МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«УДМУРТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт естественных наук
Кафедра географии, картографии и геоинформатики

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

НА ТЕМУ

ОБНОВЛЕНИЕ КАРТЫ МАСШТАБА 1:100000 НА ТЕРРИТОРИИ УР

Работу выполнил студент группы ОБ-05.03.03-41
Галиев Ильсаф Фирдинандович /_____/

Научный руководитель: ст. преподаватель кафедры географии, картографии и геоинформатики
Копанева Ирина Михайловна /_____/

Зав. кафедрой географии, картографии и геоинформатики, к.г.н., доцент Сидоров Валерий Петрович

_____
(решение о допуске)

_____
(подпись)

«___» _____20___г.

Ижевск - 2026 г.

ВКР УдГУ

Оглавление

Введение 4

Глава 1. Теоретические основы обновления топографических карт..... 6

1.1. Назначение и особенности топографических карт масштаба 1:100 000..... 6

1.2. Принципы обновления картографической информации..... 9

1.3. Требования к точности и актуальности картографических данных 13

1.4. Современные подходы к цифровому обновлению карт 15

Глава 2. Дистанционное зондирование Земли как источник данных для картографирования 19

2.1. Основы дистанционного зондирования Земли 19

2.2. Спутниковая система Sentinel-2 и её характеристики 21

2.3. Спектральные каналы Sentinel-2 и их применение в дешифрировании..... 24

2.4. Возможности и ограничения использования Sentinel-2 для анализа земной поверхности..... 27

Глава 3. Методы дешифрирования и ГИС-обработки пространственных данных 30

3.1. Визуальное и автоматизированное дешифрирование спутниковых изображений..... 30

3.2. Спектральный анализ и индикаторы растительности..... 33

3.3. Полуавтоматическая классификация в QGIS с использованием SCP..... 35

3.4. Ошибки классификации и особенности интерпретации результатов..... 37

Глава 4. Практическая реализация обновления лесного покрова 41

4.1. Исходные данные и характеристика территории исследования 41

4.2. Подготовка и обработка топографической карты Генштаба.. 43

ВКР УлГУ

4.3. Подготовка и обработка спутниковых данных Sentinel-2 44

4.4. Классификация и построение векторных слоёв лесного покрова 47

Заключение 53

Список литературы 54

ВКР УДГУ

Введение

В условиях активного изменения природной среды и хозяйственного освоения территорий топографические карты требуют регулярного обновления, поскольку именно они служат одной из основ для территориального планирования, научных исследований и решения прикладных задач в географии, экологии, землеустройстве и смежных областях. Особое значение при этом приобретает своевременное отражение изменений растительного покрова, прежде всего лесов, так как они являются наиболее динамичным компонентом ландшафта и достаточно часто подвергаются вырубкам, зарастанию, смене породного состава и иным преобразованиям.

Актуальность настоящей работы обусловлена необходимостью обновления топографической информации на основе современных материалов дистанционного зондирования Земли. Спутниковые снимки позволяют получать актуальные сведения о состоянии местности на значительных площадях и с достаточной детализацией для выявления изменений, недоступных при использовании только устаревших картографических материалов. Для решения подобных задач широко применяются данные Sentinel, а также геоинформационные технологии, обеспечивающие обработку, сопоставление и картографическое отображение результатов дешифрирования.

Цель работы — обновление топографической карты масштаба 1:100 000 на территории Удмуртской Республики по материалам карты Генштаба и спутниковых снимков Sentinel с выявлением изменений лесного покрова за период с 1960-х годов до настоящего времени.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить теоретические основы обновления топографических карт по материалам дистанционного зондирования Земли.

ВКР УдГУ

2. Рассмотреть особенности дешифрирования лесной растительности на спутниковых снимках.

3. Подготовить исходные материалы, включая топографическую карту Генштаба и спутниковые снимки Sentinel.

4. Выполнить геопривязку, перепроецирование и обрезку растра в программной среде QGIS.

5. Провести дешифрирование лесных массивов и их векторизацию по современному космическому снимку и карте Генштаба.

6. Сопоставить полученные результаты.

Объект исследования — территория Удмуртской Республики, отображенная на топографической карте масштаба 1:100 000 и современном спутниковом изображении Sentinel.

Предмет исследования — изменения лесного покрова и методические приемы обновления топографической карты по данным дистанционного зондирования Земли.

В качестве методов исследования были использованы: теоретический, описательный, картографический, геоинформационный, геосистемного анализа, а также визуальное дешифрирование космических снимков.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы для обновления топографической информации, подготовки картографических материалов и последующего анализа изменений лесного покрова на исследуемой территории. Кроме того, разработанная последовательность ГИС-обработки может быть применена при выполнении аналогичных работ по обновлению топографических карт с использованием спутниковых снимков Sentinel и программного обеспечения QGIS.

ВКР УдГУ

Глава 1. Теоретические основы обновления топографических карт

1.1. Назначение и особенности топографических карт масштаба 1:100 000

Топографические карты масштаба 1:100 000 занимают промежуточное положение между обзорными мелкомасштабными картами и крупномасштабными планами местности, что определяет их широкое применение в научной, хозяйственной и военной деятельности. Данный масштаб относится к категории среднемасштабных топографических карт и обеспечивает оптимальное соотношение между детальностью отображения местности и площадью охвата территории. В практическом отношении это делает карты масштаба 1:100 000 одним из наиболее востребованных видов картографической продукции при анализе значительных по площади регионов, включая административные субъекты Российской Федерации.

Основным назначением топографических карт данного масштаба является отображение основных элементов местности с достаточной степенью генерализации, позволяющей проводить пространственный анализ, планирование и мониторинг территории. На таких картах отображаются природные и антропогенные объекты, включая гидрографическую сеть, рельеф, растительный покров, населённые пункты, транспортную инфраструктуру и элементы хозяйственного использования территории. При этом степень детализации позволяет сохранять ключевые пространственные закономерности, не перегружая картографическое изображение избыточной информацией [8].

Карты масштаба 1:100 000 традиционно используются в следующих направлениях:

1) территориальное планирование и управление природными ресурсами;
2) инженерно-географические и экологические исследования;
3) военное и оперативное планирование;
4) создание производных картографических материалов;

ВКР УлГУ

5) геоинформационное моделирование и пространственный анализ;
6) учебные и научные цели в области географии и смежных дисциплин.

С точки зрения картографической точности данный масштаб предполагает определённые нормативные ограничения, связанные с допустимыми погрешностями положения объектов. В соответствии с действующими картографическими стандартами, средняя точность планового положения объектов на топографических картах масштаба 1:100 000 составляет порядка нескольких десятков метров на местности. Это означает, что мелкие локальные объекты могут быть обобщены или исключены в процессе генерализации, тогда как сохраняются устойчивые и пространственно значимые элементы ландшафта.

Важной особенностью топографических карт является их строгая системная основа. В отечественной картографической практике значительная часть топографических материалов исторически создавалась в государственной системе координат СК-42 (Пулково 1942), которая базируется на референц-эллипсоиде Красовского. Данная система долгое время использовалась в качестве основной для картографирования территории СССР и Российской Федерации. В современных условиях при обновлении и интеграции данных всё чаще осуществляется переход к глобальным и веб-ориентированным системам координат, однако при работе с историческими материалами, такими как карты Генерального штаба, сохранение исходной системы координат и её корректное преобразование остаётся ключевым этапом обработки данных.

Существенной характеристикой топографических карт является их условно-знаковая система. Отображение объектов осуществляется с использованием стандартизированных условных знаков, обеспечивающих однозначную интерпретацию информации независимо от конкретного пользователя. Условные обозначения включают линейные, площадные и точечные символы, а также пояснительные подписи. Особое значение имеет унификация символики, поскольку она обеспечивает сопоставимость карт

ВКР УлГУ

различных годов издания и позволяет выполнять корректный временной анализ изменений местности.

Для масштаба 1:100 000 характерна определённая степень генерализации картографического изображения. Генерализация включает отбор объектов, упрощение их формы, обобщение контуров и исключение второстепенных элементов. Например, при отображении лесных массивов на карте фиксируются устойчивые контуры крупных лесных массивов, тогда как мелкие участки лесной растительности могут быть объединены или не показаны вовсе. Аналогичные принципы применяются к дорожной сети, гидрографическим объектам и застройке. Это необходимо для сохранения читаемости карты при ограниченном пространстве листа.

