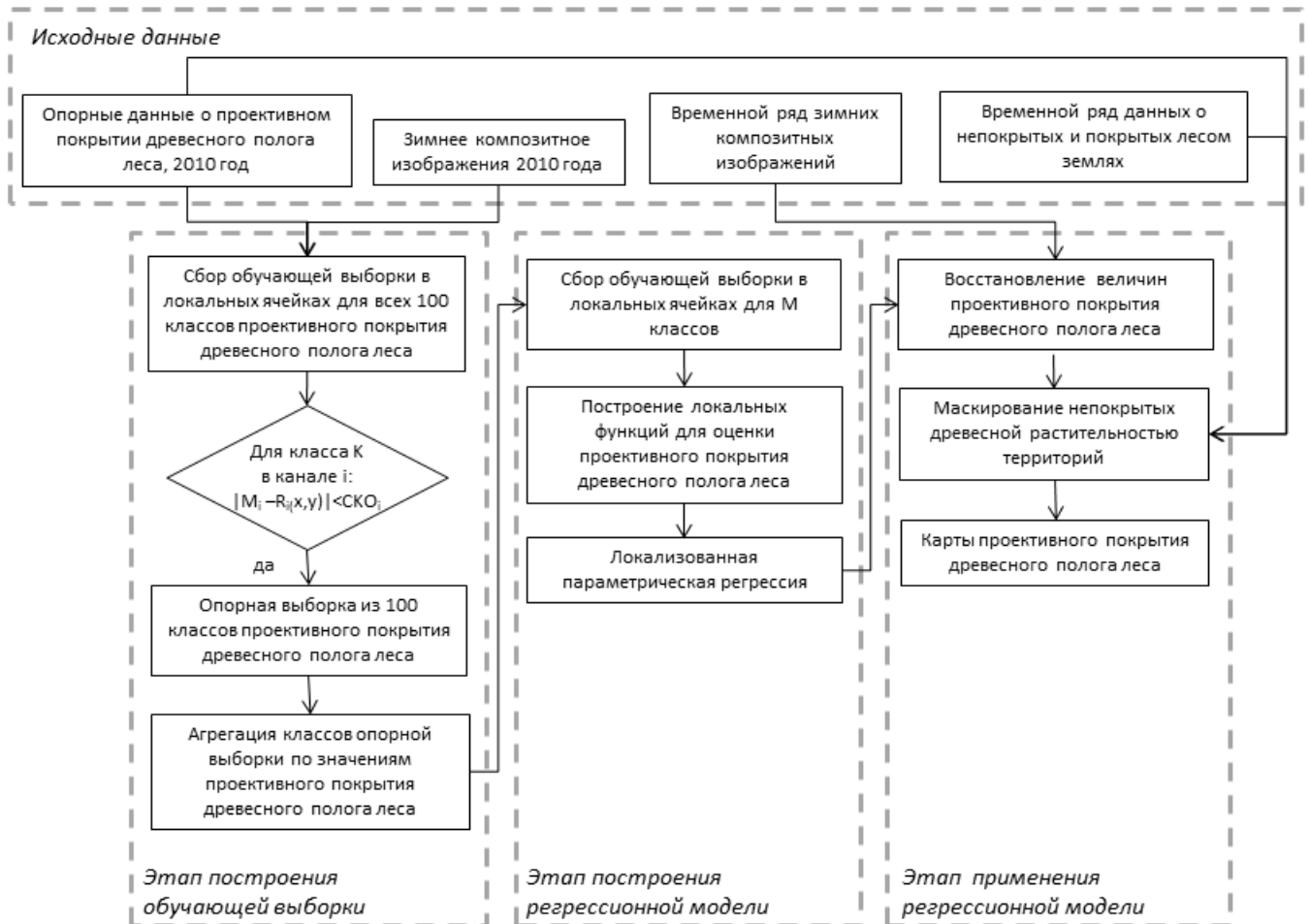


Рисунок 2.1.2 – Блок-схема оценки проективного покрытия древесного полога леса по данным ДЗЗ

Данные Tree Cover 2010 были приведены к пространственному разрешению данных MODIS. Поскольку исходный информационный продукт может включать различного рода погрешности, важным шагом обработки данных является процедура фильтрации. В качестве признаков при фильтрации используются измеренные в красном и ближнем ИК диапазонах спектра в условиях наличия снега на земной поверхности коэффициенты спектральной яркости (КСЯ). Территория разбивается на равноплощадные ячейки размером 23 на 23 км. Для каждого класса

обучающей выборки, соответствующего определенному значению проективного покрытия древесного полога леса, локально в расширяющемся окне относительно каждой ячейки собираются статистические показатели (вычисляется средняя величина КСЯ M и среднее квадратичное отклонение σ (СКО)). Значение КСЯ в пикселе R сопоставляются с его локальным средним значением M в ячейке. Если R не находится в пределах $(M-\sigma; M+\sigma)$, то точка на данном этапе исключается из дальнейшего рассмотрения. По окончании процедуры фильтрации и объединению ее результатов в обоих спектральных каналах формируется опорная выборка для 100 классов проективного покрытия древесного полога леса. Для уменьшения среднего радиуса окна сбора обучающей выборки на следующем этапе построения регрессионной модели пиксели обучающей выборки объединяются в 10 классов с шагом 10% проективного покрытия древесного полога леса согласно правилу: в класс i падают пиксели с проективным покрытием древесного полога леса (TC) таким, что $10(i-1) < TC \leq 10i$.

На втором этапе в равноплощадных ячейках регулярной сети для каждого класса проективного покрытия древесного полога леса локально в расширяющемся окне относительно каждой ячейки собирается обучающая выборка. На основе полученной обучающей выборки для каждой ячейки восстанавливаются уравнения линейной регрессии между значениями КСЯ и проективного покрытия древесного полога леса:

$$TC(x,y) = a_{ij}R(x,y) + b_{ij}, \quad (14)$$

где (x,y) – координаты пикселя внутри ячейки с координатами (i,j) , a_{ij} и b_{ij} – коэффициенты уравнения локальной регрессии для ячейки регулярной сети с координатами (i,j) , $R(x,y)$ – значение КСЯ в красном спектральном диапазоне для пикселя с координатами (x,y) . Проведенные вычислительные эксперименты показали, что оцененная регрессионная зависимость имеет коэффициент детерминации более 0.8 для 94%, более 0.7 для 98% территории.

Третий этап метода заключается в применении полученной локально параметризованной модели к временному ряду спутниковых данных ДЗЗ для

восстановления соответствующих значений проективного покрытия древесного полога леса. Важной частью этапа является устранение ошибок определения проективного покрытия древесного полога леса для территорий, непокрытых древесной растительностью. Для маскирования непокрытых лесом территории используется объединение маски леса из карты покрытых и непокрытых земель и маски леса, построенной на основе данных Tree Cover 2000 с порогом 10%. Результатом обнуления проективного покрытия древесного полога леса на непокрытых древесной растительностью участках являются итоговые карты проективного покрытия древесного полога леса. На заключительном шаге проводится фильтрация локальных экстремумов временного ряда для снижения уровня случайных шумов. В результате использования описанного выше метода и данных съёмки прибора MODIS сформирован временной ряд ежегодных измерений проективного покрытия древесного полога лесов России за период с 2001 по 2019 годы (рисунок 2.1.3). Алгоритм оценки проективного покрытия древесного полога леса на основе выше упомянутого набора данных реализован автором средствами программного пакета ERDAS Imagine и программного комплекса LAGMA.



Рисунок 2.1.3 – Пример карты проективного покрытия древесного полога леса по данным MODIS, 2017 год

2.2 Анализ и валидация результатов оценки проективного покрытия древесного полога леса

Сравнение карты проективного покрытия древесного полога леса за 2010 год с данными Tree Cover 2010

Построенная карта проективного покрытия древесного полога леса за 2010 год была сопоставлена с данными Tree Cover 2010. На рисунке 2.2.1 представлены гистограммы распределения значений проективного покрытия древесного полога леса, рассчитанные на основе маски сомкнутых лесов для двух вышеупомянутых источников данных. Графики демонстрируют, что наиболее сильные различия приходятся на низкие и высокие значения проективного покрытия древесного полога леса.

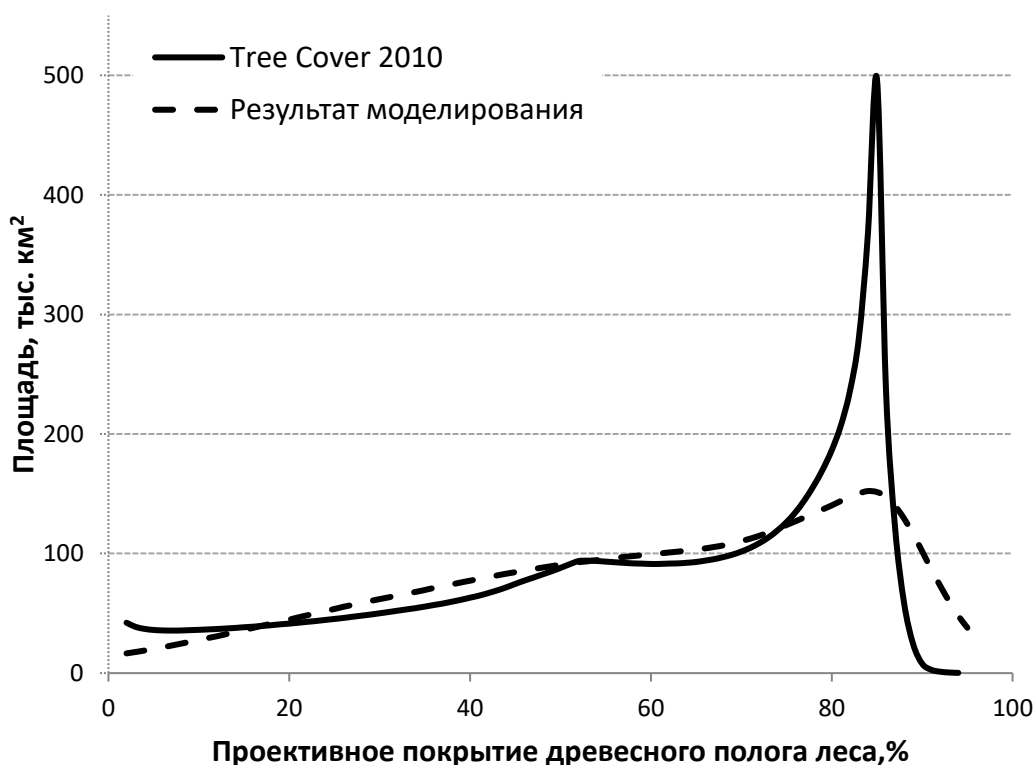


Рисунок 2.2.1 – Гистограммы распределения значений проективного покрытия древесного полога леса для данных Tree Cover 2010 и по результатам оценки показателя по спутниковым данным MODIS

Для пространственного сравнения двух продуктов использовалась выборка пикселей с неменяющимся типом леса в серии карт земного покрова за период с

2001 по 2018 годы. Для каждой величины проективного покрытия древесного полога леса по результатам оценки строилось распределение проективного покрытия древесного полога леса по данным Tree Cover 2010 с получением значений среднего и стандартного отклонения. Из графиков видно, что средние значения совпадают достаточно хорошо и наибольшие различия между данными приходится на значения проективного покрытия древесного полога леса от 0 до 20% и более 90% (рисунок 2.2.2).

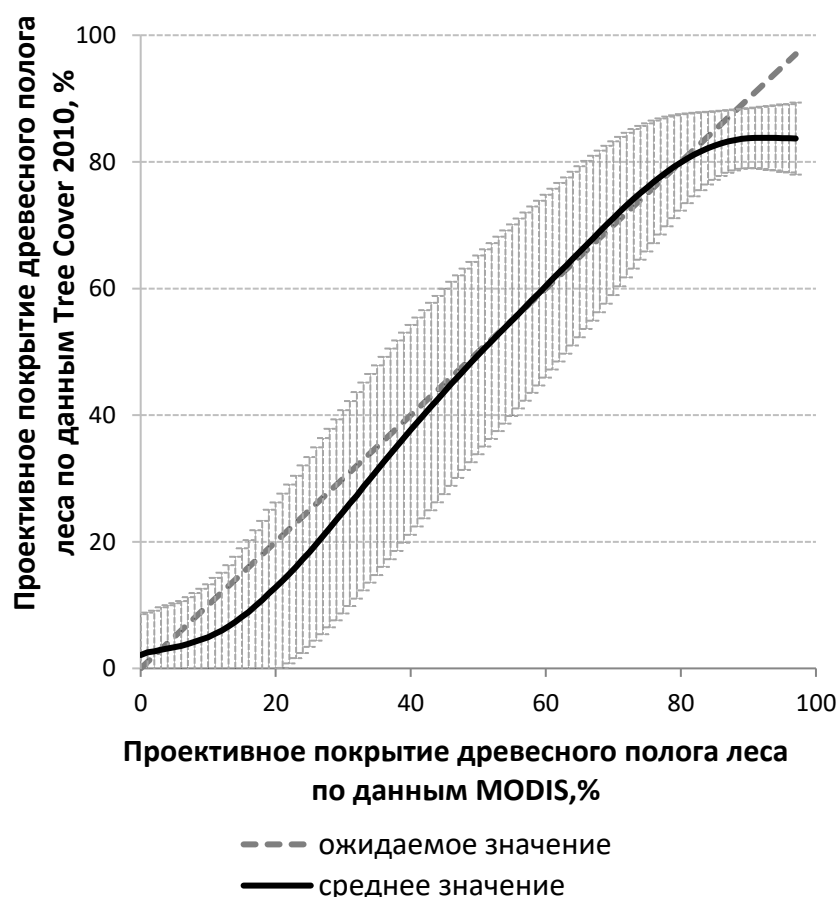


Рисунок 2.2.2 – Зависимость средних значений проективного покрытия древесного полога леса по данным Tree Cover 2010 от оцененных значений проективного покрытия древесного полога леса по данным MODIS

Среднее значение разности проективного покрытия древесного полога леса по всей выборке составило 0.21%, а стандартное отклонение – 13.96%. Валидация продукта Vegetation Continuous Fields (VCF), построенного на основе данных MODIS с использованием тех же методов, что и Tree Cover 2010, подтверждает, что наибольшие ошибки в определении проективного покрытия древесного полога

леса достигаются на высоких (выше 80%, недооценивание) и низких (менее 20%, переоценивание) значениях проективного покрытия древесного полога леса и составляют в среднем от 10 до 15% [72, 94, 105]. Поэтому систематические отклонения между полученными результатами и данными Tree Cover 2010 на концах диапазона проективного покрытия древесного полога леса не могут трактоваться как ошибки без дополнительной проверки.

*Оценка устойчивости полученного временного ряда проективного покрытия
древесного полога леса*

Полученный временной ряд данных о пространственном распределении проективного покрытия древесного полога леса был исследован на устойчивость. В качестве меры устойчивости выбрано стандартное отклонение в точке, рассчитанное по временному ряду. Чтобы исключить влияние изменений, которые происходили в лесах России в течение рассматриваемого периода, устойчивость исследовалась в границах маски, пиксели которой не меняли тип покрова по данным серии карт растительности России за период с 2001 по 2019 год [3]. В результате исследования было получено, что 91% выборки лесных классов имеет стандартное отклонение по времени менее 1%, а средняя устойчивость по всей выборке составляет 0.49%. График на рисунке 2.2.3А иллюстрирует распределение пикселей с ненулевым стандартным отклонением по времени. Максимум, который соответствует наиболее часто встречающимся значениям показателя устойчивости, равен 4%. На рисунке 2.2.3Б представлена усредненная зависимость стандартного отклонения по времени от значения проективного покрытия древесного полога леса в точке. Наименьшая устойчивость достигается при проективном покрытии древесного полога леса от 40 до 60%, которая соответствуют смешанным пикселям.

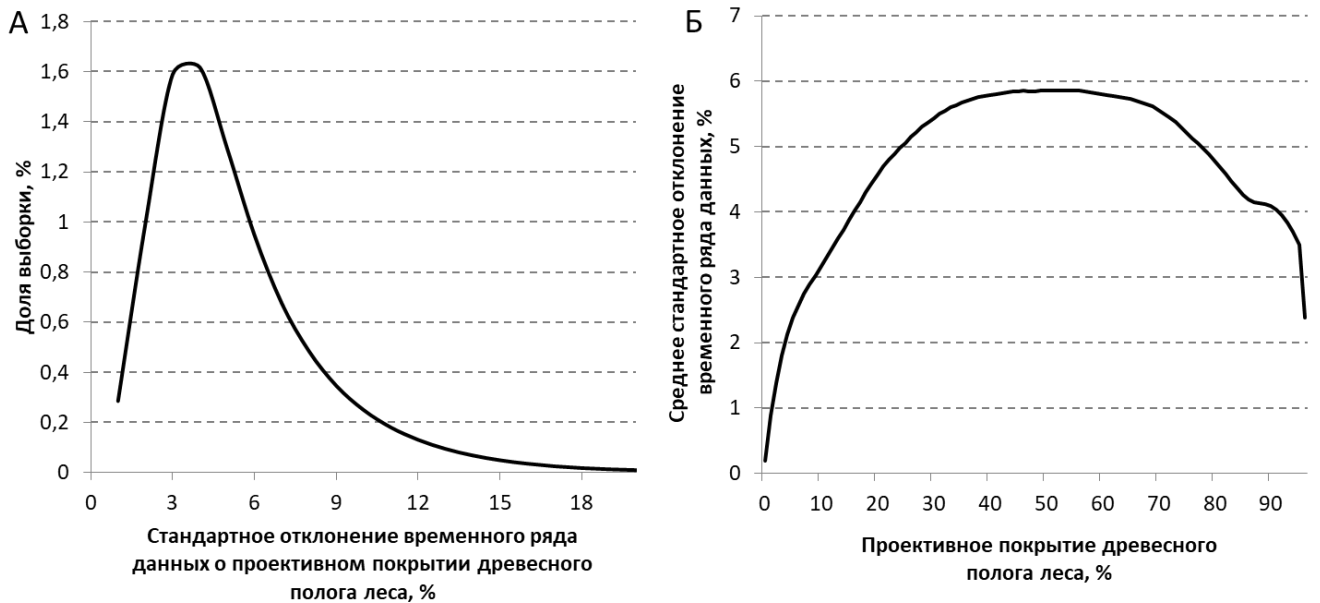


Рисунок 2.2.3 – А. Плотность распределения ненулевых значений показателя устойчивости временного ряда оценок проективного покрытия древесного полога леса Б. Зависимость среднего значения показателя устойчивости временного ряда оценок проективного покрытия древесного полога леса от значений проективного покрытия древесного полога леса

Валидация карт проективного покрытия древесного полога леса на примере карты 2017 года

Полученные данные о проективном покрытии древесного полога леса должны быть проверены с помощью других источников данных о лесах. Ввиду отсутствия прямых измерений проективного покрытия древесного полога леса при сборе информации на пробных площадях, для проверки точности построенной серии карт проективного покрытия древесного полога леса использованы обработанные данные Sentinel-2 MSI и Landsat 8 OLI с пространственным разрешением 10-30м. Для валидации создан набор данных для 281 тестовых участков, равномерно распределенных по территории страны (рисунок 2.2.4). Классификация проводилась по тематическим классам легенды карты растительности России, созданной в ИКИ РАН [5]. С использованием построенного набора данных для каждого пикселя данных MODIS, расположенного в пределах границ рассматриваемого набора тестовых участков, была получена оценка лесистости: к

лесным территориям относились семь классов сомкнутых лесов карты растительности и класс хвойных кустарников.

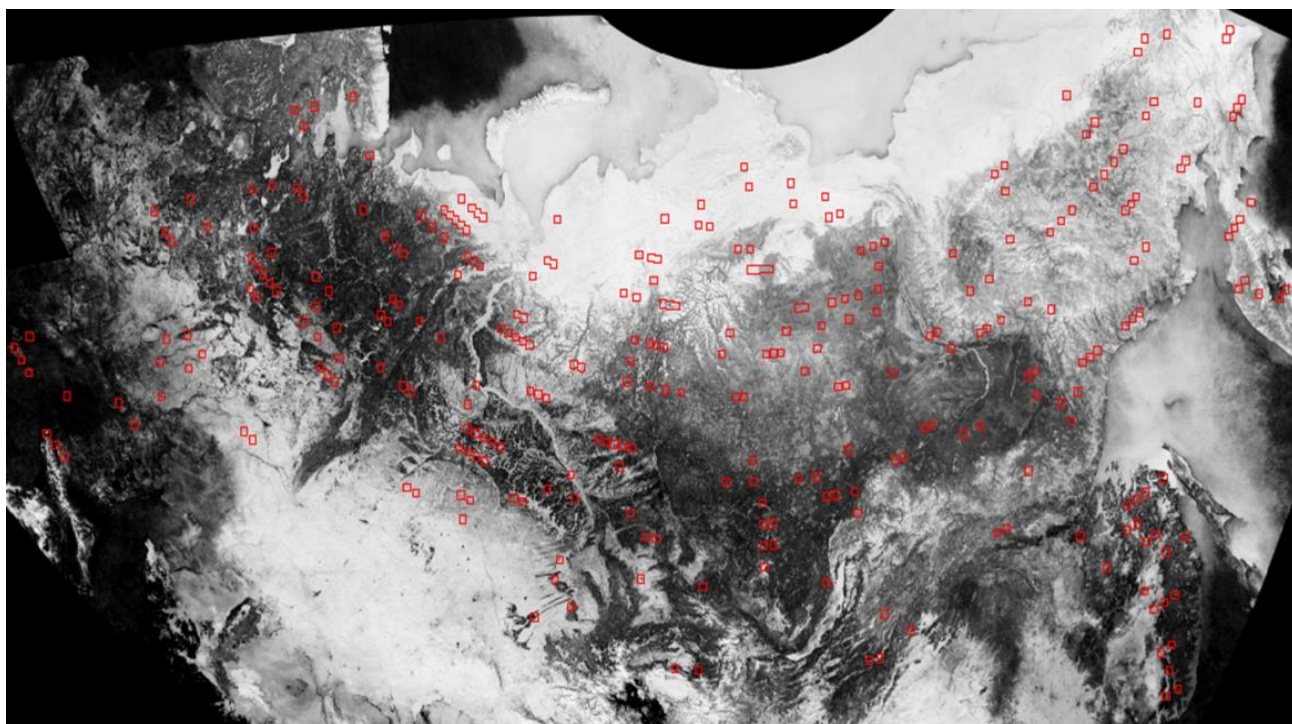


Рисунок 2.2.4 – Расположение сети тестовых участков на территории страны

Лесистость, как и проективное покрытие древесного полога леса, характеризует наличие и распределение деревьев на исследуемой территории. Для каждого тестового участка были построены корреляции между лесистостью и проективным покрытием древесного полога леса. На 72% тестовых участков коэффициент корреляции оказался более 0.5 и на 58% – более 0.7. На рисунке 2.7 представлена зависимость наиболее часто встречающихся значений проективного покрытия древесного полога леса от значений лесистости. Из графика видно, что зависимость между двумя характеристиками имеет нелинейный характер и достаточно большую вариацию (стандартное отклонение – от 10 до 25%), что вызвано, прежде всего, наличием лесов с разными преобладающими породами, которые имеют достаточно сильно различающиеся значения проективного покрытия древесного полога леса в зимний период.

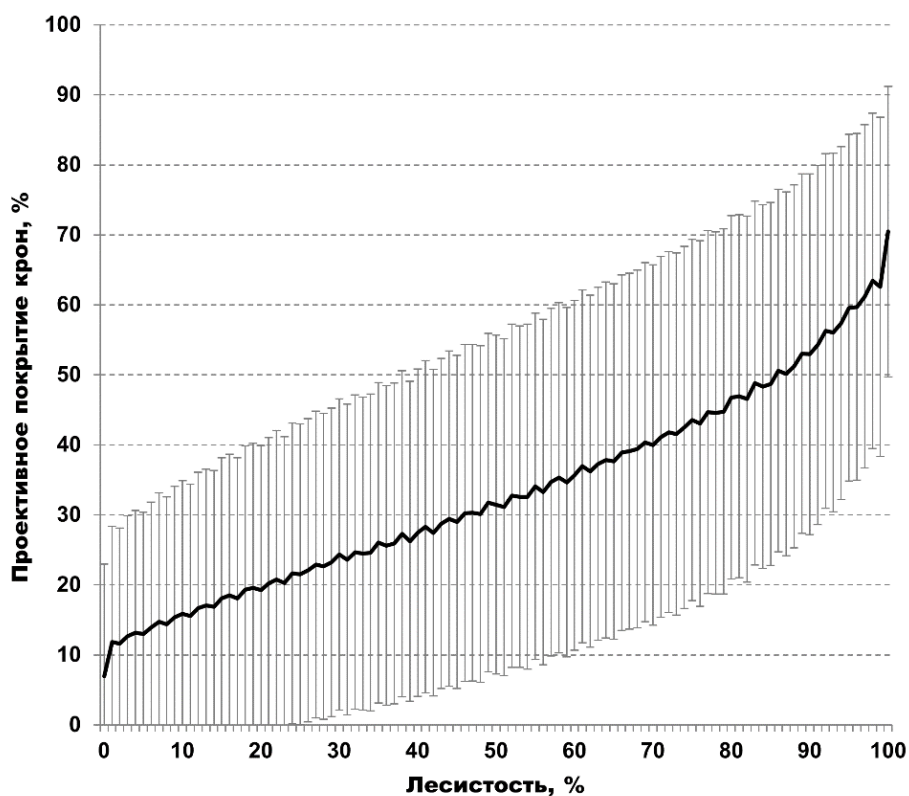


Рисунок 2.2.5 – Зависимость средних значений проективного покрытия древесного полога леса от значений лесистости

На основе двумерной гистограммы рассматриваемых характеристик были найдены оптимальные пороги для отнесения пикселя к классу лес или безлесным территориям путем максимизации функционала точности совпадения двух масок леса, построенных на основе данных проективного покрытия древесного полога леса и лесистости. Максимальная доля совпадения составила 85% при отнесении к лесным территориям пиксели с проективным покрытием древесного полога леса более 30% и лесистостью более 50%, что говорит об ожидаемом наличии тесной корреляционной связи между проективным покрытием древесного полога леса и лесистостью. Анализ данных показал, что наибольшие различия между двумя показателями горизонтальной структуры лесов приходится на класс хвойных кустарников, который зимой покрыт снегом, но учитывается при подсчете доли леса. Кроме того, классы пойменной растительности и редкой лиственницы часто имеют не нулевое проективное покрытие древесного полога леса, но при этом не относятся к лесным классам. Помимо особенностей классификации по типам покрова и вычисления лесистости на ее основе, в некоторых регионах рельеф

местности и связанные с ним тени являются причиной различий между масками лесов, построенными на основе двух исследуемых характеристик.

2.3 Метод дистанционной оценки лесистости территории и сомкнутости крон леса

Метод оценки значений показателя лесистости выполняется на основе модели двухкомпонентной смеси с компонентами, соответствующими покрытым и непокрытым лесом территориям. Модель смешения в данном контексте может быть описана следующим уравнением:

$$TC_p = avTC_f L + avTC_b (1 - L) \quad (15)$$

где TC_p – проективное покрытие древесного полога леса, $avTC_f$ – среднее значение проективного покрытия древесного полога для полностью покрытых лесом земель, $avTC_b$ – среднее значения проективное покрытие древесного полога на территориях свободных от леса, L – лесистость. При точных измерениях проективного покрытия крон величина TC_b стремиться к 0. Однако возрастание погрешности в исходных данных Tree Cover 2010 при низких значениях проективного покрытия древесного полога [72, 94, 105] может быть частично компенсировано включением данной переменной в уравнение связи. На первом шаге метода оценки лесистости происходит оценивание усредненного в рамках задаваемой окрестности проективного покрытия древесного полога леса для полностью покрытых и непокрытых лесом участков. Так как значения проективного покрытия древесного полога леса существенно зависят от древесных пород, оценивание происходит независимо для всех типов лесов, представленных в карте преобладающих пород России [14]. На втором шаге с помощью модели смешения (15) для каждого пикселя данных оценивается лесистость.

В качестве входных данным на первом шаге метода выбраны следующие продукты, построенные на основе данных дистанционного зондирования Земли:

- временной ряд карт проективного покрытия древесного полога леса деревьев с 2001 по 2019 год,
- данные Tree Cover 2010 [69],
- временной ряд ежегодных карт преобладающих пород с 2001 по 2019 год [14],
- очищенная опорная выборка проективного покрытия древесного полога леса, полученная ранее на этапе восстановления проективного покрытия древесного полога леса по спутниковым данным MODIS.

Блок-схема метода оценки усредненного в рамках задаваемой окрестности проективного покрытия древесного полога леса для полностью покрытых лесом и для свободных от леса участков представлена на рисунке 2.3.1.

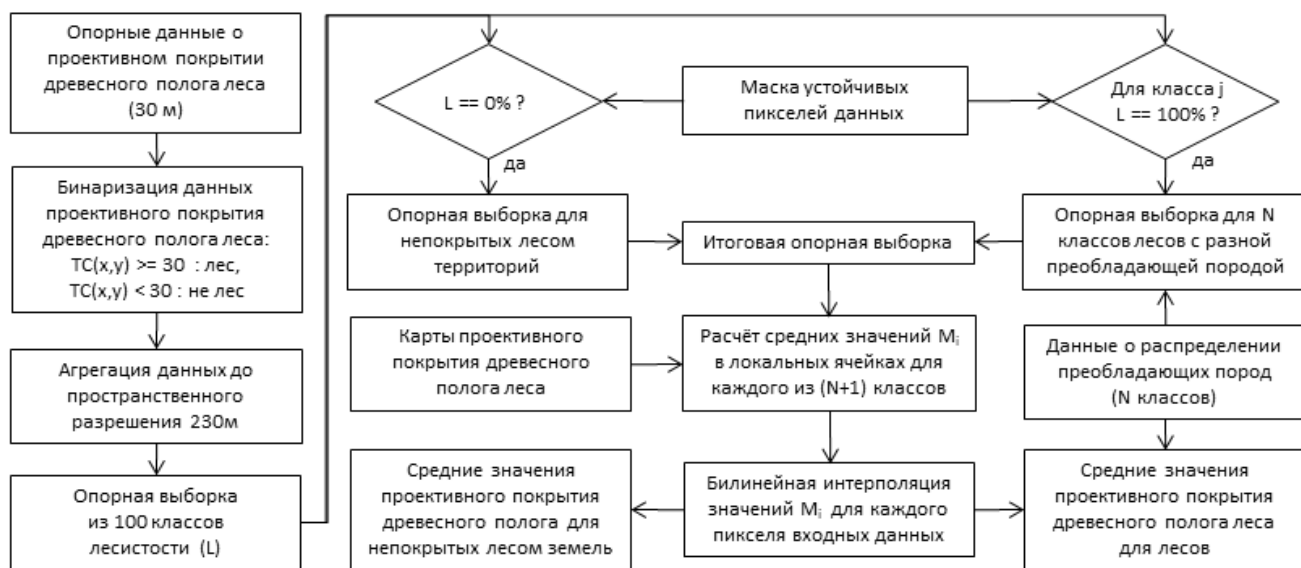


Рисунок 2.3.1 – Блок-схема оценки среднего проективного покрытия древесного полога для полностью покрытых лесом и безлесных территорий

Первый этап начального шага обработки направлен на подготовку опорной выборки с информацией о проективном покрытии древесного полога леса полностью покрытых лесом пикселей изображения. Для построения опорной выборки используется глобальная карта проективного покрытия древесного полога леса Tree Cover 2010. На первом шаге на основе данных Tree Cover 2010 с помощью порогового правила происходит построение маски леса:

$$\begin{cases} \text{ТС} \geq 20\% \rightarrow \text{лес;} \\ \text{ТС} < 20\% \rightarrow \text{непокрытые лесом площади.} \end{cases}$$

Затем с помощью полученной маски на уровне пространственного разрешения данных MODIS оценивается лесистость. В итоговую обучающую выборку для породы j включаются полностью покрытые лесом пиксели (лесистость = 100%), попадающие в маску устойчивых пикселей, то есть неменяющих преобладающую породу за рассматриваемый временной период с 2001 по 2019 год. Также в опорную выборку добавляется класс непокрытых древесной растительностью пикселей с лесистостью 0%.

На втором этапе территория разбивается на равноплощадные ячейки размером 2,3 на 2,3 км. Для каждого класса n обучающей выборки локально в расширяющемся окне относительно каждой ячейки с координатами (i,j) вычисляется средняя величина M_{ij}^n проективного покрытия древесного полога леса. На основе билинейной интерполяции для каждого пикселя спутниковых данных вычисляется проективное покрытие древесного полога леса $M^n(x,y)$ в точке с координатами (x,y) согласно формуле:

$$\begin{aligned} M^n(x,y) = & \frac{M_{ii}^n}{(x_j - x_i)(y_j - y_i)}(x_j - x)(y_j - y) \\ & + \frac{M_{ji}^n}{(x_j - x_i)(y_j - y_i)}(x - x_i)(y_j - y) \\ & + \frac{M_{ij}^n}{(x_j - x_i)(y_j - y_i)}(x_j - x)(y - y_i) \\ & + \frac{M_{jj}^n}{(x_j - x_i)(y_j - y_i)}(x - x_i)(y - y_i) \end{aligned} \quad (16)$$

где пиксель с координатами (i,j) лежит в квадрате, образованном центрами ячеек с координатами (x_i, y_i) , (x_i, y_j) , (x_j, y_i) и (x_j, y_j) . С помощью объединения построенных слоев $M^n(x,y)$ согласно данным о преобладающей породе строится карта средних значений проективного покрытия древесного полога леса для земель полностью покрытых лесом. Аналогично карте средних значений проективного покрытия

древесного полога леса для земель, полностью покрытых лесом, происходит оценка средних значений проективного покрытия древесного полога для непокрытых лесом земель (TC_b).

Оценка показателя лесистости осуществляется методом, логическая схема которого представлена на рисунке 2.2.2. Входными данными для построения оценок лесистости территории служит следующий набор данных за период с 2001 года по 2019 годы:

- данные о проективном покрытии древесного полога леса (TC_p),
- данные о средних значениях проективного покрытия древесного полога для полностью покрытых лесом земель (TC_f),
- данные о покрытых и непокрытых лесом землях,
- данные о средних значениях проективного покрытия древесного полога для непокрытых лесом земель (TC_b).

Для пикселей, удовлетворяющих правилу $TC_f \geq TC_p$, значение лесистости L восстанавливается из соотношения (15). Для остальных пикселей, преобладающее число которых имеет низкие значения лесистости и для которых применение модели невозможно из-за невыполнения условия $TC_f \geq TC_p$, лесистость оценивается на основе локально восстановленных зависимостей между последней и проективным покрытием древесного полога леса. Построение локальных табличных функций происходит на основе обучающей выборки. В обучающую выборку включаются пиксели с восстановленным из уравнения связи (15) значением лесистости, попадающие в маску устойчивых пикселей, не меняющих класс растительности по данным о покрытых и непокрытых лесом землях. Территория разбивается на равноплощадные ячейки размером 23 на 23 км. Для каждого класса обучающей выборки, соответствующего определенному значению проективного покрытия древесного полога леса, локально в расширяющемся окне относительно каждой ячейки вычисляется средняя величина лесистости L_i . Множество значения L_i задает локальные табличные функции $L(TC_p)$, с помощью

которых на последнем шаге восстанавливаются пропущенные значения лесистости.



Рисунок 2.2.2 – Блок-схема оценки среднего проективного покрытия древесного полога леса и безлесных территорий

На последнем шаге метода восстанавливаются временные ряды сомкнутости крон леса на основе известных временных рядов проективного покрытия древесного полога леса и лесистости и уравнения связи между показателями горизонтальной структуры лесного покрова:

$$TC_p = S \cdot L, \quad (17)$$

где TC_p – проективного покрытия древесного полога леса, S – сомкнутость крон леса, L – лесистость. На заключительном этапе проводится фильтрация локальных экстремумов временных рядов оценок горизонтальной структуры лесов, необходимая улучшения согласованности построенного набора данных. В результате применения указанного метода был сформирован временной ряд оценок покрытой лесом площади и сомкнутости крон лесов с 2001 по 2019 годы.

Предложенный метод оценки покрытой лесом площади и сомкнутости крон леса на основе выше упомянутых наборов данных реализован автором средствами программного пакета ERDAS Imagine и программного комплекса LAGMA.

2.4 Анализ и валидация результатов оценки лесистости территории и сомкнутости крон леса

Валидация карт лесистости на примере карты 2019 года с помощью карты растительности России за тот же период

Для проверки точности построенных данных было проведено сравнение карты лесистости за 2019 год с картой растительности России за тот же период. Карта растительности России отображает доминирующий тип земного покрова в пикселе данных с разрешением 230 м. Легенда карты растительности России включает 23 класса шести групп земного покрова, таких как леса, травяно-кустарниковая растительность, тундра, водно-болотные комплексы, другие типы растительного покрова (свежие гари и пахотные земли) и земли, непокрытые растительностью (Барталев, 2016). На рисунке 2.4.1 представлено распределение значений лесистости, сгруппированных по 10%, для основных классов лесов и групп покрова карты растительности.

Для лугов и степей средняя лесистость составляет 11.14%, для сельскохозяйственных земель – 1,61 %, для непокрытых растительностью земель, включающих классы вечных снегов и льдов, открытых грунтов и урбанизированных территорий – 3.1% и для болот – 16.67%, что хорошо согласуется с преимущественным отсутствием лесов на данных территориях. Для лесных классов карты растительности средняя лесистость составила: 93.27% для темнохвойных лесов, 81.03% для светлохвойных лесов, 68.55% для лиственных лесов (включая кроме сомкнутые лиственные и лиственные редины), 79.52% для лиственных и 97.64% для смешанные лесов.

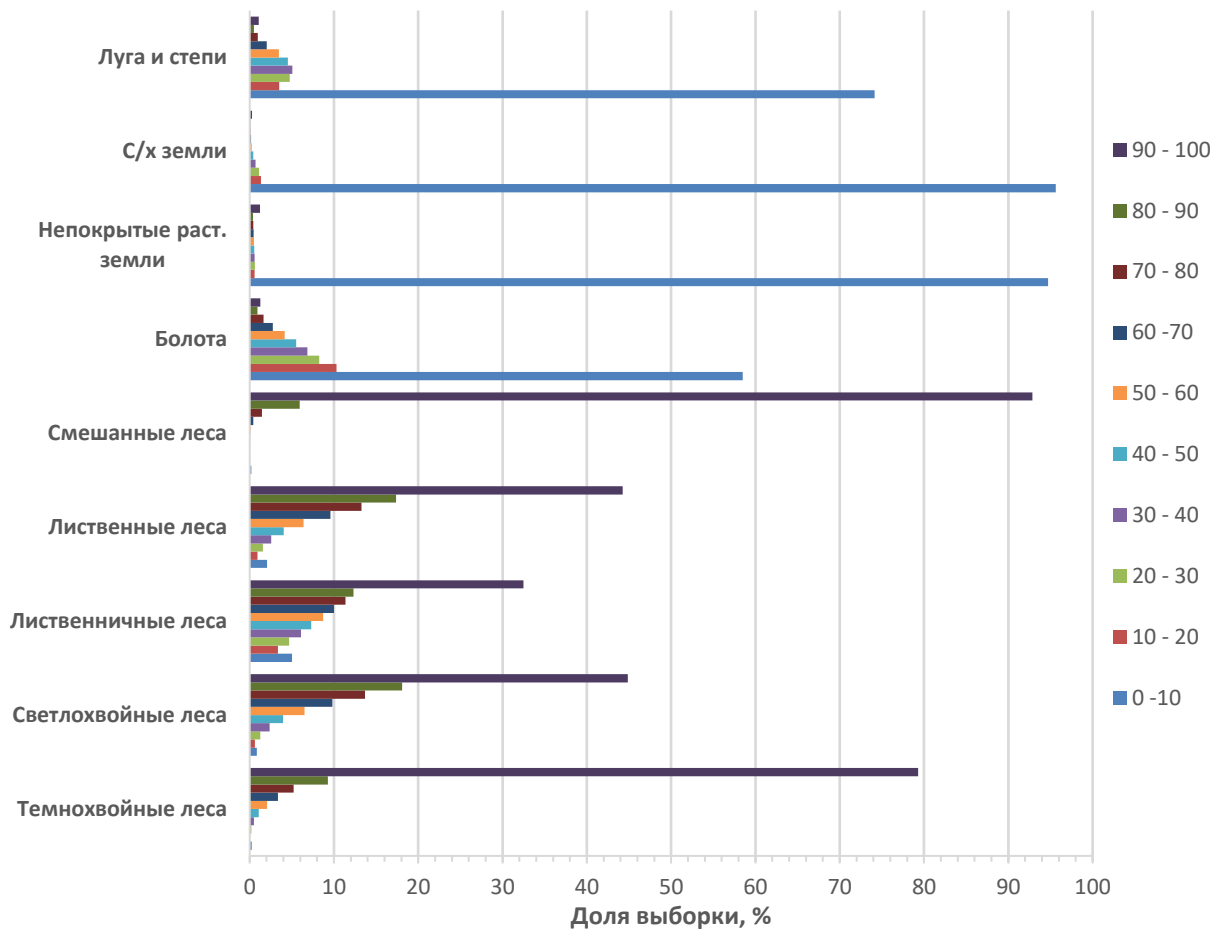


Рисунок 2.4.1 – Распределение лесистости по классам карты растительности 2019 года

Ввиду возможной разной трактовки понятия лес в терминах тематических классов земного покрова для сравнения полученной карты лесистости территории с картой растительности России, на основе последней были построены четыре маски покрытых лесом территории:

- маска v1, включающая только сомкнутые леса,
- маска v2, включающая сомкнутые леса и хвойные вечнозелёные кустарники,
- маска v3, включающая сомкнутые леса, хвойные вечнозелёные и лиственные кустарники,
- маска v4, включающая сомкнутые леса, хвойные вечнозелёные, лиственные кустарники и лиственничные редины.

Для каждого значения лесистости пикселя на основе построенных масок была вычислена вероятность отнесения пикселя к полностью покрытым лесом территориями, график которой представлен на рисунке 2.4.2. Построенная зависимость имеет нелинейный характер, и ее форма существенно отличается при учете лиственных редин в качестве лесного класса.