Отдельного внимания требует вопрос актуальности топографических карт. Традиционно топографические карты создавались как относительно долговременные картографические продукты, однако в современных условиях динамичного изменения природной среды и хозяйственной деятельности их актуальность со временем снижается. Особенно это касается территорий с интенсивным лесопользованием, сельскохозяйственным освоением и урбанизацией. В результате возникает необходимость регулярного обновления картографической информации, что в настоящее время всё чаще осуществляется на основе данных дистанционного зондирования Земли и геоинформационных технологий [6].

С точки зрения структуры картографического листа масштаб 1:100 000 предполагает использование установленной разграфки и номенклатуры листов, что обеспечивает систематизацию покрытия территории. Это позволяет осуществлять стыковку смежных листов и формировать непрерывные картографические покрытия больших территорий. Данный принцип особенно важен при региональных исследованиях, таких как анализ изменений лесного покрова на уровне субъекта Российской Федерации.

Также следует отметить, что топографические карты данного масштаба являются основой для создания производных карт, включая тематические

ВКР УлГУ

карты природных ресурсов, экологического состояния территории, транспортной доступности и других видов пространственного анализа. В условиях развития геоинформационных систем они часто используются как базовый слой для оцифровки и интеграции пространственных данных, что позволяет совмещать историческую картографическую информацию с современными спутниковыми наблюдениями.

Таким образом, топографические карты масштаба 1:100 000 представляют собой важный источник пространственной информации, обладающий балансом между детальностью и обзорностью. Их особенности, связанные с генерализацией, системой координат, условными знаками и структурой представления данных, определяют специфику их использования в современных геоинформационных технологиях, особенно при задачах обновления картографической информации и анализа изменений природной среды во времени.

1.2. Принципы обновления картографической информации

Обновление картографической информации представляет собой комплекс теоретических и методических процедур, направленных на приведение содержания карты в соответствие с современным состоянием отображаемой территории. В условиях постоянной трансформации природных и антропогенных ландшафтов данный процесс является необходимым элементом поддержания актуальности топографических и тематических карт, особенно при их использовании в задачах пространственного анализа, территориального планирования и мониторинга природной среды.

В основе обновления картографических данных лежит принцип сопоставления исходного (базового) картографического материала с новыми источниками пространственной информации. В качестве таких источников в настоящее время выступают материалы дистанционного зондирования Земли, результаты геодезических измерений, данные кадастровых систем, а также

ВКР УлГУ

результаты полевых обследований. Важным методологическим аспектом является обеспечение совместимости разнородных данных, которая достигается за счёт приведения их к единой координатной основе и единой системе пространственного представления.

Одним из ключевых принципов обновления карт является принцип актуальности, который предполагает, что картографическое изображение должно максимально точно отражать современное состояние местности на момент выполнения работ. При этом необходимо учитывать, что разные элементы местности обладают различной динамикой изменений. Например, лесные массивы, сельскохозяйственные угодья и застроенные территории могут изменяться значительно быстрее, чем элементы рельефа или гидрографической сети. Это требует дифференцированного подхода к обновлению различных категорий объектов [10].

Другим важным принципом является принцип достоверности, который предполагает соответствие отображаемых объектов их реальному положению и характеристикам. Достоверность обеспечивается за счёт использования проверенных источников данных, применения корректных методов дешифрирования и классификации, а также проведения процедуры верификации результатов. В рамках геоинформационного анализа достоверность часто оценивается путем сопоставления нескольких независимых источников информации.

Важную роль играет принцип пространственной согласованности данных. Он заключается в необходимости обеспечения корректного взаимного расположения объектов различных типов и источников. При интеграции данных, полученных из различных временных периодов, особое значение приобретает процедура геопривязки и трансформации координатных систем. Несоблюдение данного принципа приводит к появлению смещений и искажений, что делает невозможным корректное сравнение разновременных данных.

ВКР УлГУ

Современные методы обновления картографической информации в значительной степени основаны на использовании геоинформационных систем. В таких средах осуществляется интеграция растровых и векторных данных, их пространственный анализ, а также последующая визуализация результатов. В рамках данной работы в качестве основной программной среды используется QGIS, которая предоставляет широкий набор инструментов для обработки пространственных данных, включая геопривязку, перепроецирование, векторизацию и анализ растровых изображений [11].

Отдельным принципом обновления карт является принцип генерализации, который сохраняет свою актуальность даже при переходе к цифровым методам картографирования. Несмотря на высокую точность современных источников данных, полное отображение всех деталей местности на топографической карте недопустимо, поскольку приводит к перегрузке картографического изображения. Поэтому при обновлении информации выполняется отбор объектов, упрощение их геометрии, а также обобщение пространственных контуров с учётом масштаба карты и её назначения.

В условиях использования данных дистанционного зондирования важным становится принцип многовременного анализа. Он предполагает сопоставление пространственных данных, относящихся к различным временным периодам, с целью выявления изменений. Данный подход особенно эффективен при изучении динамики природных объектов, таких как лесные массивы, водные объекты и сельскохозяйственные территории. Многовременной анализ позволяет не только фиксировать факт изменения, но и оценивать его пространственные масштабы и структуру.

Особое значение имеет принцип согласования масштабов и разрешения данных. Топографические карты масштаба 1:100 000 имеют определённые ограничения по детализации, тогда как спутниковые снимки обладают более высокой пространственной разрешающей способностью. В связи с этим при обновлении картографической информации необходимо осуществлять

ВКР УлГУ

приведение данных к сопоставимому уровню детализации, что достигается за счёт методов классификации и пространственной фильтрации.

Современные технологии обновления картографической информации также опираются на принцип автоматизации и полуавтоматизации процессов. В частности, значительная часть операций по выделению объектов на спутниковых снимках может выполняться с использованием алгоритмов классификации изображений. Такие методы позволяют существенно ускорить процесс обработки данных и повысить его воспроизводимость. При этом результаты автоматической классификации требуют последующей ручной корректировки, что обеспечивает повышение точности итогового картографического материала.

Неотъемлемым элементом процесса обновления является принцип контроля качества и оценки точности. Он включает проверку корректности геопривязки, оценку точности классификации, а также анализ соответствия результатов исходным данным. В геоинформационной практике применяются как визуальные методы контроля, так и количественные показатели точности, основанные на сравнении с эталонными данными.

Таким образом, обновление картографической информации представляет собой многоэтапный процесс, основанный на сочетании принципов актуальности, достоверности, пространственной согласованности, генерализации и многовременного анализа. Современные геоинформационные технологии, включая использование программных средств типа QGIS и данных дистанционного зондирования Земли, обеспечивают возможность эффективной реализации данных принципов и позволяют существенно повысить качество обновляемых топографических материалов [8].

ВКР УлГУ

1.3. Требования к точности и актуальности картографических данных

Точность и актуальность картографических данных являются ключевыми характеристиками, определяющими пригодность картографических материалов для решения научных и прикладных задач. В контексте топографических карт масштаба 1:100 000 данные параметры приобретают особое значение, поскольку именно на их основе осуществляется пространственный анализ территорий, оценка природных ресурсов и мониторинг изменений окружающей среды [19].

Под точностью картографических данных понимается степень соответствия положения объектов на карте их реальному местоположению на местности. Точность включает несколько компонентов: плановую точность (положение в горизонтальной плоскости), высотную точность (для рельефа), а также точность атрибутивной информации. Для топографических карт среднего масштаба допустимая погрешность положения объектов определяется нормативными документами и, как правило, выражается в десятках метров на местности, что обусловлено особенностями генерализации и источниками исходных данных [1].

Следует учитывать, что точность картографической информации напрямую зависит от качества исходных материалов. В случае использования исторических топографических карт, таких как материалы Генерального штаба 1960-х годов, точность может снижаться вследствие устаревших методов съёмки, различий в координатных системах и накопленных ошибок трансформации. В связи с этим при их использовании в современных геоинформационных системах обязательным этапом является геопривязка и контроль пространственных искажений.

Особое значение имеет переход от аналоговых картографических материалов к цифровым данным. В цифровой среде точность определяется не только исходной картографической основой, но и параметрами растрового изображения (разрешение, качество сканирования), а также точностью

ВКР УлГУ

геопривязки и выбранной проекцией. В рамках данной работы перевод исходной карты в цифровой вид и её последующее приведение к единой системе координат (WGS 84 / Pseudo-Mercator) является необходимым этапом обеспечения сопоставимости данных.