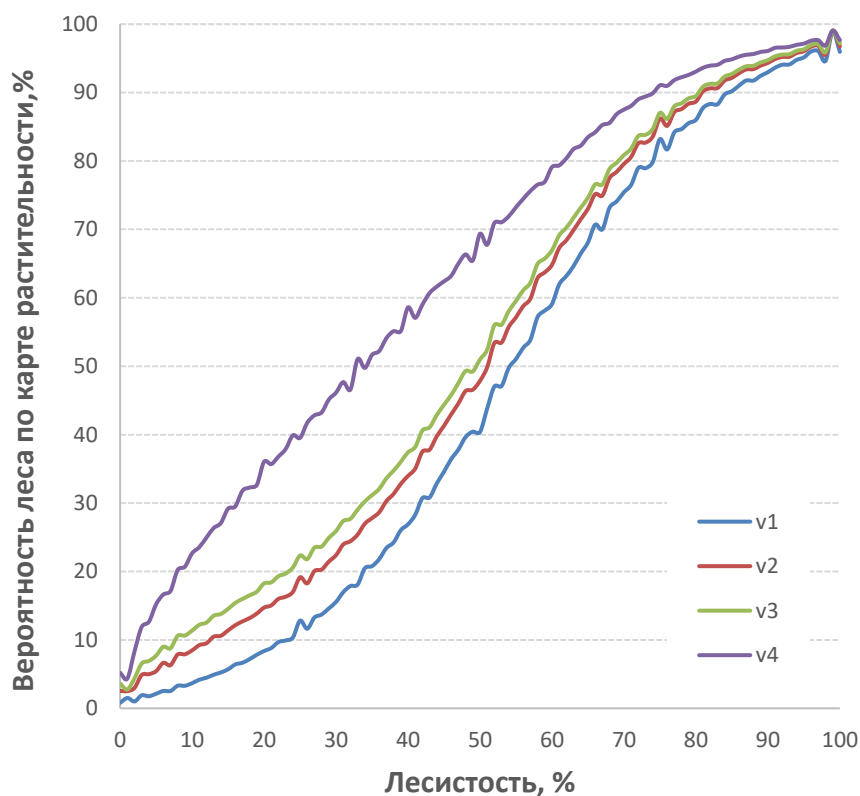


Рисунок 2.4.2 – График зависимости вероятности принадлежности пикселя с заданной лесистостью к покрытым лесом землям для разных вариантов отнесения классов карты растительности к покрытым лесом землям

Построенная карта лесистости уровне имеет следующую точность совпадения с масками покрытых лесом земель, построенных на основе карты растительности России: 85% для v1, 84.3% для v2, 83.87% для v3 и 82.52% для v4.

Для сравнения на уровне пространственного разрешения данных MODIS карта лесистости была преобразована в набор бинарных масок покрытых лесом территорий. К карте лесистости применялось пороговое правило: пиксель с лесистостью выше заданного значения относился к полностью покрытым лесом пикселям. Рисунок 2.4.3 демонстрирует зависимость доли площади совпадения

масок покрытых лесом территорий, построенных на основе данных лесистости, от пороговых значений лесистости пикселя. Из представленных на рисунке 2.4.3 графиков видно, что при наиболее часто используемых порогах лесистости от 30 до 50% точность совпадения для всех рассматриваемых масок леса выше 87%.

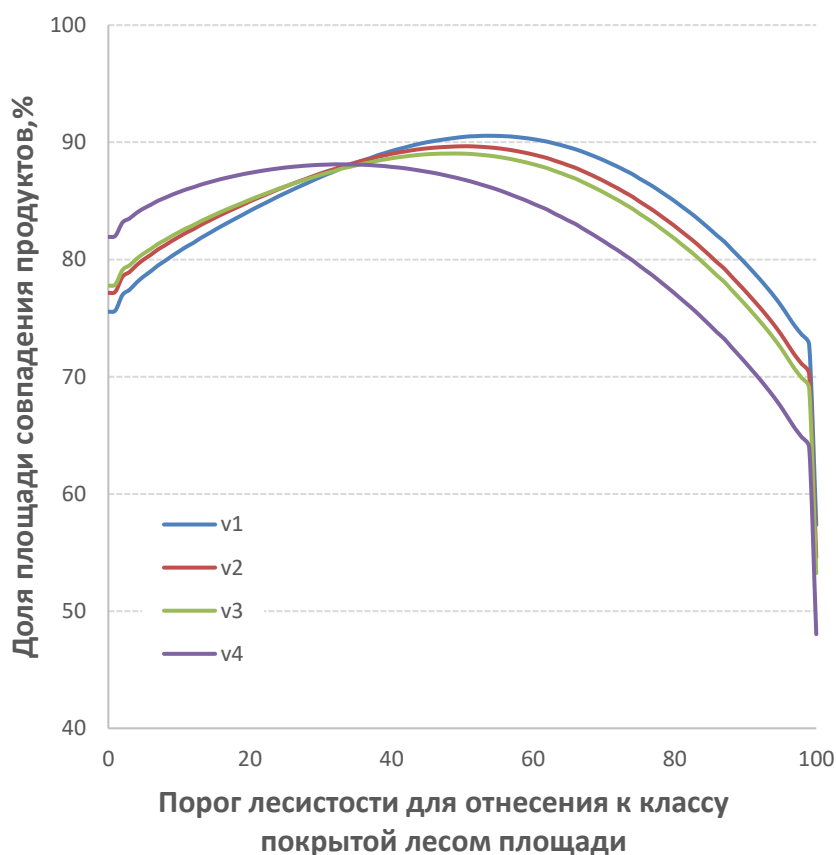


Рисунок 2.4.3 – График зависимости точности совпадения масок леса, построенных на основе карт растительности России и лесистости, от порогового значения лесистости для разных вариантов отнесения классов карты растительности к покрытым лесом землям

Валидация карт лесистости на примере карты 2017 года по данным сети тестовых участков

Для оценки точности построенной карты лесистости был использован упомянутый ранее набор тестовых участков, равномерно распределенных по территории страны (рисунок 2.2.4). Для каждого тестового участка была проведена классификация по типам растительного покрова в легенде карты растительности России [5] на основе спутниковых данных Sentinel-2 MSI и Landsat 8 OLI с

пространственным разрешением 10–30м, полученных за 2016 и 2017 годы. По результатам классификации по аналогии со сравнением карты лесистости с картой растительности России были построены четыре маски покрытых лесом территорий с пространственным разрешением 20 м:

- маска v1, включающая только сомкнутые леса,
- маска v2, включающая сомкнутые леса и хвойные вечнозелёные кустарники,
- маска v3, включающая сомкнутые леса, хвойные вечнозелёные и лиственные кустарники,
- маска v4, включающая сомкнутые леса, хвойные вечнозелёные, лиственные кустарники и лиственные редины.

С помощью масок на территории тестовых участков для каждого пикселя данных MODIS была оценена его лесистость. Полученный набор данных был сопоставлен с картой лесистости России за 2016 год.

Рассматриваемая карта лесистости не имеет точность совпадения с данными высокого пространственного разрешения – 86.21% для v1, 86.49% для v2, 85.82% для v3 и 83.27% для v4. На рисунке 2.4.4 представлена зависимость точности совпадения карты лесистости по данным MODIS и данных лесистости, оцененных по спутниковым изображениям данных высокого пространственного разрешения от значения лесистости в пикселе данных. И графиков видно, что наибольшие ошибки приходятся за промежуточные значения лесистости от 40 до 70%, что соответствует смешанным пикселям, в основном расположенным на границе леса и безлесных территорий.

Проведенный анализ данных показал, что имеет место неоднородность вносимых ошибок от типа земного покрова. На графике 2.4.5 представлено распределение ошибок оценки лесистости территории для разных классов земного покрова.

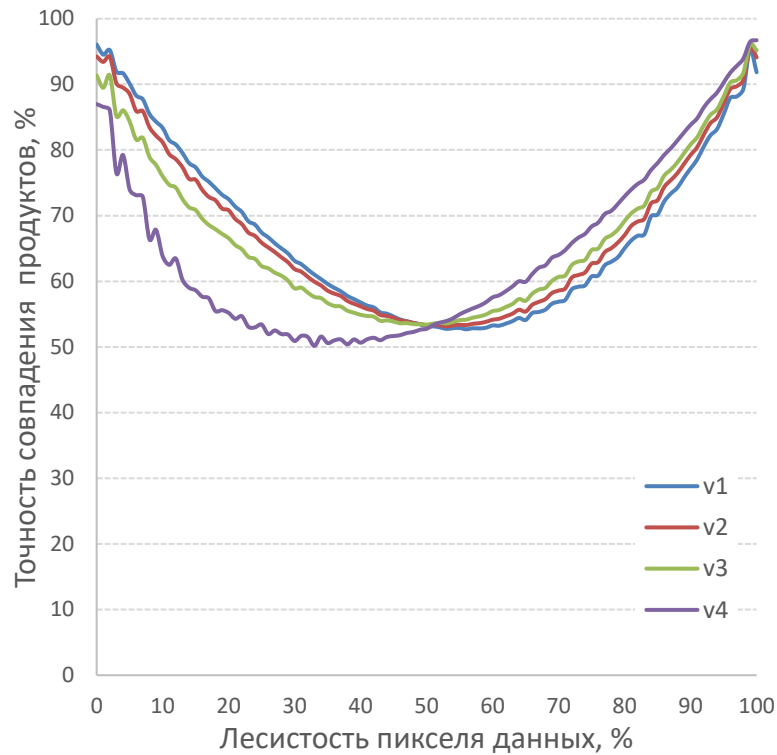


Рисунок 2.4.4 – График зависимости точности совпадения карты лесистости России за 2016 год и лесистости, полученной по спутниковым данным высокого пространственного разрешения, от значения лесистости

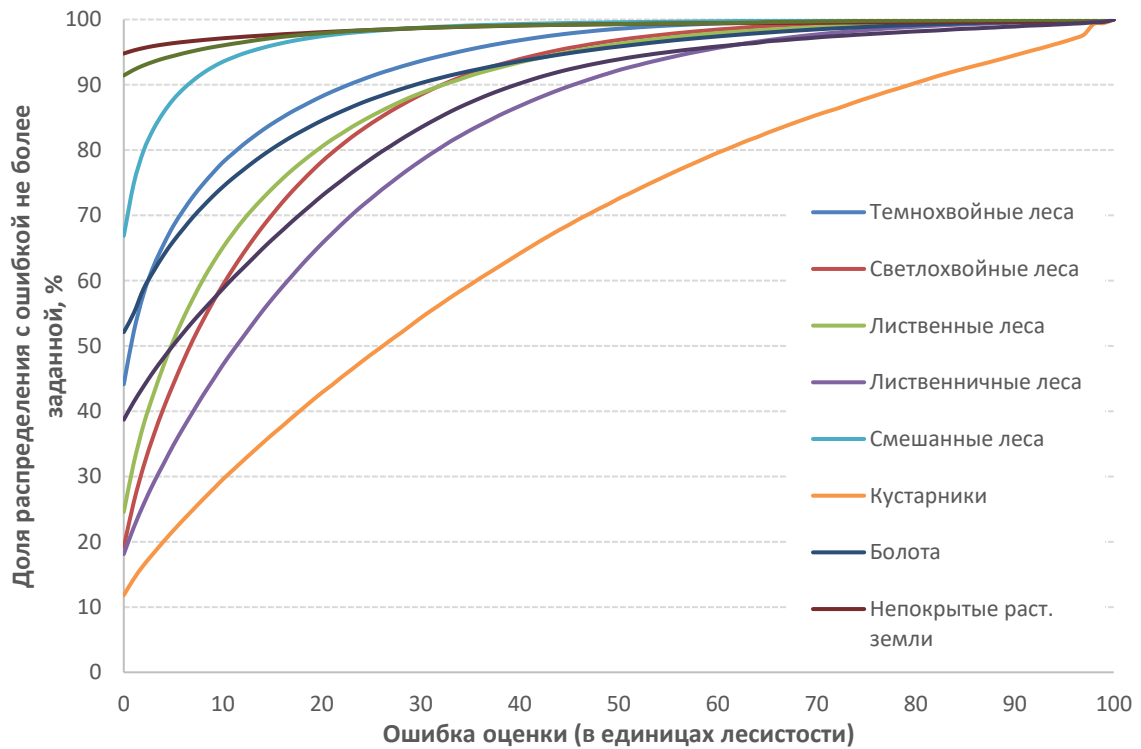


Рисунок 2.4.5 – Распределение ошибок оценки лесистости для разных типов земного покрова

Наибольшие различия между двумя сравниваемыми наборами данных вызваны учетом кустарников при подсчете покрытой лесом площади, которые находятся под снегом в зимний период и имеют низкие значения проективного покрытия древесного полога леса по спутниковым данным. Кроме того, лиственничные редины вносят существенные доли ошибок, так как имеют ненулевое проективное покрытие древесного полога леса, но обычно не включаются в территории, покрытые лесом. Также существенную долю ошибок вносят болота, которые часто представляют собой чередование открытых участков и участков, покрытых древесной растительностью. Кроме особенностей классификации и вычисления лесистости, в некоторых регионах рельеф местности и тени от него, которые наиболее сильно проявляются на спутниковых данных зимнего периода являются причиной различий между картой лесистости территории и данными высокого пространственного разрешения.

Пространственный анализ карт лесистости и сомкнутости крон лесов и сравнение с данными официальной статистики

Сформированная по результатам обработки спутниковых изображений база данных показателей горизонтальной структуры лесов России в настоящее время охватывает период 2001–2019 годов. Планируется, что она будет ежегодно пополняться по мере поступления и обработки спутниковых данных. Пространственное разрешение данных о проективном покрытии древесного полога леса, лесистости и сомкнутости крон соответствует 230 м, при этом последний из показателей характеризуют территорию на подпиксельном уровне детальности.

Представленная на рисунке 2.4.6 карта получена с использованием данных о лесистости за 2019 год и отражает пространственное распределение покрытой лесом площади на уровне лесничеств для территории России.

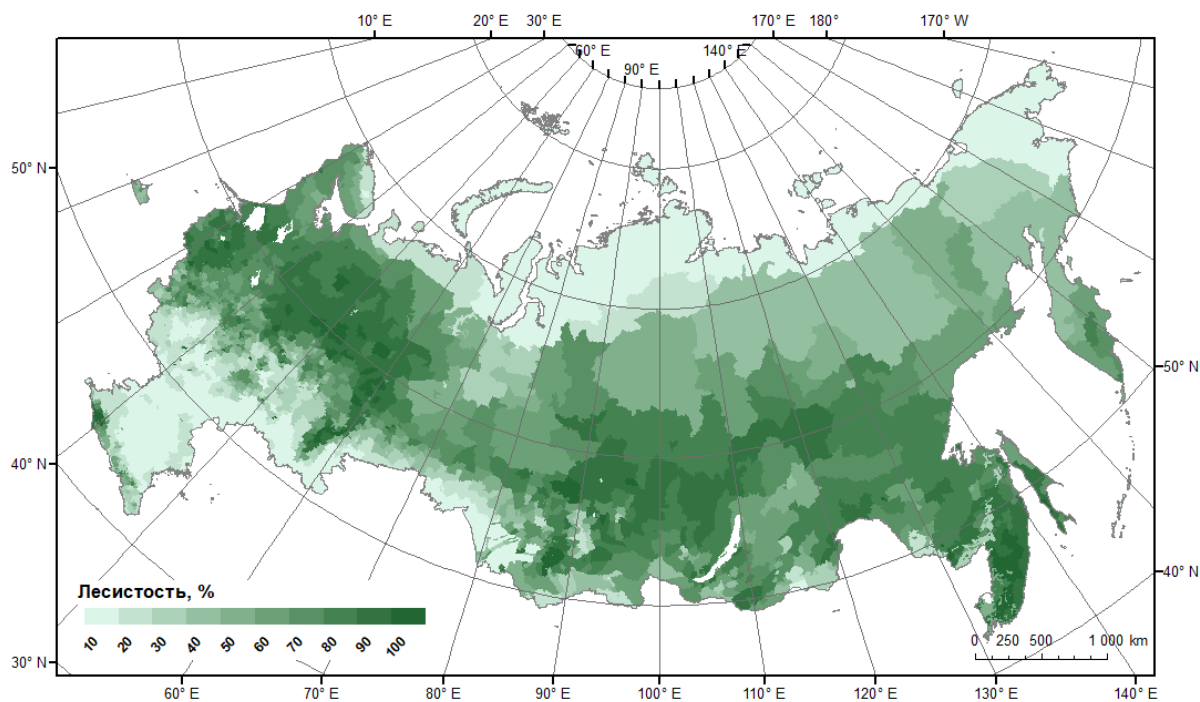


Рисунок 2.4.6 – Карта покрытой лесом площади России в разрезе лесничеств за 2019 год

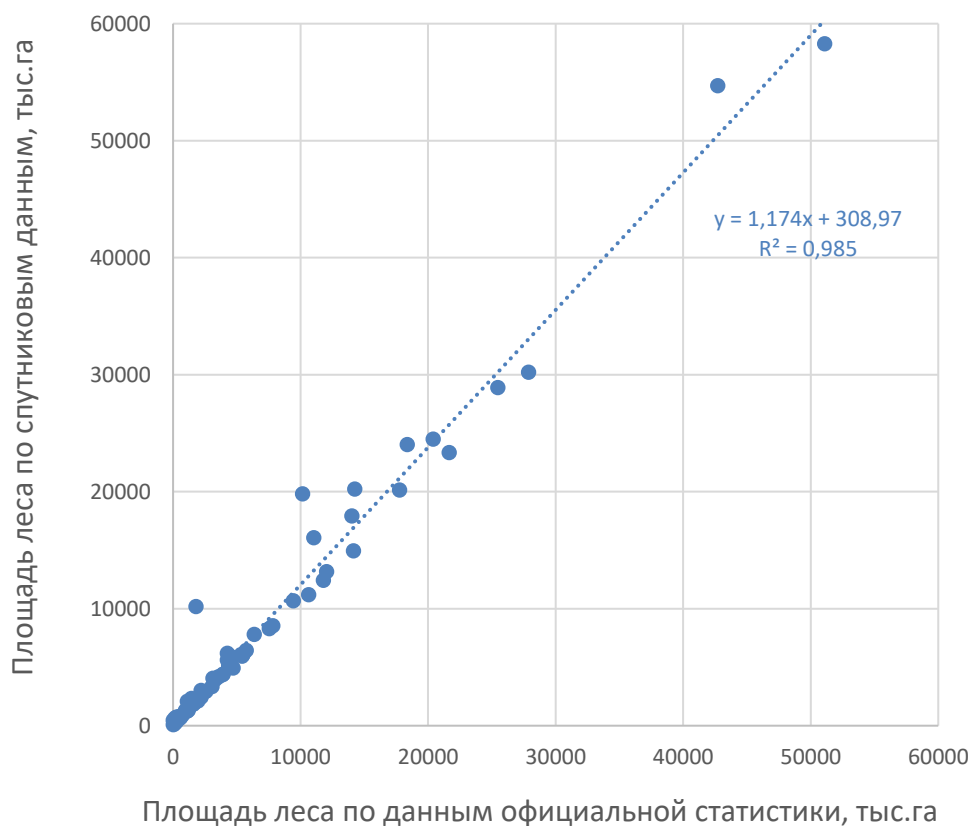


Рисунок 2.4.7 – Сравнение площади лесов на уровне субъектов РФ по данным официальной статистики и карты лесистости за 2015 год

Полученные данные о лесистости были соотнесены с данными официальной статистики на уровне субъектов РФ за 2015 год (рисунок 2.4.7), и между двумя источниками данных наблюдается высокий уровень согласованности.

На основе временных рядов оценок лесистости в пикселе данных могут быть рассчитаны линейные тренды, пространственное распределение которых продемонстрировано на рисунке 2.4.8. Представленная величина характеризует ежегодный прирост/убыль лесистости на уровне лесничеств для территории России. Таким образом, полученная временная серия карт открывает широкие возможности по анализу временной динамики покрытой лесом площади как на уровне локальных административных единиц, так и на уровне страны.

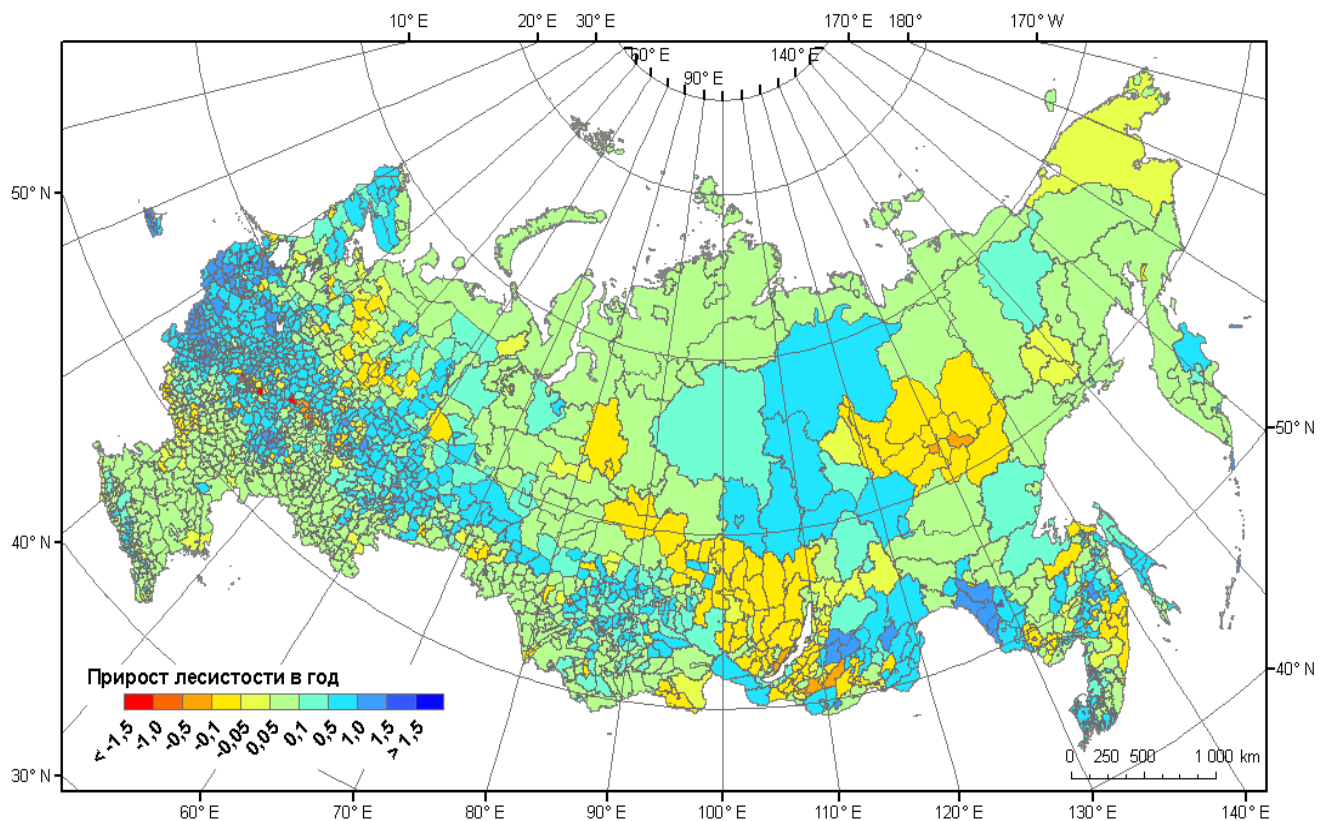


Рисунок 2.4.8 – Карта среднего прироста/убыли лесистости в год в разрезе лесничеств за период 2001-2019 годов

Построенные в рамках диссертационной работы карты сомкнутости крон лесов характеризуют пространственное распределение древостоя на подпиксельном уровне на территории страны. Представленные на рисунке 2.4.9 карты получены на основе данных о сомкнутости крон лесов и карты

преобладающих пород за 2019 год [5]. Карты отражают пространственное распределение сомкнутости крон лесов в разрезе лесничеств для шести основных групп пород: темнохвойных, светлохвойных, твердолиственных, мелколиственных пород, лиственницы и хвойного кустарника.