Актуальность картографических данных отражает степень их соответствия современному состоянию местности. В природных и антропогенно преобразованных территориях актуальность быстро снижается вследствие динамики природных процессов и хозяйственной деятельности. Наиболее чувствительными к изменениям являются лесные массивы, сельскохозяйственные угодья и застроенные территории. Именно поэтому для анализа изменений лесного покрова требуется использование современных источников данных дистанционного зондирования Земли, обеспечивающих регулярное обновление информации.

В рамках современных геоинформационных технологий актуальность данных обеспечивается за счёт интеграции разновременных источников информации. В данной работе таким источником выступают спутниковые данные Sentinel-2, которые позволяют получать актуальные сведения о состоянии земной поверхности с высокой периодичностью съёмки. Использование многовременных спутниковых данных обеспечивает возможность выявления изменений и сопоставления их с историческими картографическими материалами.

Важным требованием к точности данных является их пространственная согласованность. Это предполагает использование единой системы координат для всех слоёв, участвующих в анализе. Несогласованность систем координат приводит к смещению объектов и искажению результатов сопоставления. В данной работе для обеспечения совместимости данных выполнялось перепроецирование всех слоёв в единую систему координат, что позволило корректно проводить пространственный анализ и наложение разновременных данных.

ВКР УдГУ

Отдельным требованием является масштабная согласованность данных. При сравнении источников различного пространственного разрешения необходимо учитывать различия между масштабом топографической карты и разрешением спутниковых изображений. Несоответствие уровней детализации требует применения методов генерализации и классификации, позволяющих привести данные к сопоставимому уровню обобщения.

Также важным аспектом является контроль качества данных, включающий оценку точности геопривязки, проверку корректности векторизации и анализ ошибок классификации. На практике это реализуется через визуальное сравнение слоёв, а также через анализ пересечений и расхождений пространственных объектов [2].

Таким образом, требования к точности и актуальности картографических данных формируются совокупностью факторов, включающих качество исходных материалов, методы их обработки, систему координат, а также используемые технологии анализа. Соблюдение данных требований является необходимым условием корректного обновления топографических карт и получения достоверных результатов пространственного анализа изменений природной среды.

1.4. Современные подходы к цифровому обновлению картографических данных

Современное обновление картографической информации претерпело существенные изменения в связи с переходом от традиционных бумажных карт к цифровым геоинформационным моделям. В настоящее время процесс актуализации картографических данных рассматривается как комплексная задача, включающая сбор, обработку, анализ и интеграцию пространственной информации из различных источников. Основную роль в этом процессе играют геоинформационные системы и данные дистанционного зондирования Земли, позволяющие существенно повысить оперативность и точность обновления карт.

ВКР УлГУ

Цифровое обновление картографических данных базируется на принципе интеграции разнородных пространственных данных. В качестве исходной основы могут использоваться как исторические картографические материалы, так и современные спутниковые снимки, результаты аэрофотосъёмки и данные наземных измерений. При этом ключевым условием является приведение всех источников к единой координатной системе и единому формату представления, что обеспечивает их совместный анализ в рамках геоинформационной среды.

Важным направлением современного цифрового обновления является использование данных дистанционного зондирования Земли высокой и средней пространственной разрешающей способности. Такие данные позволяют получать актуальную информацию о состоянии земной поверхности без необходимости проведения сплошных наземных обследований. В данной работе применяются данные Sentinel-2, которые обеспечивают регулярное покрытие территории и позволяют выполнять многовременной анализ изменений природных объектов, включая лесной покров.

Современные подходы к обновлению картографической информации включают как визуальные, так и автоматизированные методы дешифрирования. Визуальное дешифрирование основано на интерпретации спектральных, пространственных и текстурных характеристик объектов на изображении оператором. Автоматизированные и полуавтоматизированные методы, в свою очередь, используют алгоритмы классификации изображений, позволяющие выделять объекты на основе их спектральных характеристик. В практике геоинформационного анализа широко применяются методы контролируемой классификации, при которых оператор задаёт обучающие выборки для различных классов объектов [7].

Одним из наиболее распространённых инструментов реализации таких методов является программное обеспечение QGIS, которое обеспечивает интеграцию растровых и векторных данных, а также поддержку расширений

ВКР УлГУ

для обработки данных дистанционного зондирования. В частности, использование модуля Semi-Automatic Classification Plugin позволяет выполнять предварительную обработку спутниковых изображений, формирование обучающих выборок, классификацию и последующую оценку точности результатов.

Важным элементом цифрового обновления является этап предварительной обработки данных, включающий геометрическую коррекцию, перепроецирование, обрезку по границам исследуемой территории и нормализацию спектральных характеристик. Эти операции необходимы для обеспечения сопоставимости данных и повышения качества последующего анализа.

Современные подходы также предполагают широкое использование векторизации результатов дешифрирования. Векторизация позволяет преобразовать растровые данные в объекты векторного формата, что обеспечивает удобство дальнейшего анализа, редактирования и интеграции в картографические базы данных. В рамках анализа лесного покрова это особенно важно, так как позволяет точно фиксировать границы лесных массивов и проводить их пространственное сравнение в разные временные периоды.

Отдельное место в современных методах обновления занимает анализ изменений, основанный на сопоставлении разновременных данных. Данный подход позволяет выявлять участки, на которых произошли изменения в структуре земного покрова, включая вырубку лесов, их восстановление или трансформацию в другие типы землепользования. Такой анализ может выполняться как на уровне растровых данных, так и на уровне векторных слоёв посредством их наложения и пространственного анализа [8].

Важной особенностью современных подходов является их высокая степень автоматизации и воспроизводимости. Использование цифровых алгоритмов обработки данных позволяет минимизировать субъективный фактор, характерный для традиционного визуального дешифрирования, а

ВКР УлГУ

также обеспечивает возможность повторного выполнения анализа при изменении входных данных или параметров обработки. Это особенно важно в задачах мониторинга природной среды, где требуется регулярное обновление информации.

Таким образом, современные подходы к цифровому обновлению картографических данных основаны на комплексном использовании геоинформационных технологий, данных дистанционного зондирования и методов пространственного анализа. Их применение обеспечивает повышение точности, актуальности и воспроизводимости картографической информации, что делает их ключевым инструментом при решении задач обновления топографических карт и анализа изменений природной среды во времени.

ВКР УДГУ

Глава 2. Дистанционное зондирование Земли как источник данных для картографирования

2.1. Основы дистанционного зондирования Земли

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) представляет собой совокупность методов получения информации о поверхности Земли без непосредственного контакта с объектами исследования. Основой данного подхода является регистрация и последующий анализ электромагнитного излучения, отражённого или испускаемого объектами земной поверхности. Полученные данные позволяют судить о состоянии природных и антропогенных объектов, их пространственном распределении и динамике изменений во времени.

Физическая основа дистанционного зондирования базируется на взаимодействии электромагнитного излучения с поверхностью Земли и атмосферой. Различные объекты по-разному отражают, поглощают и излучают энергию в зависимости от их физических и биологических свойств. Эти различия фиксируются сенсорами спутниковых систем и выражаются в виде цифровых значений, которые впоследствии интерпретируются в процессе обработки изображений. Таким образом, спектральные характеристики объектов становятся основным источником информации при дешифрировании.

В структуре дистанционного зондирования выделяют активные и пассивные методы. Пассивные системы регистрируют естественное излучение, главным образом солнечное отражённое излучение, тогда как активные системы самостоятельно излучают сигнал и фиксируют его отражение от поверхности. В рамках данной работы используются данные пассивного зондирования, полученные со спутниковой системы Sentinel-2, которая относится к оптическим мультиспектральным системам наблюдения Земли.

ВКР УдГУ

Ключевым элементом ДЗЗ являются сенсоры, регистрирующие излучение в различных спектральных диапазонах. В зависимости от длины волны выделяют видимый, ближний инфракрасный и коротковолновый инфракрасный диапазоны. Каждый из них несёт специфическую информацию об объектах земной поверхности. Например, растительность активно отражает излучение в ближнем инфракрасном диапазоне, что позволяет эффективно использовать данные спектральные каналы для выделения лесных массивов и оценки их состояния.