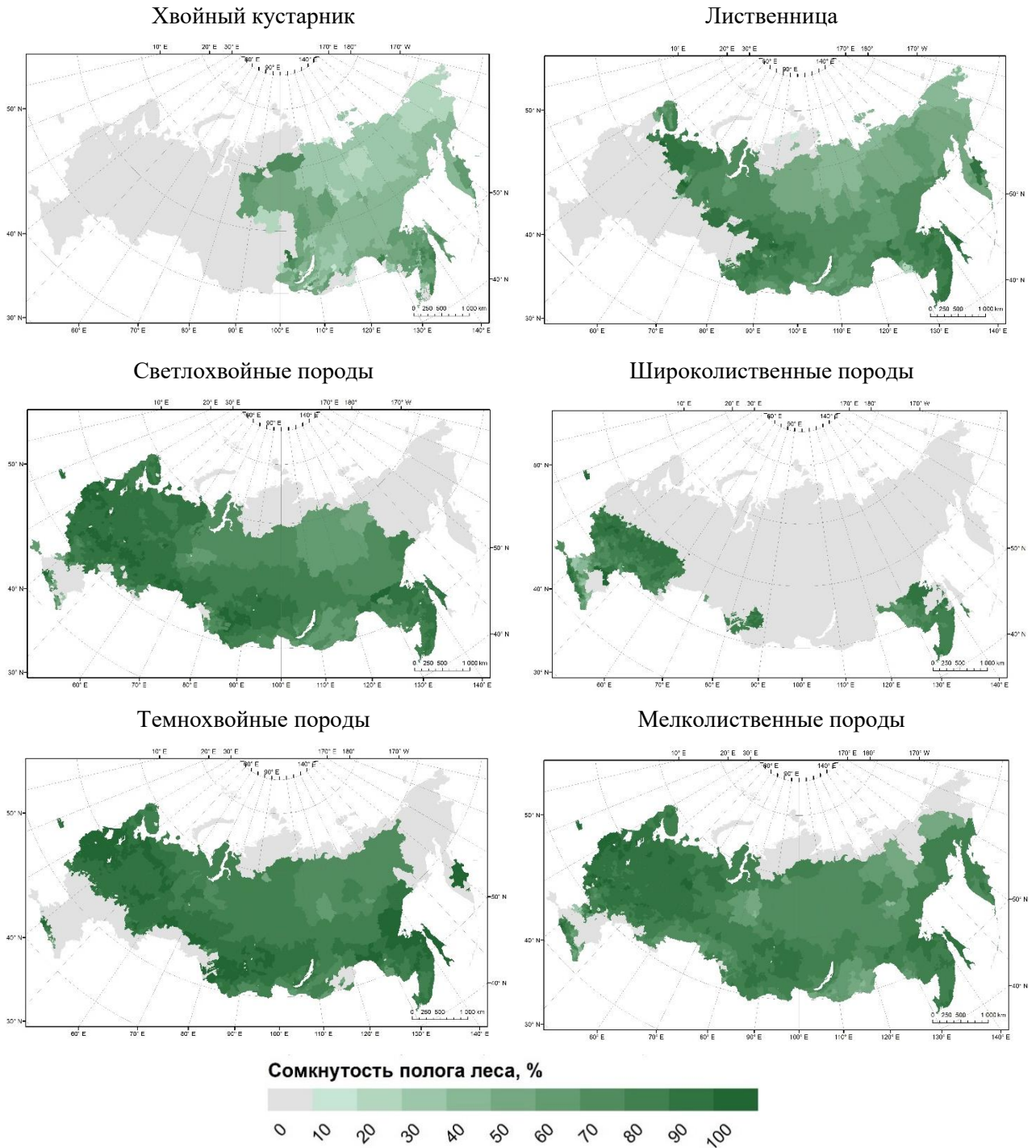


Рисунок 2.4.9 – Карты сомкнутости для различных групп пород в разрезе лесничеств за 2019 год

На рисунке 2.4.10 приведены плотности распределения сомкнутости крон леса для вышеупомянутых шести групп пород. Графики хорошо согласуются с представлением, что темнохвойные леса имеют в среднем наибольшую сомкнутость крон среди представленных групп, а кедровый стланик – наименьшую. Можно отметить, что для группы лиственничных лесов имеет наибольший разброс по сомкнутости крон, так как в данную группу помимо сомкнутых лиственничников входят лиственничные редины, широко представленные в Западной Сибири.

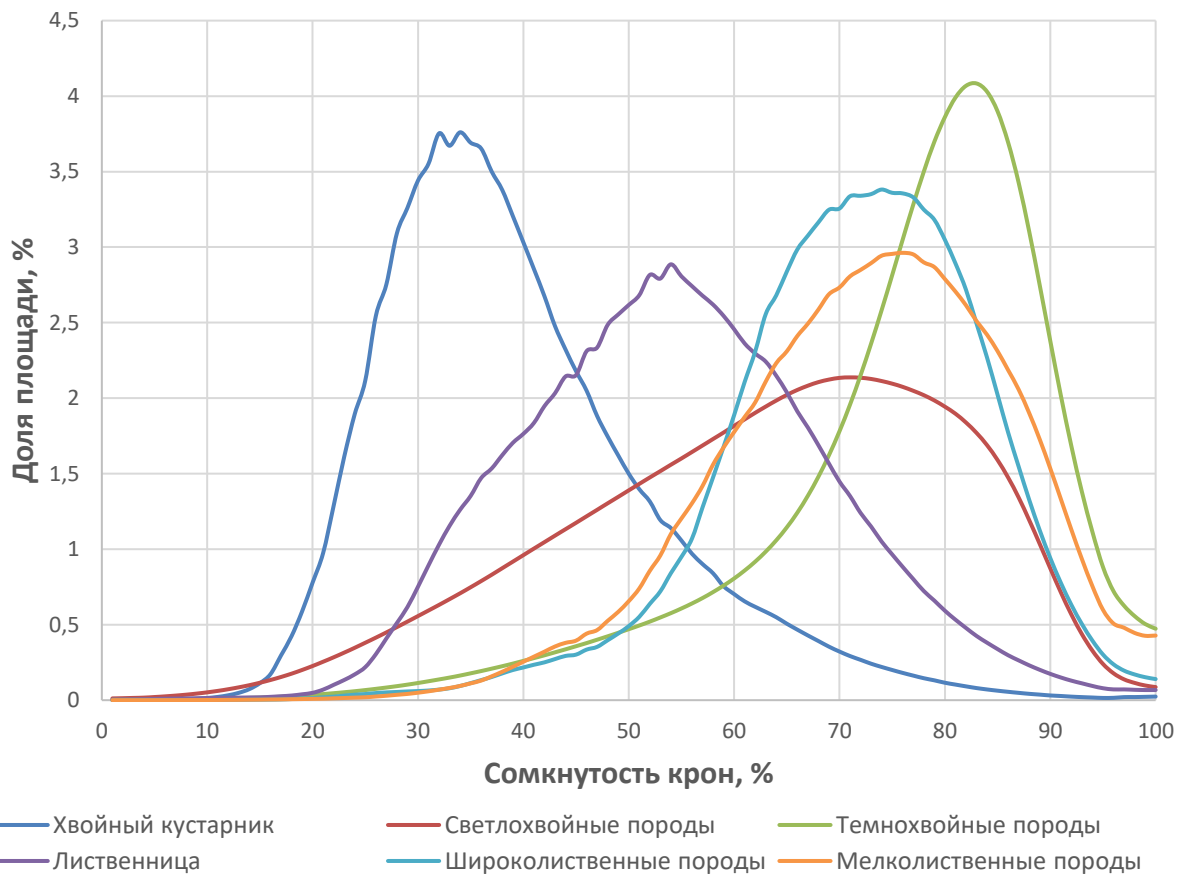


Рисунок 2.4.10 – Распределение сомкнутости крон леса для групп преобладающих пород

Построенная временная серия карт сомкнутости крон леса открывает широкие возможности по анализу пространственного распределения и временной динамики сомкнутости крон леса для ряда научных и практических задач, таких как оценка запаса насаждений, планирование лесоводственных работ и лесозаготовок.

Эмпирические связи между сомкнутостью крон насаждения определенного возраста и породы и его полнотой могут служить основой для восстановления значения полноты на территорию страны на основе полученных спутниковых карт сомкнутости крон леса.

Выводы к второй главе

- Разработан метод оценки проективного покрытия древесного полога леса по данным спутниковых наблюдений с наличием снежного покрова на основе анализа пространственного распределения спектрально-отражательных характеристик земной поверхности;
- С помощью применения разработанного метода восстановлена динамика проективного покрытия древесного полога леса для территории России на протяжении 19 лет;
- Разработан метод дистанционной оценки лесистости и сомкнутости крон с использованием данных о проективном покрытии древесного полога леса и уравнения связи между показателями горизонтальной структуры;
- На основе разработанного метода сформирован однородный ряд цифровых карт лесистости и сомкнутости крон полога лесов России по данным спутниковых наблюдений.

РАЗДЕЛ 3. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ В ЛЕСОВ НА ОСНОВЕ ДИНАМИКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ДРЕВЕСНОГО ПОЛОГА

3.1 Оценка изменений в лесах на основе разновременных данных спутниковой съёмки

В результате роста и развития, а также процессов, происходящих в лесу, состояние лесной экосистемы непрерывно изменяется. Некоторые из изменений состояния могут быть зафиксированы с помощью данных спутниковой съёмки. Под изменением в лесу при анализе данных спутниковых наблюдений понимается смена типа растительного покрова или изменение его структурных характеристик, выражаемое в изменении его спектрально отражательных свойств во времени [91, 93]. Изменения в лесу делят на одномоментные, быстро проявляющиеся, и постепенные, непрерывно накапливаемые. К одномоментным изменениям относят изменения, вызванные как естественными причинами, вспышкой насекомых, затоплением, пожарами, так и деятельностью человека, например, вырубкой лесов. Примерами постепенных изменений могут служить зарастающие рубки, на которых происходит процесс естественного лесовосстановления, ежегодная фенологическая динамика растительности [53]. Постепенные изменения могут быть также вызваны межгодовыми климатическими различиями или глобальным потеплением. Согласно величине и времени, необходимом для его фиксации, изменение состояния леса на спутниковых данных может формально описываться как категориальной переменной, например, смена типа покрова, так и непрерывной переменной – изменение проективного покрытия древесного полога леса, полноты или запаса насаждения.

Под выявлением изменений понимают процесс локализации различий в состоянии объекта или феномена, наблюдая его в разные моменты времени [104]. Дистанционное зондирование земли позволяет обеспечить набор регулярный, точный и согласованный набор измерений состояния земной поверхности, с помощью которого строятся оценки происходящих изменений в лесах.

Применение спутниковых данных для мониторинга изменений обусловлено, прежде всего, охватом территории и разнообразием пространственного, временного и спектрального разрешения спутниковых данных. Выявление изменений по данным ДЗЗ играет ключевую роль в поиске решений по проблемам урбанизации и обезлесения [39], управления природными ресурсами, поддержания биоразнообразия экосистем и принятия решений по их устойчивому развитию [16].

Основным допущением при использовании спутниковых данных для детектирования трансформации лесного покрова по разновременным спутниковым данным является предположение о том, что она должна проявляться на спутниковых данных в виде изменения КСЯ, и проявление этого изменения должно превалировать над изменениями КСЯ, вызванными другими факторами [104]. Другие факторы включают в себя фенологическое состояние растительности, атмосферные условия, геометрические условия съёмки и наблюдения, рельеф местности и некоторые другие [1]. Хотя влияние мешающих факторов может быть частично уменьшено путем выбора подходящих данных, добиться полного их исключения достаточно сложно [34, 35]. Многообразие возможных причин трансформации лесного покрова и необходимости учитывать вышеперечисленные факторы, вносящие шум в коэффициенты спектрального отражения, должны быть приняты во внимание при выборе метода детектирования изменений по данным ДЗЗ.

Выделяют следующие основные этапы процесса выявления изменений по спутниковым данным: выбор и получение спутниковых данных и опорной информации, предварительная обработка данных ДЗЗ, построение набора информативных признаков, выбор или разработка метода для конкретной задачи на основе уже известных алгоритмов и итоговая оценка работы метода [39]. При выборе спутниковых данных необходимо учитывать, прежде всего, вегетационную динамику растительности и выбирать для анализа данные, близкие по дате съёмки. Для интерпретации изменений, оценки информативности построенных признаков, настройки метода выявления изменений и оценки его точности часто необходима

опорная информация, которая может быть представлена в виде карт или точечных описаний.

Предварительная обработка спутниковых данных состоит из геометрической и радиометрической коррекции. Геометрическая коррекция заключается в пространственном совмещении разновременных изображений и коррекции влияния рельефа местности при наличии цифровой модели рельефа. Радиометрическая коррекция в зависимости от дальнейшей обработки может состоять из следующих процедур [1, 53, 118]:

- коррекции влияния положения Солнца и геометрических условий наблюдения;
- коррекции влияния атмосферных условий;
- взаимной нормализации разновременных изображений для компенсации влияния различий в характеристиках сенсора, состояния атмосферы, фенологического состояния растительности и других факторов;
- удаления облаков и теней, снега из спутниковых данных.

Построение информативных признаков на основе спутниковых данных важный этап выявления изменений [1]. Выделяют следующие типы признаков:

- исходные коэффициенты спектральной яркости;
- признаки, основанные на яркостных преобразованиях изображений, например, спектральные индексы или главные компоненты;
- признаки, основанные на пространственно-яркостных преобразованиях изображения, например, морфологические или текстурные признаки;
- признаки, основанные на тематическом анализе изображений, такие как результаты классификации или результаты декомпозиции спектральных, признаки на основе вегетационной динамики коэффициентов спектральной яркости.

Примерами признаков, основанных на тематическом анализе изображений, являются оценки показателей горизонтальной структуры лесов, построенные на основе спутниковых данных, а также карты лесов.

С момента запуска первых спутников и получения первых разновременных фотографий земной поверхности было предложено огромное число разнообразных методов выявления изменений на основе пары спутниковых снимков. Методы различаются как по используемым ими алгоритмам анализа данных, так и по информативным признакам, которые используются для анализа. Авторы работы [87] делят все имеющиеся методы выявления изменений на несколько категорий: методы, использующие алгебру изображений, трансформацию признакового пространства, классификацию, сложные модели и другие.

Методы, основанные на алгебре изображений, включают в себя построение разности изображений, построение регрессии между изображениями, построение поканального отношения, построение разности вегетационных индексов, анализ вектора изменений (CVA) и метод вычитания фона [87, 104]. Особенностью данной группы методов является наличие порогов, с помощью которых определяются участки изменений. Данные методы относительно просты в применении, но нуждаются в интерпретации построенных изменений. Для применения методов из данной категории важен выбор признаков, чувствительных для анализируемого типа изменений, и оптимальный подбор порогов. Методы, основанные на алгебре изображений, часто требуют дополнительную фильтрацию шумов на финальном этапе.

Под методами, использующими трансформацию признакового пространства, понимают метод главных компонент, преобразования Томаса-Каута, Грама-Шмидта и Хи-квадрат [51, 88]. Главное преимущество использования данной группы методов – уменьшение избыточности информации в данных и построение набора линейно независимых признаков. Сложность применения данных методов заключается в необходимости выбора оптимального порога для отсека

изменений Кроме того, преобразование признакового пространства затрудняют итоговую интерпретацию построенных изменений.

Методы, использующие алгоритмы классификации, включают в себя сравнение результатов независимой классификации, совместный спектрально-временной анализ, классификацию методом максимального правдоподобия, кластеризации, решающих деревьев и нейронных сетей [1, 64, 111]. Успех применение методов из данной группы зависит от наличия и качества обучающей выборки. Главное преимущество данных методов – легкая интерпретация построенных изменений в терминах тематических классов и уменьшение влияние атмосферы и других мешающих факторов на результат классификации. Однако построение большой и качественной обучающей выборки для применения методов данной группы требует достаточных временных и человеческих ресурсов.

Под методами, основанными на использовании сложных моделей, понимают модель отражения Ли-Стралера, модели спектральных смесей, модели оценки биофизических параметров растительности [36, 86, 88]. В данных моделях коэффициент спектрального отражения переводится в физические параметры с помощью линейных или нелинейных преобразований. Полученные физические параметры легче интерпретировать, чем коэффициенты спектральной яркости. Недостатками данным методов считают время вычисления и сложность локальной настройки моделей для преобразования коэффициентов спектральной яркости в биофизические параметры.

В последнем десятилетии XXI века в связи с ростом количества и качества доступных спутниковых данных увеличивается количество публикаций, касающихся методов выявления изменений на основе временных серий данных [118]. Использование временных серий с одной стороны требует более совершенных алгоритмов обработки данных, но с другой стороны открывает возможности для детектирования переходных изменений (трендов). Основываясь на математических подходах, используемых для детектирования изменений на основе временной серии данных, Z. Zhu выделяет шесть категорий методов

выявления изменений: пороговые, разностные, методы, основанные на сегментации временного профиля, методы классификации траектории, методы статистических границ и методы, основанные регрессии [118]. В рамках каждой категории предполагается разделять методы детектирования изменений в зависимости от следующих характеристик:

- Частота используемой спутниковой съёмки определенной территории: низкая – раз несколько лет, средняя – раз в год, высокая – несколько раз в год;
- Используемый признак для детектирования изменений: спектральные каналы; вегетационные индексы; результаты трансформации спектрального признакового пространства, например, главные компоненты; результат классификации по типам покрова или другие непрерывные тематические признаки, например, показатели горизонтальной структуры лесов;
- Количество одновременно используемых признаков при анализе элемента временного ряда (размерность признакового пространства);
- Онлайн или офлайн обработка данных, определяющая оперативность обработки данных и возможность опоры на предысторию. Онлайн алгоритмы позволяют детектировать изменения в реальном времени, в то время как неоперативные алгоритмы требуют достаточно большое время для обработки и подразумевают, что вся анализируемая серия данных или ее существенная часть уже существует до начала обработки;
- Тип детектируемых изменений – одномоментные или постепенные.
- Пространственная единица детектируемых изменений: подпиксельная оценка, пиксель, группа пикселей, то есть объект.

В рамках пороговых методов для детектирования изменений используется порог, который часто рассчитывается на основе данных предыстории [73, 81]. Значения на временном профиле исследуемого признака, сильно отклоняющиеся от заданного порога, помечаются как изменения. Обычно для анализа выбирается признак, чувствительный к изменениям в определенном типе покрова, например,

нормализованный разностный вегетационный индекс или индекс нарушенности [73]. Сильной стороной данных методов является простота реализации по сравнению с методами других групп. К недостаткам относят сильную зависимость результата от выбранного порога.

Разностные методы основаны на попарном сравнении двух сцен временного ряда. Изменениями считают области, где возникают наибольшие различия. По размеру анализируемой единицы методы данной категории делятся на три группы: методы классификации, методы анализа спектральных смесей и методы на основе спектральных индексов. В первую группу методов входят алгоритмы сравнения двух результатов классификаций, полученных за разные даты [1, 78]. Данные алгоритмы широко используются при анализе небольшой территории и средней и малой частоте спутниковых данных. Из-за независимого анализа сцен, часто возможно опустить этап атмосферной коррекции. К преимуществам данных методов можно отнести простоту интерпретации результатов в терминах «из типа поверхности А в тип поверхности Б». Однако точность данной подгруппы методов зависит от точности результатов классификации каждой сцены: ошибки классификации, сделанные в каждой из построенных карт типов покрова, накапливаются в результирующей карте изменений.

Во вторую группу методов входят алгоритмы, детектирующие изменения на основе метода спектральных смесей [55, 88]. Данную группу методов выделяет – возможность выявления изменений на подпиксельном уровне. Однако точность данных методов также сильно зависит от точности разложения на чистые компоненты, и аналогично предыдущей группе методов ошибки разложения аккумулируются в результирующей карте изменений.

Методы третьей группы используют спектральные индексы и каналы для сравнения пары сцен. Наиболее часто используемые индексы - NDVI, NDWI (нормализованный индекс водного стресса), NBR (индекс пирогенного повреждения растительности), исходные спектральные каналы и другие. Данная группа методов требует точной радиометрической калибровки для того чтобы

сравнивать спектральные индексы между разными датами съёмки. Исследователи полагают, что точность детектирования изменений методами данной группы среди методов рассматриваемой категории наибольшая [118]. Все методы данной категории в большинстве случаев используются для детектирования одномоментных изменений.