Важной характеристикой данных дистанционного зондирования является пространственное, спектральное, радиометрическое и временное разрешение. Пространственное разрешение определяет минимальный размер объекта, который может быть различим на изображении. Спектральное разрешение отражает количество и ширину спектральных каналов, регистрируемых сенсором. Радиометрическое разрешение характеризует чувствительность системы к различиям в интенсивности сигнала. Временное разрешение определяет частоту повторного наблюдения одной и той же территории.

Современные спутниковые системы, включая Sentinel-2, обладают высокой степенью детализации и обеспечивают многоканальную съёмку поверхности Земли с регулярной периодичностью. Это делает их особенно эффективными для мониторинга динамических процессов, таких как изменение лесного покрова, деградация земель, урбанизация и сельскохозяйственное освоение территорий.

Процесс получения данных дистанционного зондирования включает несколько этапов: формирование электромагнитного сигнала, его прохождение через атмосферу, взаимодействие с поверхностью Земли, регистрацию сенсором и последующую цифровую обработку. На каждом из этих этапов возможны искажения, связанные с атмосферными условиями, углом съёмки, характеристиками сенсора и другими факторами, что требует

ВКР УлГУ

предварительной коррекции данных перед их использованием в аналитических задачах.

Особое значение имеет этап предварительной обработки, включающий атмосферную коррекцию, геометрическую коррекцию и нормализацию данных. Атмосферная коррекция направлена на устранение влияния рассеяния и поглощения излучения атмосферой. Геометрическая коррекция обеспечивает точное пространственное соответствие изображений реальной поверхности Земли. Эти процедуры являются обязательными при подготовке данных для последующего дешифрирования и пространственного анализа.

Данные дистанционного зондирования широко применяются в геоинформационных системах, где они интегрируются с векторными слоями и другими пространственными данными. Это позволяет выполнять комплексный анализ территории, включая выявление изменений, классификацию объектов и моделирование природных процессов. В данной работе интеграция спутниковых данных с исторической топографической основой обеспечивает возможность сопоставления состояния лесного покрова в разные временные периоды.

Таким образом, дистанционное зондирование Земли представляет собой фундаментальную технологическую основу современных методов получения пространственной информации. Его применение обеспечивает получение актуальных, объективных и сопоставимых данных о состоянии земной поверхности, что делает его ключевым инструментом при решении задач обновления картографической информации и анализа изменений природной среды [7, 9].

2.2. Спутниковая система Sentinel-2 и её характеристики

Спутниковая система Sentinel-2 является частью программы Copernicus Европейского космического агентства и предназначена для оперативного мониторинга состояния земной поверхности. Основной целью миссии является обеспечение регулярных наблюдений суши с высокой

ВКР УлГУ

пространственной, спектральной и временной детализацией, что делает данные системы востребованными в задачах картографирования, экологического мониторинга и анализа изменений природных комплексов.

Система Sentinel-2 состоит из двух идентичных спутников — Sentinel-2A и Sentinel-2B, функционирующих на солнечно-синхронной орбите. Такое построение группировки позволяет существенно сократить временной интервал повторной съёмки одной и той же территории. В результате обеспечивается высокая частота обновления данных, что особенно важно при анализе динамичных природных процессов, включая изменения лесного покрова, сельскохозяйственное использование земель и урбанизацию [21].

Одной из ключевых особенностей системы является наличие мультиспектрального сенсора MSI (MultiSpectral Instrument), который обеспечивает съёмку в 13 спектральных диапазонах. Эти диапазоны охватывают видимую, ближнюю инфракрасную и коротковолновую инфракрасную области электромагнитного спектра. Различная ширина и положение спектральных каналов позволяют эффективно выделять природные объекты и анализировать их состояние на основе спектральных характеристик.

Особое значение для анализа растительного покрова имеют каналы в ближнем инфракрасном диапазоне, поскольку растительность характеризуется высоким коэффициентом отражения в этих спектрах. Это свойство активно используется при построении цветовых композиций и индексов растительности, позволяющих выделять лесные массивы и оценивать их состояние. В данной работе применялись комбинации спектральных каналов, включая стандартную RGB-композитную схему и комбинации с использованием ближнего инфракрасного диапазона для повышения контрастности растительного покрова.

Пространственное разрешение данных Sentinel-2 варьируется в зависимости от спектрального канала. Наиболее детализированные каналы имеют разрешение 10 метров, что обеспечивает достаточную точность для

ВКР УлГУ

анализа объектов среднего масштаба, включая лесные массивы, водные объекты и элементы сельскохозяйственного использования. Каналы с более низким пространственным разрешением используются для дополнительного спектрального анализа и уточнения классификации [4, 13, 14].

Важной характеристикой системы является высокая временная разрешающая способность. При совместной работе двух спутников обеспечивается повторное покрытие территории каждые 5 дней. Это позволяет получать актуальные данные практически в непрерывном режиме и проводить многовременной анализ изменений поверхности Земли с высокой степенью детализации.

Данные Sentinel-2 проходят предварительную обработку, включающую уровни коррекции L1C и L2A. Продукты уровня L1C представляют собой данные верхней границы атмосферы, тогда как L2A включают атмосферно скорректированные изображения поверхности Земли. В геоинформационных задачах, связанных с классификацией земельного покрова, предпочтение, как правило, отдаётся данным уровня L2A, поскольку они обеспечивают более корректное спектральное представление объектов.

Важным аспектом использования Sentinel-2 является наличие открытого доступа к данным, что существенно расширяет возможности их применения в научных и прикладных исследованиях. Данные распространяются в стандартизированных форматах и легко интегрируются в программные среды обработки геопространственной информации, включая QGIS.

С точки зрения картографического анализа, Sentinel-2 обладает рядом преимуществ, включая высокую спектральную детализацию, достаточное пространственное разрешение и регулярность съёмки. Эти характеристики делают систему особенно эффективной при решении задач обновления топографических карт, поскольку позволяют выявлять изменения на уровне, сопоставимом с масштабом 1:100 000.

Однако необходимо учитывать и ограничения системы. К ним относятся влияние облачности, сезонные изменения спектральных характеристик

ВКР УлГУ

объектов, а также возможные искажения, связанные с атмосферными условиями. Эти факторы требуют тщательного отбора сцен и предварительной обработки данных перед выполнением классификации и пространственного анализа.

Таким образом, Sentinel-2 представляет собой современную спутниковую систему наблюдения Земли, обеспечивающую высокое качество многоспектральных данных, которые эффективно применяются для анализа природных объектов и обновления картографической информации. Её характеристики делают её одним из ключевых источников данных для геоинформационных исследований, связанных с мониторингом изменений земной поверхности [9].

2.3. Спектральные каналы Sentinel-2 и их применение в дешифрировании

Спектральные каналы спутниковой системы Sentinel-2 являются основой для проведения анализа земной поверхности, поскольку именно различия в отражательной способности объектов в различных диапазонах электромагнитного спектра позволяют выполнять их идентификацию и классификацию. Мультиспектральная структура данных обеспечивает возможность детального изучения природных и антропогенных объектов, включая растительность, водные поверхности, почвы и застроенные территории.

Сенсор MSI (MultiSpectral Instrument), установленный на спутниках Sentinel-2, обеспечивает съёмку в 13 спектральных каналах, охватывающих видимую, ближнюю инфракрасную (NIR) и коротковолновую инфракрасную (SWIR) области спектра. Каждый из каналов имеет собственное пространственное разрешение (10, 20 или 60 метров), что позволяет комбинировать высокодетальные и вспомогательные данные при решении различных задач дешифрирования.

ВКР УлГУ

Каналы в видимом диапазоне (синий, зелёный и красный) используются для формирования естественных цветовых композиций, максимально приближенных к восприятию человеческого глаза. Они позволяют проводить первичный визуальный анализ территории, выделять крупные объекты и оценивать общее состояние ландшафта. Однако для задач выделения растительности их информативность ограничена, поскольку спектральные различия между классами объектов в этом диапазоне могут быть недостаточно выражены.

Особое значение для анализа лесного покрова имеет ближний инфракрасный диапазон (NIR). Растительность характеризуется высоким коэффициентом отражения в этом спектре, что связано с внутренней структурой листьев и особенностями фотосинтетических процессов. Именно поэтому канал NIR широко используется при построении композитов и индексов растительности, позволяющих эффективно отделять лесные массивы от других типов земного покрова [20].