Методы сегментации временного профиля основаны на идее разбиения временного профиля признака на линейные участки. Одним из примеров методов данной группы является Landsat-based detection of Trends and Recovery (LandTrendr) [77]. Данные методы, обычно не являются оперативными, так как требуют наличия всего набора данных для построения временного профиля. Предполагается, что данными методами могут быть детектируемы как одномоментные, так постепенные изменения, причем можно отделить первые от вторых на основе анализа углов наклона линейных участков. Наиболее часто использованными индексами при применении данной группы методов, являются NBR и Tasseled Cap Wetness (TCW). К недостаткам данных методов можно отнести то, что полученные результаты часто зашумлены, так как опираются на анализ временного ряда в точке, и нуждаются в применении пространственной фильтрации на этапе постобработки. Методы выявления изменений на основе сегментации временных профилей являются вычислительно трудными, но имеют большой потенциал для использования на протяжённых территориях.

Методы классификации временных траекторий изначально направлены на поиск изменений определенного типа. Они используют информацию об определённом типе изменения при обучении, чтобы затем классифицировать весь набор временных профилей серии данных. Все методы можно разделить на две группы: методы классификации на основе предположений о траекториях изменений [77] и методы классификации временных профилей на основе машинного обучения [70, 71, 97]. Для первой группы методов решающие правила при классификации создаются на основе экспертных знаний о возможных временных траекториях исследуемого признака при интересующем типе изменения. Обычно методы данной группы основываются на анализе

единственного признака для детектирования изменений. Для второй группы характерно использование многомерного признакового пространства и обучающей выборки для построения конечных результатов. В большинстве случаев методы классификации траектории вычислительно сложные, не являются оперативными и направлены на детектирование одномоментных изменений.

Методы выявления изменений на основе статистических границ основываются на предположении, что временная траектория пикселя будет находиться в рамках заданных статистических границ и любой выход за границы считается изменением [117]. Особенностью методов данной категории является использование рядов данных с высокой временной частотой. В подавляющем большинстве методов до этапа вычисления статистических границ временная кривая признака раскладывается на тренд, сезонную составляющую и шум, поэтому методы данной группы менее чувствительны к сезонным изменениям. Методы выявления изменений на основе статистических границ могут детектировать изменение в реальном времени, но некоторым необходима существенная предыстория для корректного определения статистических порогов. Несмотря на простую реализацию и более высокую скорость работы по сравнению с методами других категорий, методы данной группы требуют достаточного количества вычислительных ресурсов.

Главная цель методов детектирования изменений на основе регрессии – оценить долговременные тренды на основе временных профилей данных, то есть найти постепенные изменения. Обычно все методы данной группы используют единственный признак для оценки изменений, например, NDVI [108]. В регрессионных методах выявления изменений оценивается связь между двумя переменными: независимой переменной является время, а зависимой значение выбранного признака во времени [10]. Выявление трендов изменений методами регрессий предполагает отсутствие быстрых и сильных изменений на временной серии данных. Регрессионные методы выявления изменений относительно просты в использовании, но большинство предполагает наличие длинных рядов данных для построения надежной связи. Поэтому методы данной группы обычно

непригодны для детектирования одномоментных изменений. Кроме того, регрессионные методы сильно зависят от радиометрической и пространственной согласованности набора данных, поэтому особенно важно уделять достаточное внимание этапу предобработки при использовании методов выявления изменений данной группы.

На выбор и применение конкретного метода детектирования изменений накладывается ряд пространственных, спектральных, временных и тематических ограничений, вызванных особенностями конкретной задачи и имеющимся набором спутниковых данных. Используемый метод выявления изменений значительно определяет качество и количественные характеристики выявляемых изменений. При обработке одних и тех же данных разные методы выявления изменений могут приводить к различным результатам [1]. Возможны ситуации, когда некоторые типы изменений могут быть выявлены не полностью или не могут быть выявлены совсем выбранным методом [35]. Понимание причины и характера изменений позволяет выбрать подходящий метод для их детектирования и классификации [39, 53, 87, 118].

3.2 Метод детектирования рубок леса по данным Landsat 8 OLI и Sentinel-2 MSI на основе изменения проективного покрытия древесного полога леса

Одной из важных задач спутникового мониторинга лесов является задача детектирования лесных вырубок. Ряд проведенных научных исследований по использованию данных дистанционного зондирования для фиксации изменений в лесах на территории России подтверждает наличие за последние годы значительных изменений лесного покрова из-за ряда факторов, одним из которых являются вырубки [4, 69, 98]. Необходимость оперативной оценки динамики лесного покрова связанной с промышленной эксплуатацией лесов и огромная

территория для инвентаризации являются причинами использования спутниковых изображений для мониторинга изменений в лесах, связанных с рубкой леса. Для решения данной задачи был разработан метод детектирования изменений лесного покрова по спутниковым данным.

Метод выявления изменений в лесах основан на совместном анализе пары разновременных спутниковых изображений и включает в себя следующие основные этапы (рисунок 3.2.1):

- выбор пары разновременных спутниковых изображений (изображения должны быть получены с максимально возможной близостью по датам съёмки в различные годы, с учетом влияния облачного покрова);
- оценка средних значений КСЯ леса и безлесных участков в различные моменты съёмки (опорные значения КСЯ покрытых лесом и безлесных территорий могут оцениваться на основе набора задаваемых экспертом типичных участков или автоматически с привлечением карт лесов);
- определение проективного покрытия древесного полога леса на основе линейной модели спектрального смешения с двумя компонентами;
- стратификация территории по степени проективного покрытия древесного полога леса;
- вычисление попиксельной разницы проективного покрытия древесного полога леса в различные моменты времени;
- оценка пороговых значений разницы проективного покрытия древесного полога леса для детектирования изменений лесов;
- выявление изменений лесов по величине разницы проективного покрытия древесного полога леса в различные моменты времени.

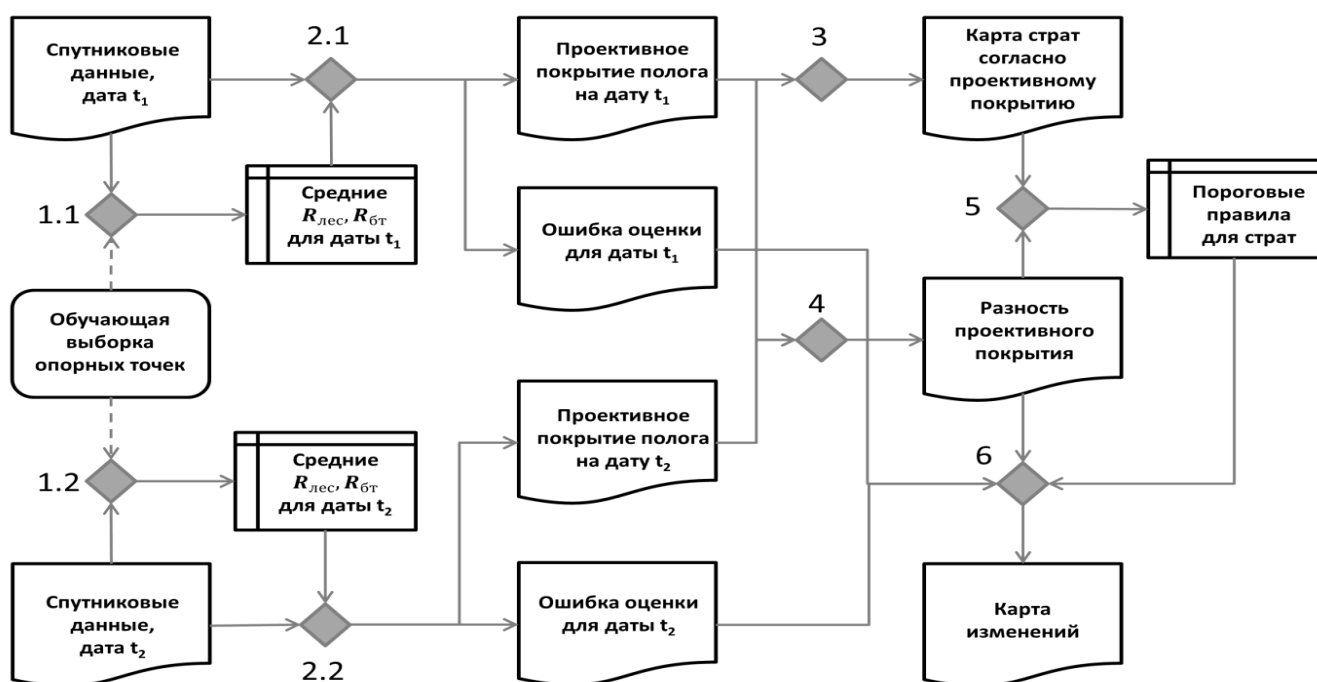


Рис. 3.2.1 – Схема метода выявления изменений лесов по разновременным спутниковым изображениям: 1.1, 1.2 – получение средних значений коэффициентов спектральной яркости леса и безлесных участков в различные моменты времени; 2.1, 2.2 – оценка проективного покрытия древесного полога леса в различные моменты времени, 3 – стратификация территории по степени проективного покрытия древесного полога леса, 4 – построение изображения разности значений проективного покрытия древесного полога леса, 5 – оценка значений порогов для детектирования изменений лесов, 6 – детектирование изменений лесов. Обозначения: t_1, t_2 – даты съёмки спутниковых данных, $t_1 < t_2$; $R_{лес}, R_{бт}$ – опорные значения коэффициентов спектральной яркости классов «лес» и «безлесные территории»

Выбираемая пара разновременных спутниковых изображений должна быть максимально возможно свободной от влияния облачного покрова и обеспечивать охват временного периода для выявления изменений лесов при одновременном стремлении к минимизации различий спектрально-яркостных свойств земной поверхности, вызванных, прежде всего, сезонной динамикой растительного покрова в период вегетации, а также наличием снежного покрова и изменениями высоты Солнца в зимний период. Для минимизации влияния сезонных изменений растительного покрова, а также условий освещения местности, выбранные спутниковые изображения должны быть получены с максимально возможной (с учетом влияния облачного покрова) близостью по датам съёмки в различные годы.

Для повышения достоверности детектирования изменений рекомендуется использовать спутниковые данные съёмки в летний и зимний сезоны, как наиболее стабильные по отражательным свойствам лесного покрова. Проявляемая в наибольшей мере в весенний и осенний периоды сезонная динамика растительности может приводить к существенным межгодовым вариациям спектрально-отражательных характеристик земного покрова и, как следствие, к снижению достоверности выявляемых изменений лесов.

Опорные значения коэффициентов спектральной яркости покрытых лесом и безлесных территорий могут оцениваться на основе набора задаваемых экспертом типичных участков или автоматически с привлечением, например, имеющихся карт лесов. Для автоматизации процессов обработки спутниковых данных при детектировании изменений лесного покрова разработан метод оценки значений коэффициентов спектральной яркости леса и безлесных участков на основе гистограммы анализируемых изображений. Метод автоматической оценки опорных значений коэффициентов спектральной яркости леса и безлесных участков применяется независимо для каждого спутникового изображения и включает в себя следующие этапы:

- фильтрация (устранение локальных пиков) и нормирование гистограммы изображения;
- поиск максимального пика гистограммы с определением соответствующего ему значения коэффициентов спектральной яркости и установлением его принадлежности к покрытым лесом или безлесным территориям;
- поиск второго пика исходной гистограммы изображения методом последовательного вычитания симметризованных частичных гистограмм с проверкой разностного распределения на симметричность.

С помощью линейной модели спектрального смешения [103] и полученных на предыдущем этапе опорных значений коэффициентов спектральной яркости обоих компонент смесей (леса и безлесные территории) решается задача минимизации

среднеквадратичного отклонения с ограничениями для определения в каждом пикселе доли площади леса и ошибки разложения на компоненты смеси:

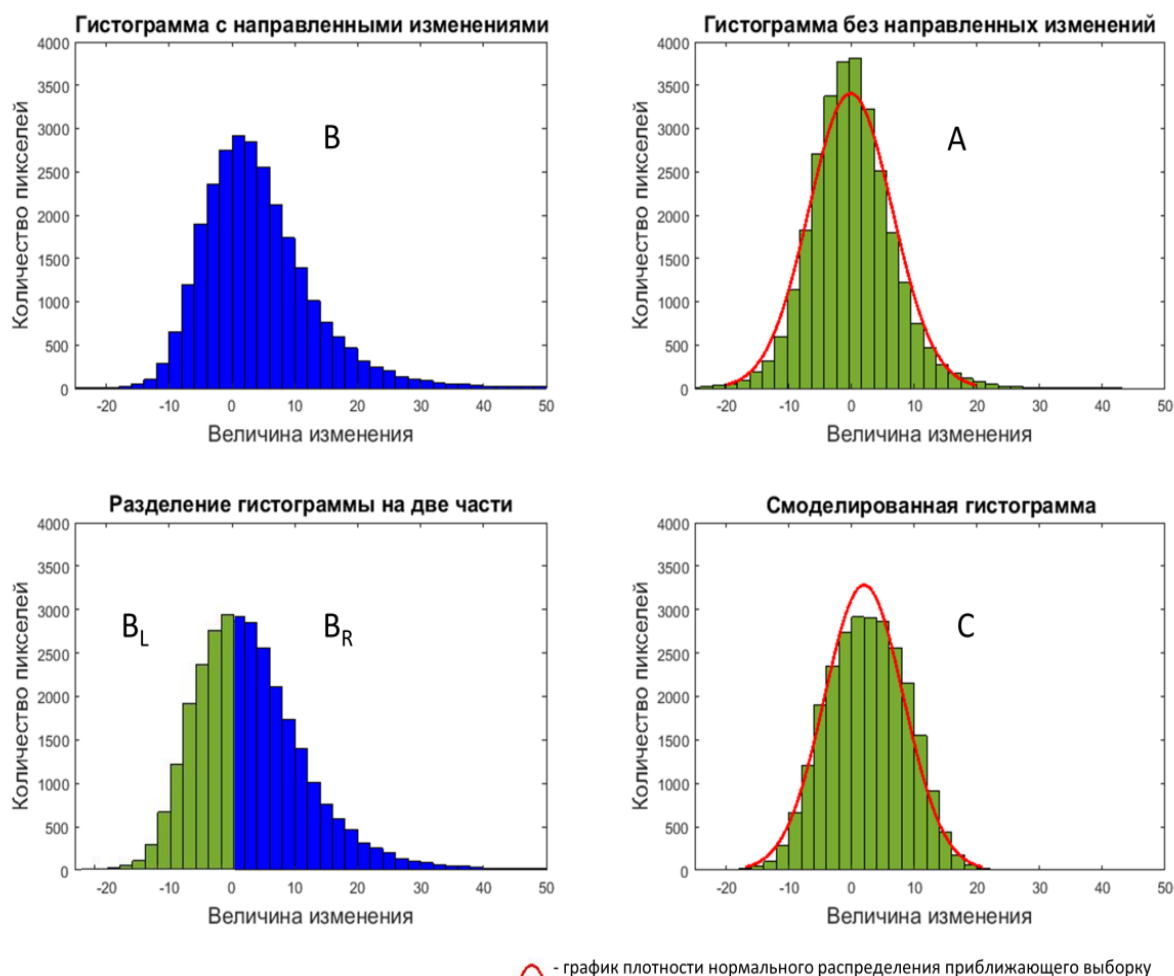
$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R^i - R_{\text{лес}}^i S_{\text{лес}} - R_{\text{бт}}^i S_{\text{бт}})^2 \xrightarrow{S_{\text{лес}}, S_{\text{бт}}} \min \quad (18)$$

$$S_{\text{лес}} + S_{\text{бт}} = 1, \quad S_{\text{лес}} \geq 0, \quad S_{\text{бт}} \geq 0,$$

где R^i – КСЯ в i -ом спектральном канале; $R_{\text{лес}}^i, R_{\text{бт}}^i$ – опорные значения КСЯ классов в i -ом канале; $S_{\text{лес}}, S_{\text{бт}}$ – доли площади пикселя, занимаемые классами; E – среднеквадратическая ошибка оценки доли площади рассматриваемых классов в пикселе; n – количество спектральных каналов. Возможность оценки проективного покрытия древесного полога леса с помощью линейной модели спектральных смесей с двумя компонентами обеспечивается предположением, что на анализируемом участке присутствует только один тип леса и только один тип подстилающей поверхности [2]. Данное предположение в модели не является ограничением ее применимости, и характеризуют уровень детальности рассмотрения объекта исследования. Результаты оценки проективного покрытия древесного полога леса линейной моделью спектральных смесей могут считаться корректными при применении модели на некоторой локальной территории.

Процедура вычисления порогов основана на предположении о нормальном распределении случайных шумов разностного изображения. При отсутствии изменений лесов гистограмма разностного изображения близка к графику плотности нормального распределения с нулевым математическим ожиданием и стандартным отклонением δ_1 (гистограмма А на рисунке 3.2.2). В таком случае гистограмму разностного изображения можно разделить на две части относительно среднего значения: левую B_L – без изменений и правую B_R – с изменениями. Построим гистограмму С: $C = B_L \cup B'_L$, где B'_L – гистограмма симметричная гистограмме B_L относительно среднего значения (гистограмма С на рисунке 2). Гистограмма С близка к графику плотности нормального распределения с нулевым математическим ожиданием и стандартным отклонением δ_2 ($\delta_2 \leq \delta_1$). Основываясь на предположении о нормальном распределении, можно ожидать, что

приблизительно 95% выборки находится в пределах двух стандартных отклонений от среднего значения, поэтому статистический порог для отсекаания изменений выбирается как $2\delta_2$.



— график плотности нормального распределения приближающего выборку

Рис.3.2.2 – Гистограммы разностного изображения: А – случай спутниковых данных без изменений, В – случай спутниковых данных с изменениями, С – смоделированная гистограмма

В случае анализа небольшого фрагмента, по которому нельзя построить статистически представительную выборку, или, когда анализируемая гистограмма С далека от графика плотности нормального распределения для вычисления порогов используется следующая оптимизационная процедура подбора порога. Ось категорий гистограммы разбивается на интервалы с шагом d_i (рисунок 3.2.3). Для каждого интервала оценивается отношение количества точек p_B и p_C гистограмм В и С, лежащих в нем. Поочередно рассматривая интервалы от максимального возможного значения порога до 0, в качестве значения порога

выбирается левая граница первого интервала, в котором отношение количества точек $p_B / p_C < k$, где k подобрано экспериментально и равно 0.8.

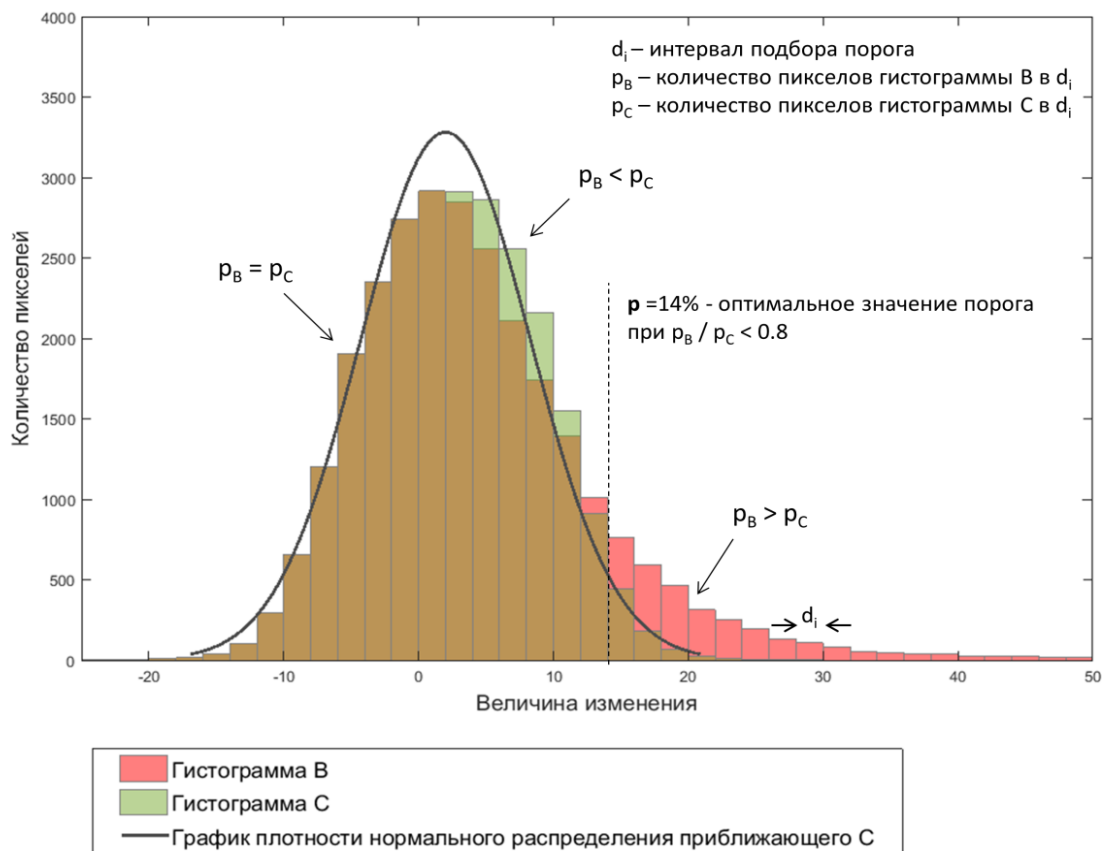


Рис. 3.2.3 – Подбор порога с помощью оптимизационной процедуры

Выбранный порог является оценкой максимального уровня шума разностного изображения, вызванного случайными факторами. В ходе экспериментов было отмечено, что величина случайного шума разностного изображения не одинакова для безлесных и покрытых лесом участков. При увеличении лесистости территории, величина максимального уровня шума уменьшается. Установление данного факта обусловило целесообразность стратификации территории по степени проективного покрытия древесного полога леса для более точной настройки порогов. Проведенные эксперименты показали, что стратификация также позволяет частично учесть влияние неоднородности лесного покрова (наличие различных типов леса) на рассматриваемой территории. Для каждого пикселя изображения вычисляется порог, зависящий от оценки максимального

уровня шума величины соответствующей страты и ошибки оценки проективного покрытия древесного полога леса в пикселе:

$$p_{ij} = \max(p, E_{ij}), \quad (19)$$

где (i, j) – координаты пикселя, p – порог для страты соответствующей пикселю с координатами (i, j) , E_{ij} – средняя ошибка разложения на чистые компоненты в пикселе. На заключительном этапе обработки к изображению разности оценок проективного покрытия древесного полога леса применяется набор пороговых правил, на основе которых строится попиксельная маска изменений, содержащая информацию о координатах изменений и их величине, выраженной в изменении проективного покрытия древесного полога в пикселе.