Каналы коротковолнового инфракрасного диапазона (SWIR) обладают высокой информативностью при анализе влажности почв, состояния растительности и различий между типами растительных сообществ. Они позволяют различать, например, влажные и сухие участки, а также отделять лесные территории от кустарниковой и травянистой растительности. В данной работе использование SWIR-каналов особенно важно при полуавтоматической классификации, поскольку они повышают различимость классов в алгоритмах дешифрирования.

Комбинации спектральных каналов широко применяются для визуального и автоматизированного анализа. Наиболее распространённой является комбинация 8–4–3 (NIR–Red–Green), которая в псевдоцветовом представлении позволяет выделять растительность в ярко выраженных оттенках. Лесные массивы при этом отображаются в различных оттенках красного цвета, что существенно облегчает их визуальное дешифрирование и

ВКР УлГУ

последующую векторизацию. Именно данная комбинация использовалась в практической части работы для первичного выделения лесного покрова.

Для более детального анализа применяются также другие комбинации каналов, включая 11–8–4 и 12–8–4, которые позволяют дополнительно учитывать различия в влажности и структуре растительности. Такие комбинации особенно полезны при уточнении границ лесных массивов и отделении их от смежных классов земного покрова, таких как сельскохозяйственные земли или заболоченные территории.

Важным инструментом анализа спектральных данных являются индексы растительности, основанные на математических преобразованиях значений спектральных каналов. Наиболее известным из них является нормализованный разностный индекс растительности (NDVI), который рассчитывается на основе соотношения отражения в красном и ближнем инфракрасном диапазонах. Хотя в данной работе основной акцент сделан на классификационные методы, индексы растительности также могут использоваться как вспомогательный инструмент для оценки плотности и состояния лесного покрова.

С точки зрения дешифрирования лесной растительности спектральные каналы Sentinel-2 обладают высокой информативностью, однако их интерпретация требует учёта сезонных и атмосферных факторов. Например, различия в фенологическом состоянии растительности могут приводить к изменению спектральных характеристик в разные периоды года. В связи с этим для анализа выбираются снимки, относящиеся к близким сезонным условиям, что обеспечивает сопоставимость данных.

При обработке спутниковых данных в геоинформационной среде QGIS спектральные каналы используются как основа для построения композитов, выполнения классификации и последующей векторизации объектов. В сочетании с инструментами полуавтоматической классификации это позволяет значительно повысить точность выделения лесных массивов и снизить влияние субъективного фактора при интерпретации изображений.

ВКР УлГУ

Таким образом, спектральные каналы Sentinel-2 представляют собой ключевой источник информации для дистанционного анализа земной поверхности. Их сочетание обеспечивает возможность комплексного дешифрирования лесных и других природных объектов, что делает их особенно эффективными при решении задач обновления топографических карт и анализа изменений земного покрова [7].

2.4. Возможности и ограничения использования Sentinel-2 для анализа земной поверхности

Использование спутниковых данных Sentinel-2 в задачах анализа земной поверхности обусловлено их высокой информативностью, регулярностью получения и доступностью. Данная система предоставляет мультиспектральные изображения, которые позволяют выполнять детальное дешифрирование природных и антропогенных объектов, включая лесные массивы, водные объекты, сельскохозяйственные земли и застроенные территории. Однако, несмотря на широкие возможности применения, данные Sentinel-2 обладают рядом ограничений, которые необходимо учитывать при выполнении геоинформационного анализа.

Одним из ключевых преимуществ Sentinel-2 является высокая пространственная и спектральная информативность. Разрешение 10 метров для части каналов обеспечивает возможность анализа объектов среднего масштаба, что соответствует задачам топографического картографирования масштаба 1:100 000. Это позволяет достаточно точно выделять границы крупных лесных массивов и проводить их сопоставление с историческими картографическими материалами.

Важным достоинством является высокая временная разрешающая способность системы. Благодаря работе двух спутников обеспечивается регулярное обновление данных, что делает возможным проведение многовременного анализа. Это особенно важно при исследовании

ВКР УлГУ

динамических процессов, таких как вырубка лесов, восстановление растительности и изменение структуры землепользования.

Существенным преимуществом также является открытая модель распространения данных. Информация Sentinel-2 доступна в свободном доступе, что значительно расширяет возможности её применения в научных исследованиях и образовательных проектах. Кроме того, стандартизированные форматы данных обеспечивают их совместимость с большинством современных геоинформационных систем, включая QGIS.

Отдельного внимания заслуживает спектральная информативность данных. Наличие каналов в видимом, ближнем инфракрасном и коротковолновом инфракрасном диапазонах позволяет эффективно различать типы земного покрова на основе их отражательной способности. Это делает Sentinel-2 особенно эффективным инструментом для дешифрирования лесной растительности и оценки её пространственного распределения.

Несмотря на перечисленные преимущества, использование Sentinel-2 связано с рядом ограничений. Одним из основных факторов, влияющих на качество данных, является облачность. Облачный покров может полностью или частично закрывать поверхность Земли, что делает невозможным использование отдельных сцен или требует их дополнительного отбора. Это особенно актуально для территорий с переменной облачностью в течение года.

Другим ограничением является сезонная изменчивость спектральных характеристик объектов. Растительность в разные периоды года имеет различные спектральные свойства, связанные с фенологическими фазами. Например, в период активной вегетации отражательная способность растительности существенно отличается от осеннего или ранневесеннего периода. Это требует строгого подбора временных интервалов при сравнительном анализе данных.

Также необходимо учитывать влияние атмосферных условий, таких как аэрозоли, влажность и рассеяние излучения. Эти факторы могут искажать спектральные значения и снижать точность классификации. В связи с этим

ВКР УлГУ

использование атмосферно скорректированных продуктов является обязательным этапом подготовки данных к анализу.

Дополнительным ограничением является пространственное разрешение данных. Несмотря на достаточную детализацию для задач масштаба 1:100 000, мелкие объекты и узкие линейные элементы могут быть неразличимы или недостаточно точно отображены. Это накладывает ограничения на точность векторизации границ лесных массивов и требует применения методов обобщения и экспертной корректировки.

Следует также учитывать, что результаты классификации спутниковых данных зависят от выбранного метода обработки и качества обучающих выборок. При использовании полуавтоматических методов, таких как контролируемая классификация, важную роль играет корректность выбора эталонных участков. Ошибки на этом этапе могут приводить к систематическим искажениям результатов.

В рамках данной работы использование данных Sentinel-2 осуществляется с учётом перечисленных ограничений и с применением предварительной обработки, включающей перепроецирование, обрезку по исследуемой территории и визуальный контроль качества. Это позволяет повысить достоверность результатов и обеспечить их сопоставимость с историческими топографическими материалами [18, 21].

Таким образом, Sentinel-2 представляет собой мощный инструмент для анализа земной поверхности, обладающий высокой информативностью и широкими возможностями применения. При этом его использование требует учета ряда ограничений, связанных с атмосферными условиями, сезонностью и пространственным разрешением, что является важным условием корректного выполнения геоинформационного анализа и обновления картографических данных.

ВКР УлГУ

Глава 3. Методы дешифрирования и ГИС-обработки пространственных данных

3.1. Визуальное и автоматизированное дешифрирование спутниковых изображений

Дешифрирование спутниковых изображений представляет собой процесс распознавания и интерпретации объектов земной поверхности по данным дистанционного зондирования. В геоинформационной практике данный процесс является ключевым этапом преобразования растровой информации в тематические пространственные данные, пригодные для анализа и картографирования. В зависимости от используемых методов выделяют визуальное и автоматизированное (в том числе полуавтоматизированное) дешифрирование.

Визуальное дешифрирование основано на интерпретации изображения оператором с использованием комплекса дешифровочных признаков. К таким признакам относятся тон и цвет объекта, его форма, размер, текстура, структура, тень, а также пространственное положение и взаимосвязь с другими объектами. Данный подход опирается на опыт и квалификацию исследователя и позволяет учитывать контекстные особенности территории, которые могут быть не формализованы в алгоритмах автоматической классификации.