Согласно существующей классификации, предложенный метод можно отнести к разностным методам, использующим модели спектральных смесей [118]. Модели спектральных смесей позволяют оценивать пропорции заданного множества тематических классов (компонентов) в пикселях, что обеспечивает простоту интерпретации изменений и позволяет оценивать их величину в количественных шкалах. К ограничениям подходов, основанных на использовании моделей спектральных смесей можно отнести необходимость задания значений коэффициентов спектральной яркости, соответствующих чистым компонентам, что предъявляет дополнительные требования к наличию такого рода априорных данных. Представленный метод обеспечивает простоту и однозначность интерпретации получаемых результатов, применимость на различных территориях и в различные временные периоды, в том числе, за счет адаптивности к сезонным изменениям спектрально-отражательных свойств земного покрова.

3.3 Разработка и апробация программного комплекса детектирования рубок леса по разновременным данным спутниковой съёмки

На основе представленного метода детектирования изменений был создан интерактивный инструмент детектирования рубок леса в информационной системе

«ВЕГА-Приморье» и спутниковом сервис коллективного пользования «ВЕГА-Science» [22, 23]. Инструмент позволяет использовать спутниковые данные, предоставляемые Центром коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» [24], в котором имеется долговременный (с 1984 года до настоящего времени) и ежедневно пополняемый архив данных спутниковых систем Landsat и Sentinel-2 на всю территорию Северной Евразии. Выбор данных ДЗЗ для решения задачи обусловлен пространственным разрешением в 10-30 метров, оптимальным для детектирования сравнительно небольших по площади объектов, таких как вырубки, и наличием требуемых спектральных каналов: зелёного (533-590 / 537-582 нм), красного (636-673 / 646-685 нм), ближнего инфракрасного (851-879 / 767-908 нм). Данный набор каналов чувствителен к состоянию растительности и лежит в основе получения многих спектральных вегетационных индексов [40]. Кроме того, данные Landsat 8 OLI и Sentinel-2 MSI свободно распространяются, имеют хорошую географическую привязку и известные методы предварительной обработки данных [105, 115].

Инструмент реализует следующую процедуру анализа [17]. На первом шаге с помощью картографического web-интерфейса осуществляется подбор снимков и области, на которой будет произведена обработка. На странице поиска данных реализовано быстрое добавление входных данных в качестве параметра в инструмент и автоматический выбор необходимых спектральных каналов. Выбранные спутниковые данные должны быть одно типа, по возможности свободные от облачности и теней, полученные максимально близко по времени за разные годы. На втором шаге происходит задание параметров процедуры детектирования изменений:

- *Обучающая выборка.* Опорные точки двух классов «лес» и «безлесные территории» являются необязательным параметром алгоритма. В случае выбора параметра, точки могут быть расставлены автоматически с помощью карты лесов по данным PROBA-V [12] или расставлены вручную пользователем.

- *Стратификация.* Стратификация территории по степени проективного покрытия древесного полога леса является необязательным параметром, отвечающим за более точную настройку порогов в зависимости от степени покрытия участка лесом.
- *Порог разделения.* С помощью порога разделения на анализируемой разностной гистограмме выделяют значения, соответствующие произошедшим изменениям. Данный параметр задается в стандартных отклонениях от среднего значения. Значение по умолчанию – два стандартных отклонения.
- *Выбор дополнительных масок (воды, облачности или заданных оператором).* Для ограничения области, в которой происходит обработка, с помощью панели инструментов можно задать полигон, произвольной формы. Также возможно исключить из рассмотрения области, занятые водными объектами, задав соответствующий параметр.
- *Выбор топографической коррекции.* Для минимизации влияния рельефа на значения коэффициентов спектральной яркости инструмент позволяет применять на этапе подготовки данных следующие модели топографической нормализации: C-factor, Cosine, Minnaert, Percent [100].
- *Фильтрация результата.* В инструменте предусмотрена пространственная фильтрация построенного результата. Окно и способ сглаживания задается при выборе данной опции.

После задания входные данные и необходимые параметров, на третьем шаге запускается автоматическая процедура детектирования изменений на выбранной паре снимков. Результат обработки выводится на экран и на последнем шаге происходит проверка корректности результатов оператором и последующее занесение в базу данных. База данных хранит информацию о выявленных изменениях в векторном виде. Для анализа результатов выявления изменений в информационной системе предусмотрена возможность визуализации всех внесенных изменений, а также изменений за заданный пользователем период времени для рассматриваемой территории. В системе реализован инструмент,

выдающий информацию по клику в точке карты, который для отображаемого полигона-объекта выводит его площадь, тип и даты обработанных данных, и среднюю величину изменения. Принципы хранения изменений в базе данных информационной системы позволяют каждому пользователю определять необходимую частоту обработки территории: чем чаще обработан участок, тем точнее границы и датировка произошедших изменений.

Для апробации данного инструмента и оценки влияния его параметров и свойств входных данных был проведен ряд экспериментов. В первом эксперименте оценивалась точность детектирования изменений при использовании следующих опций:

- автоматический или экспертный выбор опорных значений КСЯ леса и безлесных участков;
- стратификация территории по степени проективного покрытия древесного полога леса древесного полога леса или ее отсутствие;
- статистический (2 δ) выбор порогов или выбор порогов с помощью оптимизационной процедуры.

Предложенный метод был применен для оценки изменений на тестовом участке в Приморском крае с координатами центра 46.061° с.ш. и 134.853° в.д., и площадью 35.8 км². С помощью полученных в зимний период системами ДЗЗ Landsat 8 OLI и Sentinel-2 MSI спутниковых данных были выявлены рубки леса 2018 года.

Представленное в таблице 3.3.1 сравнение демонстрирует, что результаты выявления рубок леса с автоматическим выбором опорных значений КСЯ леса и безлесных участков хорошо согласуются с результатами, полученными при экспертном выборе соответствующих значений, и являются более устойчивыми.

Таблица 3.3.1 – Влияние параметров метода на результаты детектирования изменений лесов

Оцениваемые параметры		Каппа Коэна		Доля изменений, подтверждённых при использовании заданного набора параметров, %	
		<i>Landsat</i>	<i>Sentinel</i>	<i>Landsat</i>	<i>Sentinel</i>
<i>Выбор опорных значений КСЯ</i>	экспертный	0.83	0.87	82%	82%
	автоматический			88%	93%
<i>Стратификация территории</i>	без стратификации	0.86	0.9	82%	85%
	стратификация с шагом 10% проективного покрытия древесного полога леса			93%	98%
<i>Метод выбора порогов</i>	статистический (2 δ)	0.73	0.8	63%	73%
	оптимизационная процедура			96%	96%

Стратификация территории по проективному покрытию древесного полога леса увеличивает долю подтверждённых изменений лесов на 10-13%. Несмотря на то, что результаты детектирования изменений лесов при статистическом (2 δ) выборе порогов и подборе порогов на основе оптимизационной процедуры хорошо согласуются, применение оптимизационной процедуры порога является более консервативным. То есть около 30% площади изменений лесов, детектируемых с помощью статистического порога, не выявляется при применении автоматического порога.

В втором проведенном эксперименте исследовалось влияние времени съёмки на результаты выявления изменений. На тестовом участке в Приморском крае с координатами центра 46.326°с.ш. и 134.189°в.д., и площадью 214 км² предложенным методом было обработано 18 пар сцен Landsat 8 OLI и 14 пар сцен Sentinel-2 MSI для детектирования рубок леса в 2016-2018 годах. Для результата выявления изменений между каждой парой сцен вычислена доля подтвержденных и пропущенных изменений. Ввиду отсутствия наземных опорных данных для вычисления доли подтвержденных изменений использовались маски изменений,

построенные экспертом в результате визуального анализа спутниковых данных. Полученные результаты, агрегированные по календарным месяцам, представлены в таблице 3.3.2.

Таблица 3.3.2 – Сравнение результатов применения разносезонных спутниковых данных для выявления изменений в лесах

Период	Каппа Коэна	Доля подтвержденных изменений, %	Доля пропущенных изменений, %
<i>январь</i>	0.91	97.14	13.19
<i>февраль</i>	0.95	95.33	4.92
<i>март</i>	0.90	93.92	11.88
<i>апрель</i>	0.86	92.51	18.84
<i>май</i>	0.83	95.92	22.91
<i>июнь</i>	0.79	98.55	33.01
<i>июль</i>	0.59	99.70	56.34
<i>август</i>	0.77	99.47	34.31
<i>сентябрь</i>	0.60	81.93	45.87
<i>октябрь</i>	0.74	89.90	34.91
<i>ноябрь</i>	0.95	91.97	1.52
<i>декабрь</i>	0.94	91.12	1.78

Значения коэффициента каппа Коэна в таблице 3.3.2 показывают, что наиболее сильные различия между эталонной картой изменений и масками детектируемых рубок соответствуют летнему и осеннему периодам. Точность выявления изменений по данным летнего периода согласно результатам эксперимента наиболее высокая, но при этом возможны пропуски до 35-55% площади изменений. В зимний период пропуск изменений минимален при достаточно высокой (90-95%) вероятности их правильного детектирования, что подтверждает предположение, что зимний период наиболее благоприятен для детектирования вырубок предложенным методом.

В третьем проведенном эксперименте анализировалась возможность использования методов топографической нормализации для снижения влияния рельефа на результат детектирования рубок леса, которое особенно сильно проявляется в данных зимнего периода съёмки из-за низкой высоты Солнца. Хотя искажения, вносимые рельефом местности, частично компенсируются выбором близких дат разновременной спутниковой съёмки, данный фактор оказывает значительное влияние и часто приводит к ложному выявлению изменений лесов. Эксперимент был проведен на небольшом тестовом участке в Приморском крае с выраженным рельефом местности и активной лесозаготовкой, на котором были выявлены рубки леса в течение 2017-2018 годов по разносезонным данным Landsat 8 OLI и Sentinel-2 MSI с использованием и без топографической коррекции. В рамках эксперимента были протестированы следующие модели топографической коррекции: C-factor, Cosine, Percent и Minnaert [100]. На основании сравнения выявленных изменений лесов и эталонных контуров рубок оценивались доли площади их пространственного совпадения и рассогласования.

Эксперимент показал, что использование методов C-factor, Minnaert и Percent улучшают результаты детектирования изменений на тестовом участке. Методы C-factor и Percent повышают точность детектирования на 11%, при этом понижая полноту детектирования до 4% по сравнению с использованием некорректированных данных. Метод Minnaert увеличивает полноту детектирования на 2.5% при практически не меняющейся точности детектирования (таблица 3.3.3).

Таблица 3.3.3 – Влияние топографической коррекции спутниковых данных на точность и полноту детектирования рубок леса

Метод топографической коррекции	% подтвержденных изменений	% пропущенных изменений	Каппа Коэна
<i>Без коррекции</i>	65.86	22.77	0.70
<i>C-factor</i>	76.91	24.33	0.75
<i>Cosine</i>	80.55	53.14	0.54
<i>Minnaert</i>	65.76	18.32	0.72

Согласно данным эксперимента экспозиция склона существенно влияет на долю пропущенных изменений, а именно для рубок на юго-восточных склонах (экспозиция 60-240°) доля пропущенных изменений составляет 20-30%, в то время как для северо-западных склонов (240-60°) достигает 50% (рисунок 3.3.1). Предложенный метод детектирования рубок демонстрирует высокую долю выявляемых изменений (75-90%) в горных районах вне зависимости от экспозиции склона. Топографическая коррекция методом Cosine ухудшает долю подтвержденных изменений на 5-20% вне зависимости от экспозиции склона. Применение всех рассматриваемых методов топографической коррекции уменьшает долю пропущенных изменений на юго-восточных склонах, и увеличивают ее на северо-западных склонах.

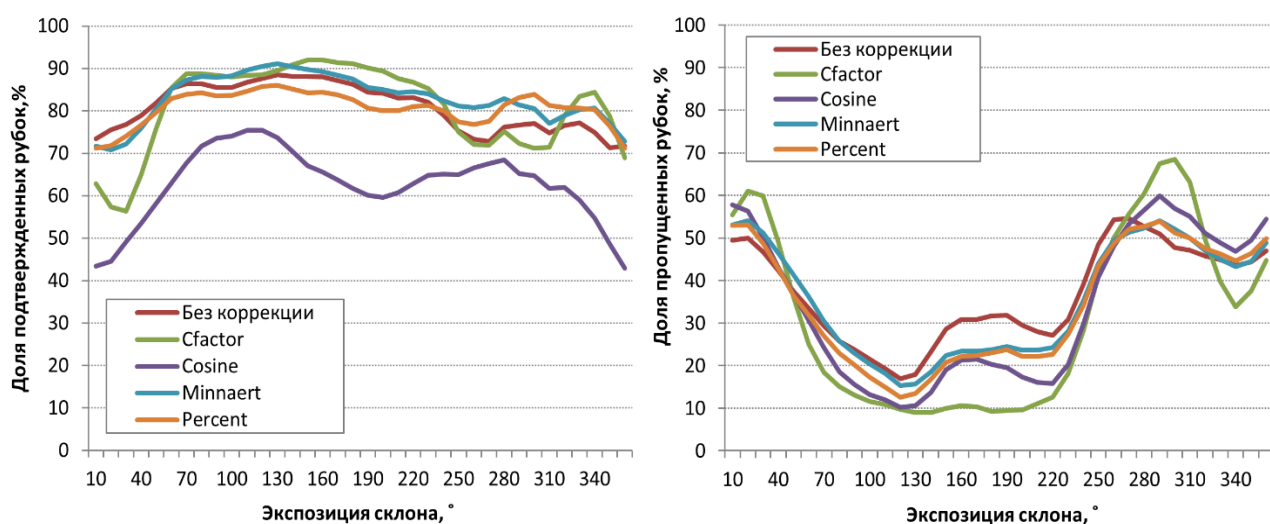


Рисунок 3.3.1 – Зависимость точности и полноты детектирования рубок леса от экспозиции склона на тестовом участке в Приморском крае

В рамках четвертого проведенного эксперимента оценивалась точность детектирования рубок леса рассматриваемым алгоритмом в зависимости от способа рубки. Согласно лесоводческой классификации по способу рубки все вырубki леса делятся на сплошные и выборочные. При сплошной рубке древостой на лесосеке вырубается в один приём с сохранением для воспроизводства лесов отдельных деревьев и кустарников. Данный вид рубки приводит к смене типа покрова, а, следовательно, значительным изменениям спектрально-отражательных

характеристик поверхности. Часто рубки имеют характерную прямоугольную форму и достаточно существенные размеры (10-50 га), поэтому легко визуальнo интерпретируются по спутниковым данным Landsat 8 OLI или Sentinel-2 MSI [1]. Некоторые сплошные рубки связаны с прокладкой дорог, трубопроводных трасс, линий электропередач, просек и имеют хорошо распознаваемую линейную форму на спутниковых изображениях. При выборочной рубке из насаждения изымают часть деревьев или кустарников определённого возраста, размеров, качества или состояния. В случае выборочной рубки значения коэффициентов отражения земной поверхности могут меняться слабо, и величина изменения зависит от доли вырубленных деревьев в пологе леса. Выборочные рубки часто не так явно выявляются по спутниковым данным, как сплошные, и не имеют столь четких границ на изображении.

Алгоритм выявления изменений был протестирован на двух тестовых участках. Один из них находится в северо-западной части Приморского края и покрывает территорию двух лесничеств, Дальнереченского и Рошинского. Площадь тестового участка составляет 25950 кв. км, средняя лесистость – 78.7%. Второй тестовый участок находится на востоке Русской равнины, в европейском Приуралье, и покрывает территорию Республики Удмуртия. Площадь тестового участка составляет 42112 кв. км, средняя лесистость – 46.2 %. На обоих тестовых участках доминируют смешанные леса с преобладанием хвойных пород. Согласно данным лесохозяйственных регламентов, на территории первого тестового участка доминирует выборочный способ рубки (более 85%), в то время как на территории второго преобладают сплошные рубки.

Для детектирования изменений в лесах преимущественно использовались данные Landsat 8 OLI 2015–2017 годов, полученные в период с декабря по конец февраля с наличием снежного покрова на земной поверхности. Временной интервал между парой выбранных сцен составлял примерно один год. На тестовых участках с помощью интерактивной обработки в картографическом интерфейсе информационной системы ВЕГА-Приморье были выявлены участки вырубок 2016 года. Для повышения точности датировки и достоверности детектирования

изменений лесов территория тестового участка в Приморском крае была охвачена не менее трех раз разными парами спутниковых данных из используемого набора, в то время тестовый участок в Республики Удмуртия – один-два раза. Все изменения, построенные в рамках данного исследования, имели временной интервал возникновения внутри временного отрезка декабрь 2015 по февраль 2017 года. Для построения карты изменений за 2016 год из базы данных выбирались только те рубки, большая часть временного интервала возникновения которых лежала в 2016 году. Поэтому помимо рубок, произошедших в 2016 году, данная карта может содержать и рубки, случившиеся в декабре 2015 года и в январе и феврале 2017 года. На основе обработанных спутниковых данных были построены карты рубок леса за 2016 год на территории тестовых участков. Пример результатов выявления изменений лесов представлен на рисунке 3.3.2.

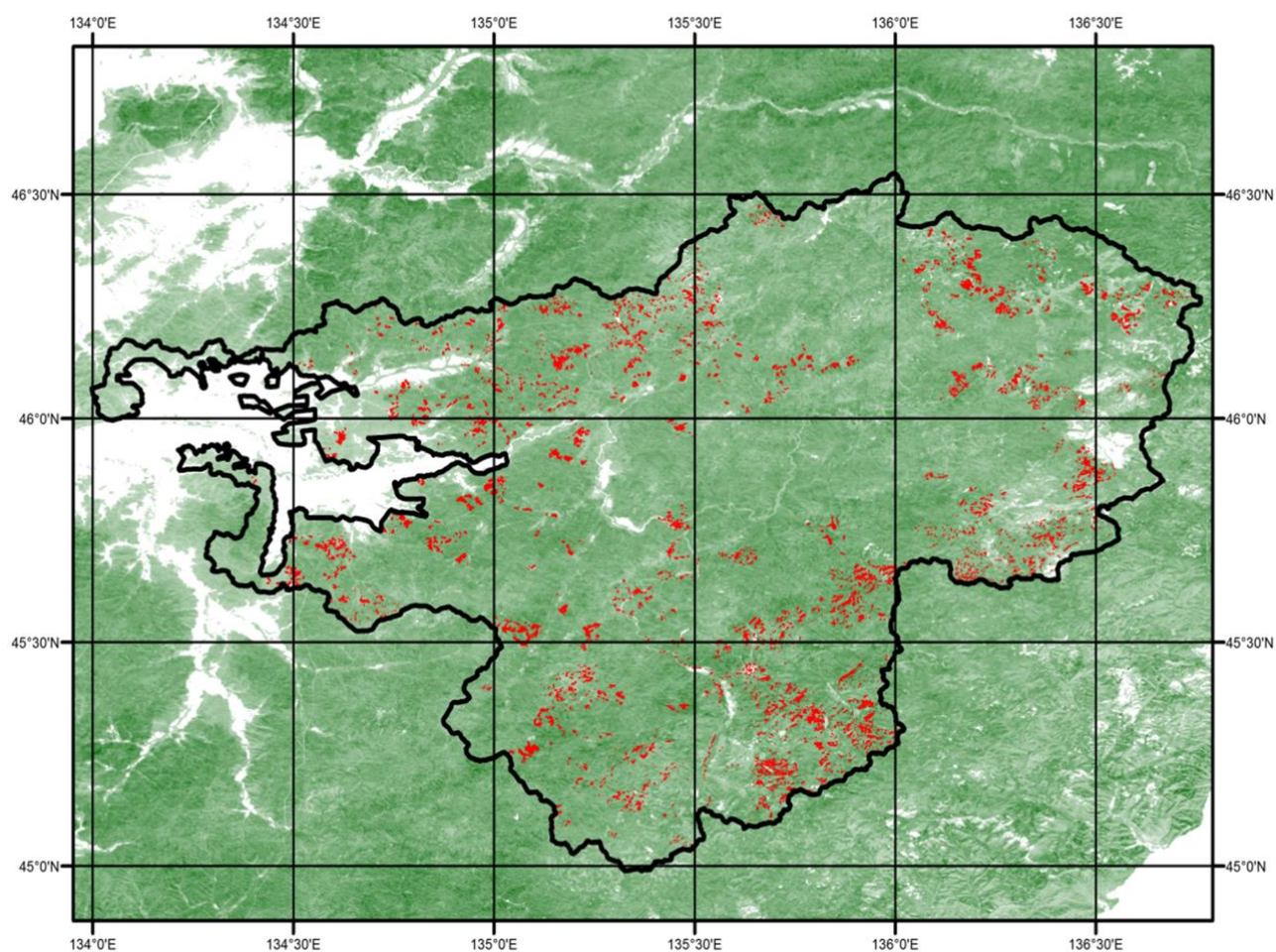


Рисунок 3.3.2 – Пример изменений лесов 2016 года, выявленных на территории Рощинского лесничества Приморского края

Общая площадь выявленных рубок леса в 2016 году на территории Республики Удмуртия составила 10761.6 га. На территории тестового участка в Приморском крае были детектированы изменения на площади 20061.9 га. Полученные данные о выявленных изменениях были соотнесены с данными официальной статистики о площади рубок и представлены в таблице 3.3.4.

*Таблица 3.3.4 – Сравнение площади выявленных рубок с данными официальной статистики и данными Global Forest Change (GFC)**

Сравниваемая характеристика		Регион тестового участка	
		<i>Приморский край</i>	<i>Республика Удмуртия</i>
Площадь рубок в 2016 году на основе разработанного метода		20061.89 га	10761.6 га
Площадь рубок в 2016 году по официальным данным		29523.00 га	9423.00 га
Площадь рубок по данным GFC	2015	3535.21 га	6323.9 га
	2016	4910.91 га	9244.88 га
	2017	5528.89 га	9807.07 га
Площадь рубок, согласованно выявленных на основе разработанного метода и по данным GFC	2015	94.57 га	216.58 га
	2016	1539 га	3862.27га
	2017	1527 га	4013.16 га
% площади рубок согласованно выявленных на основе разработанного метода и по данным GFC		15.76%	75.2%

* Global Forest Change (GFC) - ежегодные данные об изменениях лесного покрова планеты на основе спутниковых данных системы Landsat, предоставляемые Географическим факультетом университета Мэрилэнд(США)

На тестовом участке в Республике Удмуртия с доминированием сплошных рубок, отношение площади детектированных изменений в лесу, связанных с рубками, к общей вырубленной площади по официальным данным составляет 114.2%. Для тестового участка в Приморском крае с долей выборочных рубок более 85%, аналогичный показатель равен 67.95%. В предположении, что алгоритм детектирует все сплошные рубки, доля площади детектируемых выборочных рубок на тестовом участке в Приморском крае предположительно может достигать 54%.

Построенные карты изменений лесов за 2016 год были сопоставлены с данными GFC (Global Forest Change), получаемыми лабораторией географического

факультета Университета Мэриленд (США) и отражающими межгодовые изменения лесного покрова планеты на основе данных Landsat 8 OLI с пространственным разрешением 30 м (Hansen, 2013). Результаты сравнения также приведены в таблице 3.4. Согласно опубликованным данным общая точность продукта GFC для бореальных лесов составляет 83% [78]. Для тестового участка в Республике Удмуртия площадь изменений в 2016 году по данным GFC совпадает с площадью рубок по официальным данным на 98%. На тестовом участке в Приморском крае отношение площади изменений по данным GFC к площади рубок по официальным данным составляет 16.63%, что может свидетельствовать об весьма ограниченной обнаружительной способности используемого при построении соответствующего информационного продукта метода применительно к выборочным рубкам.

При сравнении построенной карты изменений за 2016 год с данными GFC был использован трехлетний период с 2015 по 2017 года для снижения влияния фактора точности датировки выявляемых изменений [69]. Однако, несмотря на расширение границ временного периода сравнения, на тестовом участке в Приморском крае имеет место низкое пространственное совпадение двух информационных продуктов, что также подтверждается таблицей 3.3.4. Так только 15.76% площади вырубленных участков леса в Приморском крае по данным GFC согласуются с данными, полученными с помощью разработанного метода. Из таблицы 3.4 видно, что на тестовом участке в Республике Удмуртии 75.2% площади выявленных изменений в лесах согласуются с данными GFC. При этом большая часть площади из 24.8% несогласованных в обоих сравниваемых наборах данных участков изменений лесов объясняется различиями в детектировании их контуров.

В последнем проведенном эксперименте исследовалось влияние пространственного разрешения спутниковых изображений на площадь и вероятность выявления выборочных рубок. Реализованный алгоритм детектирования изменений позволяет использовать как данные Landsat-8 с пространственным 30 м, так и данные Sentinel-2A MSI с разрешением 10 м. Были подобраны сцены Landsat 8 OLI и Sentinel-2A MSI за одинаковые даты и проведено

сравнение выявленных по ним контуров рубок. На основании эксперимента можно утверждать, что, хотя при повышении пространственного разрешения спутниковых изображений с 30 до 10 метров площадь детектируемых изменений в лесах увеличивается незначительно (менее, чем на 1%), контуры выявленных участков сильно меняются. При этом, пространственное совпадение, выявленных по данным Landsat 8 OLI и Sentinel-2A MSI, участков изменений лесов составило лишь около 60%. Остальные 40% площади выявленных по данным Sentinel-2A MSI изменений лесов приходятся на участки, не детектированные по данным Landsat 8 OLI. Количество выявленных связных контуров по данным Sentinel-2A MSI возрастает более чем в 7 раз по сравнению с результатами, полученными по данным Landsat 8 OLI. Таким образом, переход к более детальному пространственному разрешению спутниковых данных способен существенно повысить уровень детальности детектируемых участков выборочных рубок.

Выводы к третьей главе

- Анализ существующего опыта и методов детектирования изменений по спутниковым данным создал предпосылки для решения задачи детектирования рубок с использованием разновременных данных спутниковых наблюдений
- Разработан метод оценки изменений в лесах на основе сравнения оценок показателей горизонтальной структуры лесов, чувствительный к переходным изменениям и позволяющий детектировать как сплошные, так и большую часть выборочных рубок
- Предложенный метод реализован в виде отдельного инструмента, позволяющего осуществлять обработку временных серий спутниковых данных и хранить результаты проведенной обработки
- Проведенные эксперименты по тестированию инструмента позволили оптимально настроить параметры алгоритма и оценить точность детектирования изменений предложенным методом для разных типов рубки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертационная работа содержит полученные автором новые результаты исследований и разработок в области методов обработки спутниковых данных ДЗЗ для оценки показателей горизонтальной структуры лесов. Зависимость коэффициентов спектральной яркости лесов с наличием снежного покрова на земной поверхности от характеристик их горизонтальной структуры легла в основу разработки метода локализованного статистического моделирования связи между характеристиками. В диссертационной работе показана формализованная взаимосвязь основных широко используемых на практике показателей горизонтальной структуры лесов, таких как проективное покрытие древесного полога леса, лесистость и сомкнутость крон. На основе уравнения связи между указанными показателями горизонтальной структуры лесов разработана локальная параметризованная модель оценки лесистости территории и сомкнутости крон. Результатом применения разработанных методов для обработки спутниковых данных ДЗЗ стали временные ряды пространственно-распределенных оценок проективного покрытия древесного полога леса, лесистости и сомкнутости крон. Зависимость коэффициентов спектральной яркости покрытой снегом земной поверхности от горизонтальной структуры лесов также позволила создать автоматизированный метод дистанционного детектирования изменений в лесах, связанных со снижением значений проективного покрытия древесного полога. Проведенная практическая апробация предложенного метода продемонстрировала достаточно высокую его эффективность при детектировании выборочных рубок.

Выполненные в рамках диссертационной работы исследования позволили получить следующие результаты:

1. Разработаны автоматизированные методы оценки показателей горизонтальной структуры лесов, а именно проективного покрытия древесного полога леса, лесистости территории и сомкнутости крон по спутниковым данным с наличием снежного покрова на земной поверхности;

2. На основе разработанных методов и данных ДЗЗ созданы временные ряды данных о многолетней динамике показателей горизонтальной структуры лесов на территории России, необходимые для решения научных и прикладных задач по оценке состояния и динамики лесного покрова;
3. Разработан автоматизированный метод детектирования изменений в лесах, связанных с уменьшением значения проективного покрытия древесного полога леса и позволяющий детектировать, в том числе, выборочные рубки леса на основе разновременных измерений по данным оптических систем ДЗЗ.

Полученные автором результаты диссертационной работы нашли применение при выполнении научных проектов, направленных на разработку системы оценки ресурсно-экологического потенциала лесов, мониторинга бюджета углерода лесов России, технологии прогнозирования восстановления лесной растительности после рубок и пожаров. Перспективы дальнейшего применения результатов диссертации связаны с работами в следующих направлениях:

- Разработка метода оценки относительной полноты лесов на основе полученных оценок показателей горизонтальной структуры лесов и данных Государственного лесного реестра;
- Применение методов оценки показателей горизонтальной структуры лесов к спутниковым данным более высокого пространственного разрешения для получения более детальных оценок распределения и характеристик лесного покрова на основе разработанных подходов.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

Сокращения на русском языке

ВИ	—	Вегетационный индекс
ДЗЗ	—	Дистанционное зондирование Земли
ИК	—	Инфракрасный
ИКИ	—	Институт космических исследований
КСЯ	—	Коэффициент спектральной яркости
РАН	—	Российская академия наук
РФ	—	Российская федерация
ФАО	—	Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций

Сокращения на иностранных языках

ASTER	—	Advanced Spaceborne Thermal Emission and reflection Radiometer Усовершенствованный космический радиометр термальной эмиссии и отражения
AVHRR	—	Advanced Very High Resolution Radiometer Усовершенствованный радиометр очень высокого разрешения
CVA	—	Change Vector Analysis Метод анализ направления вектора изменений
ETM	—	Enhanced Thematic Mapper Усовершенствованный тематический картограф
FRA	—	Forest Resources Assessment Оценка лесных ресурсов
GFC	—	Global Forest Change Изменения лесов в глобальном масштабе

GLC	—	Global Land Cover Типы земного покрова в глобальном масштабе
GLCC	—	Global Land Cover Classification Глобальная классификация типов земного покрова
HRV	—	High Resolution Visible Инструмент высокого разрешения видимого диапазона
HRVIR	—	High Resolution Visible and Infra-Red Инструмент высокого разрешения видимого и инфракрасного диапазонов
LAGMA	—	Locally-Adaptive Global Mapping Algorithm Локально-адаптивный алгоритм глобального картографирования
LAI	—	Leaf Area Index Индекс листовой поверхности
Landsat	—	Land Remote-Sensing Satellite Спутник дистанционного зондирования Земли
LandTrendr	—	Landsat-based detection of trends in disturbance and recovery Обнаружение трендов нарушения и восстановления по данным Landsat
MERIS	—	Medium Resolution Imaging Spectrometer Спектрорадиометр среднего разрешения
MODIS	—	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Спектрорадиометр среднего разрешения
MSS	—	Multi-Spectral Scanner Многоспектральный сканер
NBR	—	Normalized Burn Ratio Индекс пирогенного повреждения растительности
NDSI	—	Normalized Difference Snow Index Нормализованный разностный индекс снега
NDVI	—	Normalized Difference Vegetation Index

		Нормализованный разностный вегетационный индекс
NIR	—	Near-infrared Ближний инфракрасный спектральный диапазон
NOAA	—	National Oceanic and Atmospheric Administration Национальное агентство по океану и атмосфере
OLI	—	Operational Land Imager Прибор для мониторинга земной поверхности
PALSAR	—	Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar Радар с синтезированной апертурой L-диапазона с фазированной антенной решеткой
Pan	—	Panchromatic Панхроматический
PROBA-V	—	Project for On-Board Autonomy – Vegetation Проект бортовой автономности для прибора Vegetation Суоми
SPOT	—	Satellite Pour l’Observation de la Terre Спутник для наблюдения Земли
SWVI	—	ShortWave Vegetation Index Коротковолновый вегетационный индекс
TCW	—	Tasseled Cap Wetness Компонента влажности преобразования Tasseled Cap
TIRS	—	Thermal InfraRed Sensor Тепловой инфракрасный сенсор
TM	—	Thematic Mapper Тематический картограф
VCF	—	Vegetation Continuous Fields Проективное покрытие растительности
VIS	—	Visible Spectrum Видимый спектральный диапазон

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**Список литературы на русском языке**

1. Барталев С.А., Курятникова Т.С., Стибиг Х.Ю. Методы использования временных серий спутниковых изображений высокого пространственного разрешения для оценки масштабов и динамики вырубок таежных лесов // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2005. Выпуск 2. Т. 2. С. 217–227.
2. Барталев С.А., Ховратович Т.С., Елсаков В.В. Использование спутниковых изображений для оценки потерь углерода лесными экосистемами в результате вырубок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2009. Выпуск 6. Т. 2. С. 343–351.
3. Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
4. Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Егоров В.А., Лупян Е.А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83-94.
5. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
6. Богданов А.П., Алешко Р.А., Ильинцев А.С. Выявление взаимосвязи диаметра крон деревьев с различными таксационными показателями в северо-таежном лесном районе. // Вопросы лесной науки. 2019. Т. 2. №4
7. Василевич В.И. Очерки теоретической фитоценологии. Л.: Наука, 1983.
8. Гаврилюк Е.А., Ершов Д.В. Тематическое картографирование породной структуры лесов на основе спутниковых изображений Landsat-TM/ETM+ // Пятая Всероссийская конференция с международным участием «Аэрокосмические

- методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве». Москва, ЦЭПЛ РАН, 22–24 апреля 2013. Сборник трудов конференции. С. 112–115.
9. Дейвис Ш.М., Ландгребе Д.А., Филлипс Т.Л., Свейн Ф.Х., Хоффер Р.М., Ланденлауб Д.С., Сиева Ле Р.Ф. Дистанционное зондирование: количественный подход: Пер. с англ. М.: Недра, 1983. 415 с.
 10. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.:Издательский дом «Вильямс», 2007. 912 с.
 11. Дылис Н.В., Сукачев В.Н. Основы лесной биогеоценологии. М.: Наука, 1964. С. 103–106
 12. Егоров В.А., Барталев С.А., Колбудаев П.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А. Карта растительного покрова России, полученная по данным спутниковой системы Proba-V // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 282–286.
 13. Ершов Д.В. Методика оценки покрытой лесом площади по спутниковым изображениям спектрорадиометра MODIS среднего пространственного разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. В.4. Т.2. С. 217–225.
 14. Жарко В.О., Барталев С.А. Оценка распознаваемости древесных пород леса на основе спутниковых данных о сезонных изменениях их спектрально-отражательных характеристик // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 159–170.
 15. Жарко В.О. Методы обработки данных спутниковых измерений спектрально-временных характеристик отраженного излучения для дистанционной оценки параметров лесного покрова: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.01 / Жарко Василий Олегович. – М., 2015. 130 с.
 16. Исаев А.С., Барталев С.А., Лупян Е.А., Лукина Н.В. Спутниковое зондирование Земли - уникальный инструмент мониторинга лесов России // Вестник РАН. 2014. Т. 84. № 12. С. 1073–1079.

17. Кашницкий А.В., Ховратович Т.С., Балашов И.В. Организация обработки данных ДЗЗ при решении задачи детектирования изменений лесного покрова на больших территориях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 103–111.
18. Корчагин А.А. Строение растительных сообществ // Полевая геоботаника. Т.V. Л.: Наука, 1976. С. 7–131
19. Кузьмичев В.В. Закономерности роста древостоев. Новосибирск: Наука, 1977. 160 с.
20. Лесная энциклопедия: В 2-х т./Гл.ред. Воробьев Г.И.; Ред. кол.: Анучин Н.А., Атрохин В.Г., Виноградов В.Н. и др. М.: Сов. энциклопедия, 1985. 563 с.
21. Луганский Н.А., Залесов С.В., Луганский В.Н. Лесоведение: учебн. пособие Урал. гос. лесотехн. ун-т. Екатеринбург, 2010. 432 с.
22. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
23. Лупян Е.А., Барталев С.А., Балашов И.В., Барталев С.С., Бурцев М.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Жарко В.О., Кашницкий А.В., Колбудаев П.А., Крамарева Л.С., Мазуров А.А., Оксюкевич А.Ю., Плотников Д.Е., Прошин А.А., Сенько К.С., Уваров И.А., Хвостиков С.А., Ховратович Т.С. Информационная система комплексного дистанционного мониторинга лесов "Вега-Приморье" // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 11–28.
24. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг»)

- // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С.151–170.
25. Мелихов И.С. Лесоведение. – М.: Лесная промышленность, 1980. 408 с.
 26. Миклашевич Т.С., Барталев С.А., Плотников Д.Е. Интерполяционный алгоритм восстановления длинных временных рядов данных спутниковых наблюдений растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 143–154.
 27. Поздеев Д.А., Петров. А.А. Таксация леса. Курс лекций: учеб. пособие / Ижевск: ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2012. 161 с.
 28. Рыльский И.А. Подходы к определению таксационных показателей леса с использованием аэрокосмических показателей леса с использованием аэрокосмических снимков и лазерного сканирования // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС». 2018. Т.24 №2. С.216–240.
 29. Саймолович Г.Г. Применение аэрофотосъёмки и авиации в лесном хозяйстве. Л.:1972. 64 с.
 30. Соколова Е.Н., Ершов Д.В. Методы определения значений таксационных показателей лесных насаждений на основе комплексной обработки спутниковых данных и наземных наблюдений // Доклады V всероссийской конференции «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве». М.: ЦЭПЛ РАН, 2013 г. С.207–211
 31. Сухих В.И., Гусев Н.Н., Данюлис Е.П. Аэрометоды в лесоустройстве. М.: Лесная промышленность, 1977. 186 с.
 32. Тимофеев В.П. Экспериментальное изучение естественного изреживания и продуктивности древостоев в зависимости от густоты посадки и ярусности лесных насаждений // Матер. по изучению лесов Сибири и Дальнего Востока. Красноярск, 1963. С. 25–42.
 33. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Нильссон С., Булуй Ю.И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород северной Евразии (нормативно-справочные материалы). Федеральное

агентство лесного хозяйства. Международный институт прикладного системного анализа. 2008. 886 с.

34. Ховратович Т.С., Барталев С.А., Кашницкий А.В. Метод детектирования изменений лесов на основе подпиксельной оценки проективного покрытия древесного полога по разновременным спутниковым изображениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С.102–110.
35. Ховратович Т.С., Иванова А.А., Барталев С.А. Анализ результатов применения алгоритма детектирования рубок леса по спутниковым данным дистанционного зондирования // "Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли - RORSE 2018". ИКИ РАН, 2019. С. 108–115.

Список литературы на английском языке

36. Adams J., Sabol D., Kapos V., Filho R., Roberts D., Milton O., Alan R. Gillespie Classification of Multispectral Images Based on Fractions of Endmembers: Application to Land-Cover Change in the Brazilian Amazon // Remote Sensing of Environment. 1995. Vol. 52. pp. 137–154.
37. Asner G. Biophysical and Biochemical Sources of Variability in Canopy Reflectance. // Remote Sensing of Environment. 1998. Vol. 64. № 3. pp. 234–253.
38. Bacour C., Baret F., Béal D., Weiss M., Pavageau K. Neural network estimation of LAI, fAPAR, fCover and LAI×Cab, from top of canopy MERIS reflectance data: Principles and validation // Remote Sensing of Environment. 2006. Vol. 105. № 4. pp. 313–325.
39. Ban Y., Yousif O. Change Detection Techniques: A Review // Remote Sensing and Digital Image Processing. Springer. 2016. pp.19–43.
40. Bannari A., Morin D., Bonn F., Huete A. A review of vegetation indices // Remote Sensing Reviews. 1995. Vol. 13. № 1. pp. 95–120.

41. Baret F., Hagolle O., Geiger B., Bicheron P., Miras B., Huc I., Berthelot B., Niño F., Weiss M., Samain O., Roujean, J.-L., Leroy M. LAI, fAPAR and fCover CYCLOPES global products derived from VEGETATION: Part 1: Principles of the algorithm // *Remote Sensing of Environment*. 2007. pp. 275–286.
42. Baret, F., Weiss, M., Lacaze, R., Camacho, F., Makhmara, H., Pacholczyk, P., & Smets, B. GEOV1: LAI and FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part1: Principles of development and production // *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 137 pp. 299–309.
43. Bartalev S., Belward A., Ershov D., Isaev A. A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia // *International Journal of Remote Sensing*. 2003. Vol. 24. pp. 1977–1982.
44. Bartalev S., Egorov V., Loupian E., Khvostikov S. A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data // *Remote Sensing Letters*. 2014. Vol. 5. Iss. 1. pp. 55–64.
45. Bartholomé E., Belward A. GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data // *International Journal of Remote Sensing*. 2005. Vol. 26. № 9. pp. 1959–1977.
46. Boyd D., Foody G., Ripple W. Evaluation of approaches for forest cover estimation in the Pacific Northwest, USA, using remote sensing // *Applied Geography*. 2002. Vol. 22. № 4. pp. 375–392.
47. Carlson T., Ripley D. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index // *Remote Sensing of Environment*. 1997. Vol. 62. №3. pp. 241–252.
48. Carroll M., Townshend J., Hansen M., DiMiceli C., Sohlberg R., Wurster K. MODIS Vegetative Cover Conversion and Vegetation Continuous Fields // *Land Remote Sensing and Global Environmental Change, Remote Sensing and Digital Image Processing*. 2011. Vol. 11. pp. 725–745.
49. Choudhury B., Ahmed N., Idso S., Reginato R., Daughtry C. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations // *Remote Sensing of Environment*, 1994. Vol. 50. № 1. pp. 1–17.