При визуальном дешифрировании лесных массивов на спутниковых снимках, в частности Sentinel-2, основное внимание уделяется спектральным характеристикам растительности, выраженным в различных цветовых композитах. Использование комбинации каналов, включая ближний инфракрасный диапазон, позволяет существенно повысить контрастность между лесной растительностью и другими типами земного покрова. В результате лесные территории приобретают характерные оттенки, что облегчает их визуальное выделение и последующую векторизацию [17].

ВКР УдГУ

Визуальный метод обладает рядом преимуществ, включая высокую гибкость интерпретации, возможность учёта сложных ландшафтных ситуаций и адаптацию к специфике исследуемой территории. Однако он также имеет ограничения, связанные с субъективностью результатов, зависимостью от квалификации исполнителя и трудоёмкостью обработки больших массивов данных. При анализе значительных по площади территорий данный подход может быть недостаточно эффективным без использования автоматизированных методов.

Автоматизированное дешифрирование основано на применении алгоритмов обработки изображений, позволяющих классифицировать пиксели или группы пикселей на основе их спектральных характеристик. В основе таких методов лежит предположение о том, что объекты одного класса обладают сходными спектральными свойствами в различных диапазонах электромагнитного спектра. В результате каждому пикселю присваивается определённая тематическая категория, например «лес», «вода», «сельскохозяйственные земли» и другие.

Существует несколько основных типов автоматизированной классификации: неконтролируемая, контролируемая и объектно-ориентированная. Неконтролируемая классификация предполагает автоматическое группирование пикселей в кластеры без предварительной информации о классах. Контролируемая классификация, напротив, основывается на использовании обучающих выборок, заданных пользователем, что позволяет повысить точность распознавания объектов. Объектно-ориентированные методы дополнительно учитывают пространственные характеристики групп пикселей, что делает их более приближенными к человеческому восприятию изображения.

В рамках данной работы использовался полуавтоматический подход к дешифрированию, реализованный с применением инструментария программной среды QGIS и модуля Semi-Automatic Classification Plugin. Данный подход сочетает элементы визуального и автоматизированного

ВКР УлГУ

анализа, позволяя формировать обучающие выборки на основе визуальной интерпретации и последующего выполнения классификации алгоритмическими методами [3, 25].

Полуавтоматизированные методы позволяют существенно снизить трудоёмкость обработки данных при сохранении достаточного уровня точности. В частности, использование обучающих выборок обеспечивает адаптацию алгоритма к конкретным условиям исследуемой территории, включая особенности спектрального отклика лесной растительности, почв и других типов земного покрова.

Важным этапом автоматизированного дешифрирования является постобработка результатов классификации. Она включает устранение шумов, фильтрацию мелких артефактов, сглаживание границ объектов и объединение смежных областей одного класса. Данные процедуры необходимы для повышения тематической и пространственной достоверности итоговых слоёв.

Следует отметить, что независимо от используемого метода дешифрирования, обязательным является этап верификации результатов. Он может включать визуальное сопоставление с исходными спутниковыми изображениями, сравнение с дополнительными источниками данных, а также экспертную корректировку полученных контуров. Это особенно важно при работе с лесными территориями, где спектральные характеристики могут пересекаться с другими типами растительного покрова [22].

Таким образом, визуальное и автоматизированное дешифрирование представляют собой взаимодополняющие подходы к интерпретации спутниковых изображений. Их совместное использование позволяет повысить точность и эффективность выделения объектов земной поверхности и обеспечивает надежную основу для последующего геоинформационного анализа и обновления картографических данных.

ВКР УлГУ

3.2. Спектральный анализ и индикаторы растительности

Спектральный анализ является одним из ключевых методов обработки данных дистанционного зондирования Земли, основанным на изучении особенностей отражательной способности объектов в различных диапазонах электромагнитного спектра. Каждый тип земного покрова обладает уникальным спектральным откликом, который формируется под воздействием его физических и биологических свойств. Благодаря этому становится возможным количественное и качественное разделение объектов по их спектральным характеристикам.

В рамках анализа растительного покрова особое значение имеет ближний инфракрасный диапазон, поскольку здоровая растительность характеризуется высоким уровнем отражения в этой области спектра. В сочетании с низким отражением в красном диапазоне это свойство позволяет эффективно выделять лесные массивы и оценивать их состояние.

Одним из наиболее распространённых инструментов спектрального анализа является использование вегетационных индексов. Эти индексы представляют собой математические преобразования значений спектральных каналов, позволяющие усилить различия между классами объектов и минимизировать влияние внешних факторов, таких как освещённость или атмосферные условия. Наиболее известным и широко применяемым индексом является нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), который основан на соотношении отражения в ближнем инфракрасном и красном диапазонах.

Применение NDVI позволяет количественно оценивать плотность и состояние растительности, а также проводить пространственное сравнение различных участков территории. Более высокие значения индекса, как правило, соответствуют густой и здоровой растительности, тогда как низкие значения характерны для открытых почв, застроенных территорий и водных объектов. Несмотря на это, интерпретация индекса требует учета сезонных факторов и особенностей конкретной территории [12].

ВКР УлГУ

Помимо NDVI, в практике дистанционного зондирования используются и другие спектральные индексы, позволяющие уточнять характеристики земного покрова. Индексы, основанные на SWIR-диапазоне, применяются для оценки влажности растительности и почв, а также для разделения различных типов растительных сообществ. Однако в рамках данной работы основное внимание уделяется именно анализу растительного покрова и выделению лесных массивов.

Спектральный анализ тесно связан с процессом классификации спутниковых изображений, поскольку именно спектральные признаки лежат в основе алгоритмов автоматизированного дешифрирования. В программной среде QGIS спектральные характеристики используются как входные данные для построения классификационных моделей и последующего выделения тематических классов земного покрова.

При анализе лесной растительности важную роль играет сочетание спектральных каналов, позволяющее визуально и алгоритмически выделять границы лесных массивов. В частности, комбинации с использованием ближнего инфракрасного диапазона обеспечивают высокий контраст между лесом и другими типами земной поверхности, что значительно упрощает процесс дешифрирования [5].

Следует учитывать, что спектральные характеристики объектов зависят от множества факторов, включая сезонность, влажность, тип растительности и угол освещения. В связи с этим при сравнительном анализе разновременных данных необходимо обеспечивать сопоставимость условий съёмки, что является важным условием корректного выявления изменений.

В рамках данной работы спектральный анализ применяется как основа для выделения лесного покрова на современных спутниковых изображениях и последующего сопоставления с историческими данными топографической карты. При этом территория исследования охватывает ряд административных районов Удмуртской Республики, включая Увинский, Якшур-Бодьинский,

ВКР УдГУ

Игринский и Завьяловский районы, что обеспечивает комплексный характер анализа изменений лесных массивов на межрайонном уровне.

Таким образом, спектральный анализ и индикаторы растительности являются важнейшими инструментами обработки данных дистанционного зондирования, обеспечивающими количественную и качественную оценку состояния растительного покрова и создающими основу для автоматизированного и полуавтоматизированного дешифрирования спутниковых изображений.

3.3. Полуавтоматическая классификация в QGIS с использованием SCP

Полуавтоматическая классификация спутниковых изображений представляет собой метод обработки данных дистанционного зондирования, сочетающий элементы визуального дешифрирования и автоматизированных алгоритмов распознавания объектов. Данный подход позволяет повысить точность выделения классов земного покрова за счёт использования обучающих выборок, формируемых оператором на основе визуального анализа спутникового изображения.

В рамках данной работы полуавтоматическая классификация выполнялась в программной среде QGIS с использованием расширения Semi-Automatic Classification Plugin (SCP). Данный инструмент предназначен для обработки мультиспектральных данных дистанционного зондирования и обеспечивает полный цикл работ: от предварительной подготовки изображений до выполнения классификации и оценки её точности [24].

Основой метода является формирование обучающих выборок, представляющих собой наборы пикселей, соответствующих определённым классам земного покрова. В рамках настоящего исследования основными классами являлись лесная растительность и нелесные территории. Обучающие выборки создаются оператором на основе визуальной интерпретации

ВКР УдГУ

спутникового изображения с учётом спектральных и пространственных характеристик объектов.

После формирования обучающих выборок осуществляется построение спектральных характеристик классов, которые используются алгоритмом классификации для последующего распределения всех пикселей изображения по заданным категориям. Таким образом, каждый пиксель получает принадлежность к определённому классу на основе его спектрального отклика во всех используемых каналах.