50. Cohen, W., Spies, T. Estimating structural attributes of Douglas-fir/western hemlock forest stands from Landsat and SPOT imagery // *Remote Sensing of Environment*. 1992. Vol. 41. № 1. pp. 1–17.
51. Collins, J., Woodcock C. An Assessment of Several Linear Change Detection Techniques for Mapping Forest Mortality Using Multitemporal Landsat TM Data // *Remote Sensing of Environment*. 1996. Vol. 56. pp. 66–77.
52. Coppin P., Nackaerts K, Queen LL, Brewer K Operational Monitoring of Green Biomass Change for Forest Management // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2001. Vol. 67. № 5. pp. 603–611.
53. Coppin P. Jonckheere I., Nackaerts K., Muys B., Lambin E. Digital Change Detection Methods in Ecosystem Monitoring: A Review. // *International Journal of Remote Sensing*. 2004. Vol. 25. pp. 1565–1596.
54. DeFries R., Townshend J., Hansen M. Continuous fields of vegetation characteristics at the global scale at 1-km resolution // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1999. Vol. 104. № 14. pp. 16911–16923.
55. Elmore A., Mustard J., Manning S., Lobell D. Quantifying Vegetation Change in Semiarid Environments: Precision and Accuracy of Spectral Mixture Analysis and the Normalized Difference Vegetation Index // *Remote Sensing of Environment*. 2000. Vol. 73. Issue 1. pp. 87–102.
56. Friedl M., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets // *Remote Sensing of Environment*. 2010. Vol. 114. № 1. pp. 168–182.
57. García-Haro F., Camacho F., Martínez B., Campos-Taberner M., Fuster B., Sánchez-Zapero J., Gilabert M. Climate Data Records of Vegetation Variables from Geostationary SEVIRI/MSG Data: Products, Algorithms and Applications // *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 11. p. 2103.
58. Glenn E., Huete A., Nagler P., Nelson S. Relationship Between Remotely-sensed Vegetation Indices, Canopy Attributes and Plant Physiological Processes: What

- Vegetation Indices Can and Cannot Tell Us About the Landscape // *Sensors*, 2008. Vol. 8. № 4. pp. 2136–2160.
59. Global forest resources assessment 2015. How are the world's forests changing? (FRA 2015) Second edition. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. 2016. p. 245.
 60. Gong P., Wang J., Yu L., Zhao Y., Zhao Y., Liang L., Chen, J. Finer resolution observation and monitoring of global land cover: first mapping results with Landsat TM and ETM+ data // *International Journal of Remote Sensing*. 2013. Vol. 34. № 7. pp. 2607–2654.
 61. Guan K., Wood E., Caylor K. Multi-sensor derivation of regional vegetation fractional cover in Africa // *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 124. pp. 653–665.
 62. Gutman G., Ignatov, A. The Derivation of the Green Vegetation Fraction from NOAA/AVHRR Data for Use in Numerical Weather Prediction Models // *International Journal of Remote Sensing*. 1998. Vol. 19 № 8. pp. 1533–1543.
 63. Hall R., Skakun R., Arsenault E., Case B. Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume // *Forest ecology and management*. 2006. Vol. 225. № 1. pp. 378–390.
 64. Häme T., Heiler I., Miguel-Ayanz, J. An unsupervised change detection and recognition system for forestry // *International Journal of Remote Sensing*. 1998. Vol. 19 № 6. pp.1079–1099.
 65. Hansen M., Defries R., Townshend J., Sohlberg R. Global land cover classification at 1km spatial resolution using a classification tree approach // *International Journal of Remote Sensing*. 2000. Vol. 21. pp. 1331–1364.
 66. Hansen M., DeFries R., Townshend J., Sohlberg R., celi C., Carroll M. Towards an operational MODIS continuous field of percent tree cover algorithm: examples using AVHRR and MODIS data // *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 83. № 1-2. pp. 303–319.
 67. Hansen M., DeFries R, Townshend J., Carroll M., Dimiceli C., Sohlberg R. Global percent tree cover at a spatial resolution of 500 meters: first results of the MODIS

- vegetation continuous fields algorithm // *Earth Interact.* 2003. Vol. 7. № 10. pp. 1–15.
68. Hansen M., Loveland T. A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data // *Remote Sensing of Environment.* 2012. Vol. 122. pp. 66–74.
69. Hansen M., Potapov P., Moore R., Hancher M., Turubanova S., Tyukavina A., Thau D., Stehman S., Goetz S., Loveland T., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C., Townshend J. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change // *Science.* 2013. Vol. 342. pp. 850–853.
70. Hansen M., Egorov A., Potapov P., Stehman S., Tyukavina A., Turubanova S., Roy D., Goetz S., Loveland T., Ju J., Kommareddy A., Forsythe C., Bents T. Monitoring conterminous United States (CONUS) land cover change with Web-Enabled Landsat Data (WELD) // *Remote Sensing of Environment.* 2014. Vol. 140. pp. 466–484.
71. Hansen M., Krylov A., Tyukavina A., Potapov P., Turubanova S., Zutta B., Suspense I., Margono B., Stolle F., Moore R. Humid tropical forest disturbance alerts using Landsat data // *Environmental Research Letters.* 2016. Vol. 11. № 3. p. 034008.
72. Heiskanen J. Evaluation of Global Land Cover data sets of the tundra-taiga transition zone in northernmost Finland // *International Journal of Remote Sensing,* 2008. Vol. 29. Iss. 13. pp. 3727–3751.
73. Hilker T., Wulder M., Coops N., Linke J., McDermid G., Masek J., Gao F., White J. A new data fusion model for high spatial- and temporal-resolution mapping of forest disturbance based on Landsat and MODIS // *Remote Sensing of Environment.* 2009. Vol. 113. pp. 1613–1627.
74. Huang C., Townshend J. A Stepwise Regression Tree for Nonlinear Approximation: Applications to Estimating Subpixel Land Cover // *International Journal of Remote Sensing.* 2003. Vol. 24. pp. 75–90.
75. Hurcom, S., Harrison A. The NDVI and spectral decomposition for semi-arid vegetation abundance estimation // *International Journal of Remote Sensing.* 1998. Vol. 19. № 16. pp. 3109–3125.
76. Jia K., Liang S., Liu S., Li Y., Xiao Z., Yao Y., Cui, J. Global Land Surface Fractional Vegetation Cover Estimation Using General Regression Neural Networks

- From MODIS Surface Reflectance // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2015. Vol. 53. № 9. pp. 4787–4796.
77. Kennedy R., Cohen W., Schroeder T. Trajectory-based change detection for automated characterization of forest disturbance dynamics // Remote Sensing of Environment. 2007. Vol. 110. pp. 370–386.
 78. Kim D., Sexton J., Noojipady P., Huang C., Anand A., Channan S., Feng M., Townshend J. Global Landsat-based forest-cover change from 1990 to 2000 // Remote Sensing of Environment. 2014. Vol. 155. pp. 178–193.
 79. Kriegler F., Malila W., Nalepka R., Richardson W. Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition // Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment. 1969. pp. 97–131.
 80. Lacaze R., Richaume P., Hautecoeur O., Lalanne T., Quesney A., Maignan F., Breon F. M. Advanced algorithms of the ADEOS-2/POLDER-2 land surface process line: application to the ADEOS-1/POLDER-1 data // 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toulouse. 2003. Vol. 5. pp. 3260–3262.
 81. Lee H. Mapping deforestation and age of evergreen trees by applying a binary coding method to time-series Landsat november images // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2008. Vol. 46. № 11. pp. 3926–3936.
 82. Leprieur C., Verstraete M., Pinty B. Evaluation of the performance of various vegetation indices to retrieve vegetation cover from AVHRR data // Remote Sensing Reviews. 1994. Vol. 10. № 4. pp. 265–284.
 83. Liang Sh., Li X., Wang J. Advanced Remote Sensing. Academic Press. 2012. p. 800.
 84. Loranty M., Davydov S., Kropp H., Alexander H., Mack M., Sue N., Zimov N. Vegetation indices do not capture forest cover variation in upland siberian larch forests // Remote Sensing. 2018. Vol. 10. p.1686.
 85. Loveland T., Reed B., Brown J., Ohlen D., Zhu Z., Yang L., Merchant J. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. // International Journal of Remote Sensing. 2000. Vol. 21. pp. 1303–1365.

86. Lu D., Mausel P., Brondizio E., Moran E. Classification of successional forest stages in the Brazilian Amazon basin // *Forest Ecology and Management*. 2003. Vol. 181 pp. 301–312.
87. Lu D., Mausel P., Brondizio E., Moran E. Change Detection Techniques // *International Journal of Remote Sensing*. 2004. Vol. 25. № 12. pp. 2365–2401.
88. Lu D., Batistella M., Moran E. Multitemporal spectral mixture analysis for Amazonian land-cover change detection // *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2004. Vol. 30. № 1. pp. 87–100.
89. Lu D. The potential and challenge of remote sensing based biomass estimation // *International Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 27. № 7. pp. 1297–1328.
90. Lu H. Decomposition of vegetation cover into woody and herbaceous components using AVHRR NDVI time series // *Remote Sensing of Environment*. 2003. Vol. 86. № 1. pp. 1–18.
91. Lund G. Change: now you see it - now you don't! // *Proc. Int. Conf. on Renewable Resource Inventories for Monitoring Changes and Trends*. Oregon State University. Corvallis. 1983. pp. 211–213.
92. Masek J., Hayes D., Hughes M., Healey S., Turner D. The role of remote sensing in process-scaling studies of managed forest ecosystems // *Forest Ecology and Management*. 2015. Vol. 355. pp. 109–123.
93. Milne A. Change direction analysis using Landsat imagery: a review of methodology // *Proceedings of IGARSS'88*. 1988. pp. 541–544.
94. Montesano P., Nelson R., Sun G., Margolis H., Kerber A., Ranson K. MODIS Tree Cover Validation for the circumpolar taiga - tundra transition zone // *Remote Sensing of Environment*. 2009. Vol. 113. № 10. pp. 2130–2141.
95. Mu X., Song W., Gao Z., McVicar T., Donohue R., Yan G. Fractional vegetation cover estimation by using multi-angle vegetation index. // *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 216. pp. 44–56.
96. Mu, X. H., Liu, Q. H., Ruan, G. Y. 1 km/ 5 day fractional vegetation cover product over China-ASEAN (2013) [DB]

97. Potapov P., Turubanova S., Hansen M.C. Regional-scale boreal forest cover and change mapping using Landsat data composites for European Russia // *Remote Sensing of Environment*. 2011. Vol. 115. pp. 548–561.
98. Potapov P.V., Turubanova S.A., Tyukavina A., Krylov A.M., McCarty J.L., Radeloff V.C., Hansen M.C. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive // *Remote Sensing of Environment*. 2015. Vol 159. pp. 28–43.
99. Powell S., Cohen W., Healey S., Kennedy R., Moisen G., Pierce K., Ohmann, J. Quantification of live aboveground forest biomass dynamics with Landsat time-series and field inventory data: A comparison of empirical modeling approaches // *Remote Sensing of Environment*. 2010. Vol. 114 № 5. pp. 1053–1068.
100. Riano D., Chuvieco E., Salas J., Aguado I. Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat-TM Data for Mapping Vegetation Types // *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*. 2003. Vol. 41. № 5. pp. 1056–1061.
101. Roujean, J.-L. Global mapping of vegetation parameters from POLDER multiangular measurements for studies of surface-atmosphere interactions: A pragmatic method and its validation // *Journal of Geophysical Research*. 2002. Vol. 107. № D12, pp ACL 6-1–ACL 6-14.
102. Sexton J., Song X., Feng M., Noojipady P., Anand A., Huang C., Townshend J. R. Global, 30-m resolution continuous fields of tree cover: Landsat-based rescaling of MODIS vegetation continuous fields with lidar-based estimates of error // *International Journal of Digital Earth*. 2013. Vol. 6. № 5. pp. 427–448.
103. Shimabukuro Y.E., Smith J.A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multi spectral data // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1991. Vol. 29. Issue 1. pp. 16–20.
104. Singh A. Digital change detection techniques using remotely-sensed data // *International Journal of Remote Sensing*. 1989. Vol.10. pp. 989–1003.
105. Song C., Woodcock C., Seto K., PaxLenney M., Macomber S. Using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? // *Remote Sensing of Environment*. 2001. Vol. 75. №2. pp. 230–244.

106. Song X., Huang C., Sexton J., Feng M., Narasimhan R., Channan S., Townshend J. An assessment of global forest cover maps using regional higher-resolution reference datasets // *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2011. pp. 752–755.
107. Van der Meer F. Image classification through spectral unmixing // *Remote Sensing and Digital Image Processing*. 1999. pp. 185–193.
108. Vogelmann J., Xian G., Homer C., Tolk B. Monitoring gradual ecosystem change using Landsat time series analyses: case studies in selected forest and rangeland ecosystems // *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 122. pp. 92–105.
109. Wang B., Jia K., Liang S., Xie X., Wei X., Zhao X., Yao Y., Zhang X. Assessment of Sentinel-2 MSI spectral band reflectances for estimating fractional vegetation cover // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10. № 12. p. 1927.
110. White J., Coops N., Wulder M., Vastaranta M., Hilker T., Tompalski, P. Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: a review. // *Canadian Journal of Remote Sensing*. 2016. Vol. 42. № 5. pp. 619–641.
111. Woodcock C., Macomber S, Pax-Lenney M., Cohen W. Monitoring large areas for forest change using Landsat: generalization across space, time and Landsat sensors // *Remote Sensing of Environment*. 2001. Vol. 78 № 1–2. pp. 194–203.
112. Wu D., Wu H., Zhao X., Zhou T., Tang B., Zhao W., Jia K. Evaluation of spatio-temporal variations of global fractional vegetation cover based on GIMMS NDVI data from 1982 to 2011 // *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6. pp. 4217–4239.
113. Xiao J., Moody A. A comparison of methods for estimating fractional green vegetation cover within a desert-to-upland transition zone in central New Mexico, USA. // *Remote Sensing of Environment*. 2005. Vol. 98. pp. 237–250.
114. Xiao Z., Wang T., Liang S., Sun R. Estimating the fractional vegetation cover from GLASS leaf area index product. // *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8. № 4. p. 337.
115. Young N.E., Anderson R.S., Chignell S.M., Vorster A.G., Lawrence, R., Evangelista P.H. A survival guide to Landsat preprocessing // *Ecology*. 2017. Vol. 98 pp. 920–932.

116. Zeng X., Dickinson R., Walker A., Defries R., Qi J. Derivation and evaluation of global 1-km fractional vegetation cover data for land modeling // *Journal of Applied Meteorology*. 2000. Vol. 39. pp. 826–839.
117. Zhu Z., Woodcock C. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data // *Remote Sensing of Environment*. 2014. Vol. 144. pp. 152–171.
118. Zhu Z. Change detection using Landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2017. Vol. 130. pp. 370–384.

Приложение А**Список научных конференций и семинаров, на которых докладывались
результаты диссертационной работы**

1. Восемнадцатая Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 16-20 ноября 2020, Москва, ИКИ РАН
2. XVII Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», 30 сентября–2 октября 2020 года, Москва, ИКИ РАН.
3. Всероссийская научно-техническая конференция "Цифровые технологии в лесном секторе". 25-27 марта 2020 года, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
4. Семнадцатая Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 11-15 ноября 2019 года, Москва, ИКИ РАН.
5. VII Всероссийская конференция "Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии", 22-24 апреля 2019 года, Москва ЦЭПЛ РАН.
6. Шестнадцатая Всероссийская Открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", 12-16 ноября 2018 года, Москва, ИКИ РАН.
7. Пятнадцатая Всероссийская Открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", 13-17 ноября 2017 года, Москва, ИКИ РАН.
8. Четырнадцатая Всероссийская Открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", 14-18 ноября 2016 года, Москва, ИКИ РАН.

9. XII Конференция молодых ученых "Фундаментальные и прикладные космические исследования", 13-15 апреля 2015 года, Москва, ИКИ РАН.
10. Одиннадцатая Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 11–15 ноября 2013 года, Москва, ИКИ РАН.
11. Десятая Всероссийская Открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", 12-16 ноября 2012 года, Москва, ИКИ РАН.
12. VIII конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», 14-15 апреля 2011 года, Москва, ИКИ РАН.
13. Восьмая Всероссийская Открытая ежегодная конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", 15-19 ноября 2010 года, Москва, ИКИ РАН.
14. VI конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», 9-10 апреля 2009 года, Москва, ИКИ РАН.
15. Седьмая Всероссийская Открытая ежегодная конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", 16-20 ноября 2009 года, Москва, ИКИ РАН.
16. Четвертая конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», 12 апреля 2007 года, ИКИ РАН.
17. IV Международная конференция «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве» 17-19 апреля 2007 года, Москва, ЦЭПЛ РАН.
18. Четвертая Всероссийская Открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", 13-17 ноября 2006, Москва, ИКИ РАН.
19. III конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», 12 апреля 2006 года, Москва, ИКИ РАН.

20. Третья Всероссийская Открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" 14-17 ноября 2005 года, Москва, ИКИ РАН.
21. Конференция молодых учёных «Исследования космического пространства в интересах фундаментальных наук», 8 апреля 2005 года, Москва, ИКИ РАН.
22. Вторая открытая всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 16-18 ноября 2004 года, Москва, ИКИ РАН.
23. Конференция молодых ученых «Исследование космического пространства в интересах фундаментальных наук», 9 апреля 2004 года, Москва, ИКИ РАН.

Приложение Б**Список публикаций автора по результатам диссертационной работы**

1. Ховратович Т.С., Барталев С.А. Методы дистанционной оценки показателей горизонтальной структуры древесного полога по данным спутниковой системы MODIS // XVII Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН. Москва. 30 сентября–2 октября 2020 г. Сборник трудов/под ред. А.М.Садовского, 2020. С.149–154.
2. Балашов И.В., Кашницкий А.В., Барталев С.А., Барталев С.С., Бурцев М.А., Ворушилов И.И., Егоров В.А., Жарко В.О., Кобец Д.А., Константинова А.М., Лупян Е.А., Сайгин И.А., Сенько К.С., Стыщенко Ф.В., Сычугов И.Г., Хвостиков С.А., Ховратович Т.С. Информационная система комплексного мониторинга лесов и охотничьих угодий России ВЕГА-Лес // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 73–88.
3. Khovratovich T.S., Bartalev S.A., Kashnitskiy A.V., Balashov I.V., Ivanova A.A. Forest change detection based on sub-pixel tree cover estimates using Landsat-OLI and Sentinel 2 data // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020. Vol.507. №.1. P. 012011.
4. Balashov I.V., Bartalev S.A., Bartalev S.S., Bourtsev M.A., Vorushilov I.I., Egorov V.A., Kashnitskiy A.V., Khovratovich T.S., Khvostikov S.A., Kobets D.A., Loupian E.A., Saigin I.A., Senko K.S., Stytsenko F.V., Sychugov I.G., Zharko V.O. Vega-Les Information System. Actual Features and Future Evolution // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020. Vol.507. №.1. P. 012002.
5. Ховратович Т.С., Иванова А.А., Барталев С.А. Анализ результатов применения алгоритма детектирования рубок леса по спутниковым данным дистанционного зондирования // "Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли - RORSE 2018". ИКИ РАН, 2019. С. 108–115.

6. Ховратович Т.С., Барталев С.А., Кашницкий А.В. Метод детектирования изменений лесов на основе подпиксельной оценки проективного покрытия древесного полога по разновременным спутниковым изображениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 102–110.
7. Ховратович Т.С., Барталев С.А., Иванова А.А. Применение метода выявления изменений по спутниковым данным Landsat 8 и Sentinel-2 для детектирования сплошных и выборочных рубок леса // Доклады VII Всероссийской конференции (с международным участием) "Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии", посвященной памяти выдающегося ученого-лесоведа, академика РАН А.С. Исаева. Москва, 22–24 апреля 2019. М.: ЦЭПЛ РАН, 2019. С. 101–103.
8. Кашницкий А.В., Ховратович Т.С., Балашов И.В. Организация обработки данных ДЗЗ при решении задачи детектирования изменений лесного покрова на больших территориях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 103–111.
9. Лупян Е.А., Барталев С.А., Балашов И.В., Барталев С.С., Бурцев М.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Жарко В.О., Кашницкий А.В., Колбудаев П.А., Крамарева Л.С., Мазуров А.А., Оксюкевич А.Ю., Плотников Д.Е., Прошин А.А., Сенько К.С., Уваров И.А., Хвостиков С.А., Ховратович Т.С. Информационная система комплексного дистанционного мониторинга лесов «Вега-Приморье» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 11–28.
10. Барталев С.А., Ховратович Т.С. Анализ возможностей применения методов сегментации спутниковых изображений для выявления изменений в лесах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т.8. № 1. С. 44–62.
11. Барталев С.А., Егоров В.А., Крылов А.М., Стыценко Ф.В., Ховратович Т.С. Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Современные

- проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т.7. № 3. С. 215–225.
12. Барталев С.А., Ховратович Т.С., Елсаков В.В. Использование спутниковых изображений для оценки потерь углерода лесными экосистемами в результате вырубок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Выпуск 6. Т. 2. С. 343–351.
 13. Ховратович Т.С., Барталев С.А., Егоров В.А., Медведева М.А. Оценка возможностей автоматического выявления вырубок в таежных лесах по данным спутникового прибора Terra-MODIS // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве: доклады IV Международной конференции. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. С. 150–152.
 14. Барталев С.А., Егоров В.А., Курятникова Т.С., Лупян Е.А., Уваров И.А. Методы и результаты использования данных спутниковых наблюдений для оценки воздействия пожаров и рубок на леса России // Дистанционные методы в лесоустройстве и учете лесов. Приборы и технологии: Материалы Всероссийского совещания-семинара с международным участием. Красноярск. ИЛ СО РАН им. В.Н.Сукачева, 2005. С. 23–27.
 15. Барталев С.А., Курятникова Т.С., Стибиг Х.Ю. Методы использования временных серий спутниковых изображений высокого пространственного разрешения для оценки масштабов и динамики вырубок таежных лесов // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2005. Выпуск 2. Т. 2. С. 217–227.
 16. Bucha T., Stibig H-J, Bartalev S.A., Kuryatnikova T.A. Mapping of Clear Cut in Boreal Forest Ecosystems with MODIS // Proceedings of the Conference "Climate Change - Forest Ecosystems & Landscape", Sielnica-Zvolen, Slovak Republic, 2005.