В полуавтоматической классификации могут применяться различные алгоритмы, включая метод максимального правдоподобия, спектрального угла и другие статистические методы. Выбор конкретного алгоритма определяется характером исходных данных и требованиями к точности классификации. В практической части работы акцент сделан на обеспечении устойчивого разделения лесных и нелесных территорий с учётом особенностей спектральных характеристик данных Sentinel-2 [16].

Важным этапом является предварительная обработка данных, включающая геометрическую коррекцию, перепроецирование и обрезку по границам исследуемой территории. Эти операции необходимы для обеспечения корректного пространственного соответствия данных и исключения влияния внешних факторов, способных исказить результаты классификации.

После выполнения автоматической классификации осуществляется постобработка полученного растра. Она включает удаление шумовых пикселей, сглаживание границ классов, а также объединение мелких разрозненных участков в более крупные полигоны. Данные операции позволяют повысить пространственную согласованность результатов и привести их к виду, пригодному для дальнейшей векторизации и картографического анализа.

Отдельное значение имеет этап оценки точности классификации. Он заключается в сравнении результатов автоматического выделения классов с

ВКР УлГУ

исходными обучающими выборками или контрольными участками. Данный этап позволяет определить степень достоверности полученных результатов и выявить возможные ошибки классификации, связанные с перекрытием спектральных характеристик различных типов земного покрова.

Использование SCP в рамках данной работы обеспечивает значительное упрощение процесса обработки спутниковых данных за счёт интеграции всех этапов в единую программную среду. Это позволяет эффективно работать с многоканальными изображениями, выполнять классификацию и сразу переходить к анализу результатов без необходимости использования стороннего программного обеспечения.

Следует отметить, что качество полуавтоматической классификации напрямую зависит от корректности выбора обучающих выборок. Недостаточная репрезентативность или ошибочная интерпретация эталонных участков может привести к систематическим искажениям результатов. В связи с этим особое внимание уделяется этапу визуального анализа исходных данных и тщательному подбору обучающих полигонов [15].

Таким образом, полуавтоматическая классификация с использованием Semi-Automatic Classification Plugin в среде QGIS представляет собой эффективный метод обработки данных дистанционного зондирования, позволяющий сочетать преимущества автоматизированного анализа и экспертного дешифрирования. Данный подход обеспечивает получение достоверных пространственных данных, необходимых для последующего анализа изменений лесного покрова и обновления топографической карты.

3.4. Ошибки классификации и особенности интерпретации результатов

Процесс классификации спутниковых изображений, несмотря на использование современных алгоритмов обработки данных дистанционного зондирования, неизбежно сопровождается возникновением ошибок. Эти

ВКР УлГУ

ошибки обусловлены как особенностями исходных данных, так и ограничениями применяемых методов распознавания объектов. В связи с этим анализ ошибок классификации и корректная интерпретация результатов являются обязательными этапами геоинформационной обработки.

Одним из основных источников ошибок является спектральное перекрытие классов земного покрова. Различные объекты могут иметь схожие спектральные характеристики в отдельных диапазонах электромагнитного спектра, что затрудняет их корректное разделение. Например, лесная растительность и кустарниковые сообщества, а также сельскохозяйственные культуры в определённых фазах вегетации могут демонстрировать близкие значения отражательной способности, что приводит к ошибкам отнесения пикселей к неверному классу [17].

Другим важным фактором является влияние сезонных и фенологических изменений растительности. Спектральные характеристики лесных массивов существенно изменяются в зависимости от времени года, уровня влажности и стадии вегетации. При использовании разновременных данных без строгой временной синхронизации могут возникать расхождения в классификации, которые не связаны с реальными изменениями земного покрова.

Существенное влияние на точность классификации оказывают атмосферные условия, включая облачность, дымку и аэрозольное загрязнение. Даже при использовании атмосферно скорректированных продуктов возможны остаточные искажения спектральных значений, которые влияют на результаты автоматизированного дешифрирования. В связи с этим при выборе спутниковых сцен особое внимание уделяется их качеству и степени облачного покрытия.

Ошибки классификации также могут быть связаны с недостаточной репрезентативностью обучающих выборок. Если эталонные участки не в полной мере отражают спектральное разнообразие классов земного покрова, алгоритм может некорректно интерпретировать пиксели на изображении. Это

ВКР УлГУ

особенно актуально при работе с неоднородными природными комплексами, характерными для лесных территорий.

С точки зрения структуры ошибок выделяют два основных типа: ошибки включения и ошибки пропуска. Ошибки включения возникают в случае, когда пиксели, не относящиеся к определённому классу, ошибочно включаются в него. Ошибки пропуска, напротив, проявляются в виде исключения пикселей, которые фактически принадлежат данному классу, но не были распознаны алгоритмом.

Для оценки качества классификации в геоинформационной практике применяются методы точностного анализа, основанные на сравнении результатов классификации с контрольными данными. Одним из распространённых подходов является построение матрицы ошибок, позволяющей количественно оценить долю правильно и неправильно классифицированных объектов. На основе данной матрицы могут рассчитываться показатели общей точности и коэффициенты согласия.

В рамках данной работы интерпретация результатов классификации выполняется с учётом возможных погрешностей и ограничений исходных данных. Особое внимание уделяется визуальной проверке полученных контуров лесных массивов и их сопоставлению с исходными спутниковыми изображениями. Такой подход позволяет выявлять и корректировать локальные ошибки классификации, особенно в зонах переходных типов земного покрова.

Дополнительной особенностью интерпретации результатов является необходимость учета масштабных ограничений исходных данных. При работе с данными Sentinel-2 пространственное разрешение 10 метров обеспечивает достаточную детализацию для анализа лесных массивов, однако не позволяет фиксировать мелкие фрагменты растительности и узкие переходные зоны. Это может приводить к обобщению границ объектов и частичной потере мелкомасштабной информации.

ВКР УлГУ

Следует также учитывать, что результаты классификации представляют собой модельное представление реальной территории, а не её абсолютное отражение. В связи с этим итоговые данные требуют обязательной экспертной интерпретации и сопоставления с дополнительными источниками информации, включая исторические топографические материалы и результаты визуального дешифрирования [5, 23].

Таким образом, ошибки классификации являются неотъемлемой частью процесса обработки данных дистанционного зондирования. Их анализ и учет позволяют повысить достоверность итоговых результатов и обеспечить корректную интерпретацию пространственных данных, используемых при обновлении топографических карт и исследовании изменений лесного покрова.

ВКР УдГУ

Глава 4. Практическая реализация обновления лесного покрова

4.1. Исходные данные и характеристика территории исследования

В качестве исходных данных использованы топографическая карта Генерального штаба масштаба 1:100 000 (лист О-39-106, СК-42) (рис. 1) и многоспектральные спутниковые данные Sentinel-2, полученные через Google Earth Engine.

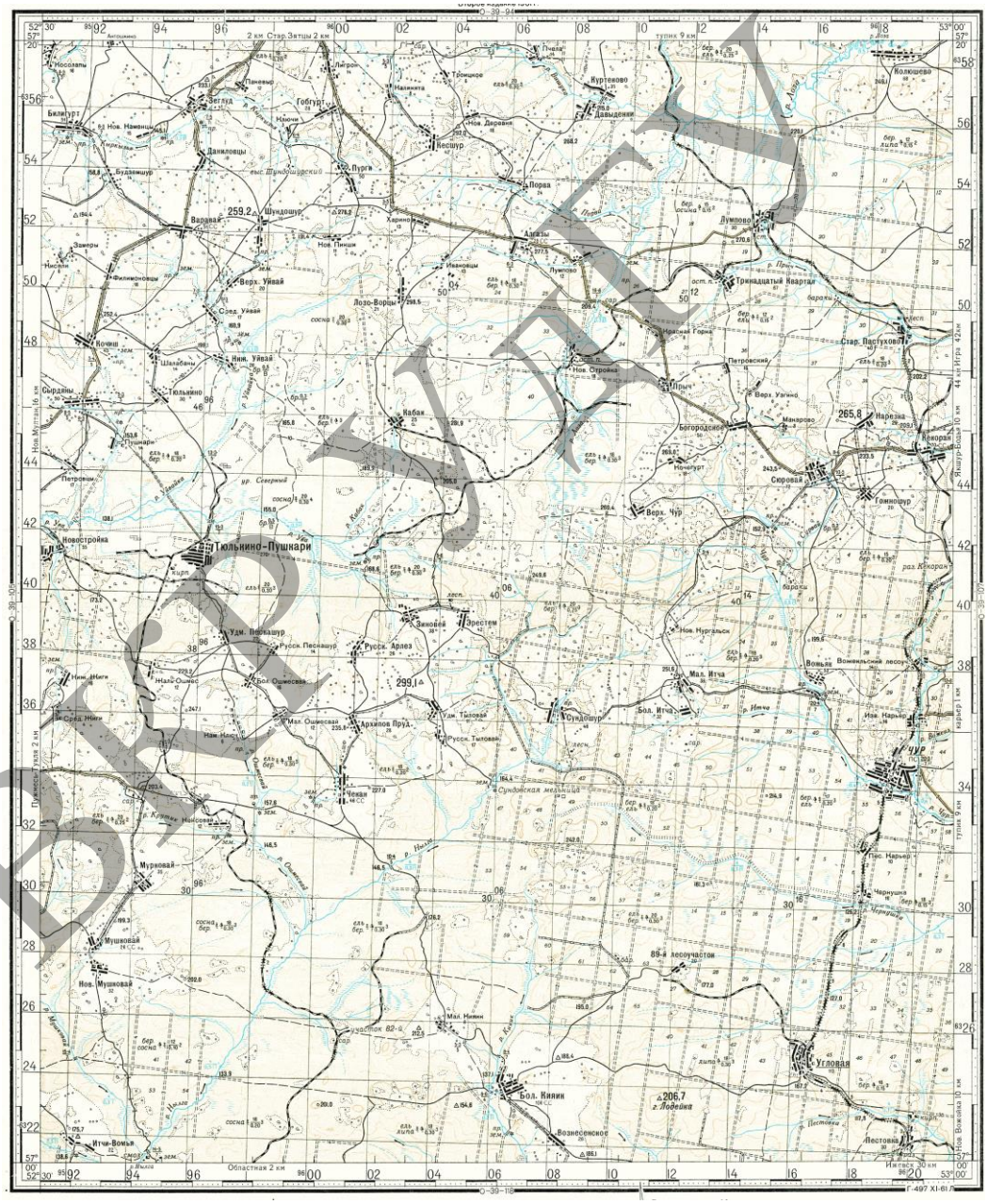


Рис. 1. Топографическая карта Генштаба

Данные обеспечивают сопоставление состояния лесного покрова на временном интервале более 60 лет.

ВГЛТУ

Топографическая карта была геопривязана и приведена к системе координат EPSG:3857 для обеспечения совмещения со спутниковыми данными в QGIS 3. В качестве опорных объектов использовались устойчивые элементы местности (гидрография и крупные лесные массивы), что позволило минимизировать пространственные искажения.

Спутниковые данные Sentinel-2 включают каналы B2, B3, B4, B8, B11 и B12. На их основе сформирована мультиспектральная композиция, а также ложноцветное изображение 8-4-3, используемое для дешифрирования лесной растительности по характерному спектральному отклику (рис. 2).

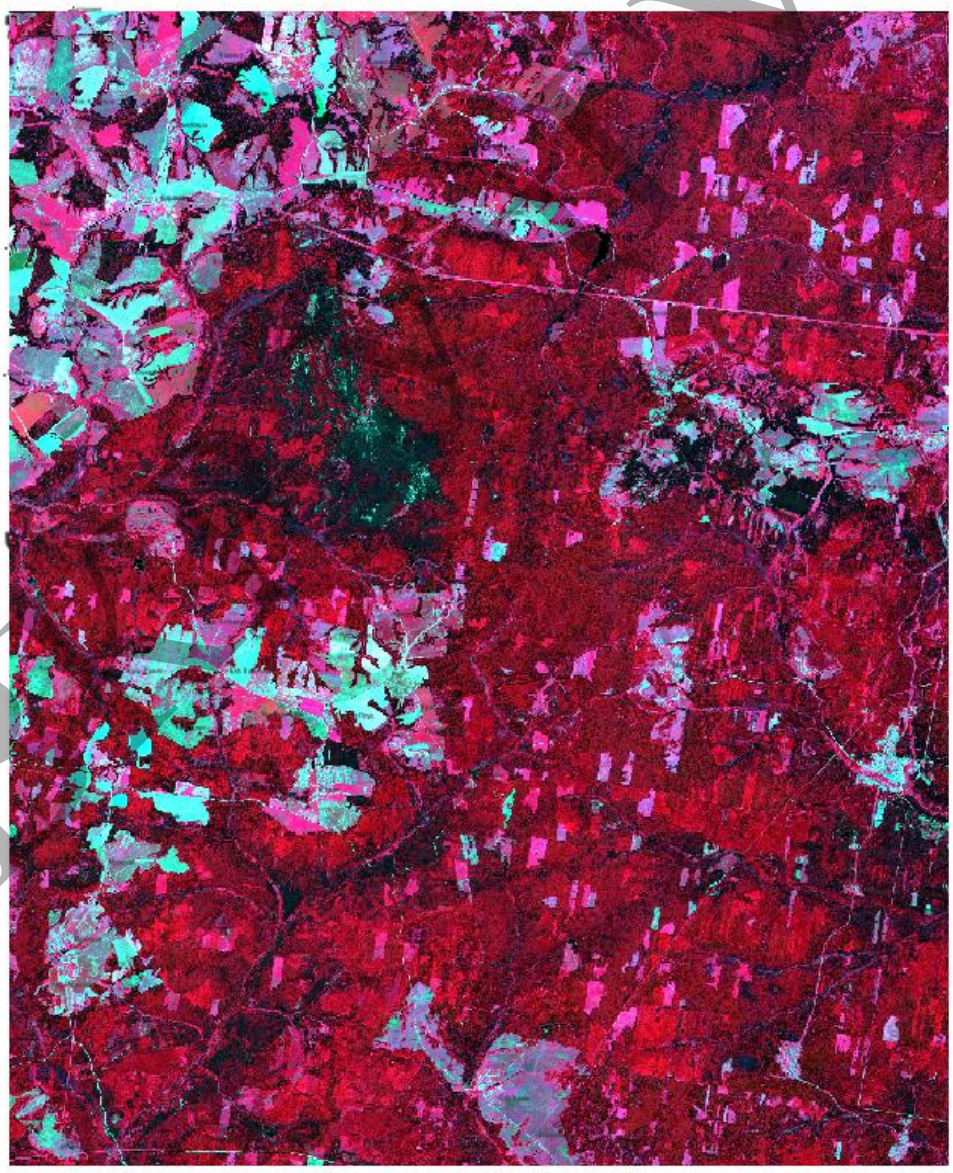


Рис. 2. Ложноцветная композиция 8-4-3: леса отображены красным цветом, вода чёрным, поля зелёно-жёлтым.

Территория исследования охватывает часть Удмуртской Республики в пределах листа О-39-106 и включает участки Увинского, Якшур-Бодьинского, Игринского и Завьяловского районов. Территория характеризуется равнинным рельефом и преобладанием лесных и сельскохозяйственных ландшафтов, что делает её показательной для анализа динамики лесного покрова.

4.2. Подготовка и обработка топографической карты Генштаба

Исходная топографическая карта масштаба 1:100 000 (лист О-39-106) была загружена в QGIS и приведена к географической привязке. В результате геопривязки выполнено преобразование из системы координат СК-42 в EPSG:3857, что обеспечило дальнейшую интеграцию с данными дистанционного зондирования.

После привязки карта была приведена к рабочему виду для векторизации: выполнена коррекция положения растра, устранение локальных искажений и визуальная проверка совпадения контуров с современными базовыми подложками. Особое внимание уделялось сохранению конфигурации лесных массивов как основного объекта дальнейшего анализа.

На следующем этапе выполнена ручная векторизация лесных контуров. (рис. 3). Оцифровка проводилась по визуально различимым границам условных знаков лесной растительности. В результате сформирован полигональный слой, содержащий лесные массивы с атрибутивной идентификацией. Общая структура слоя приведена к топологически корректному виду: устранены пересечения, разрывы и незамкнутые полигоны, проведена проверка геометрий средствами QGIS.

ВКР УдГУ

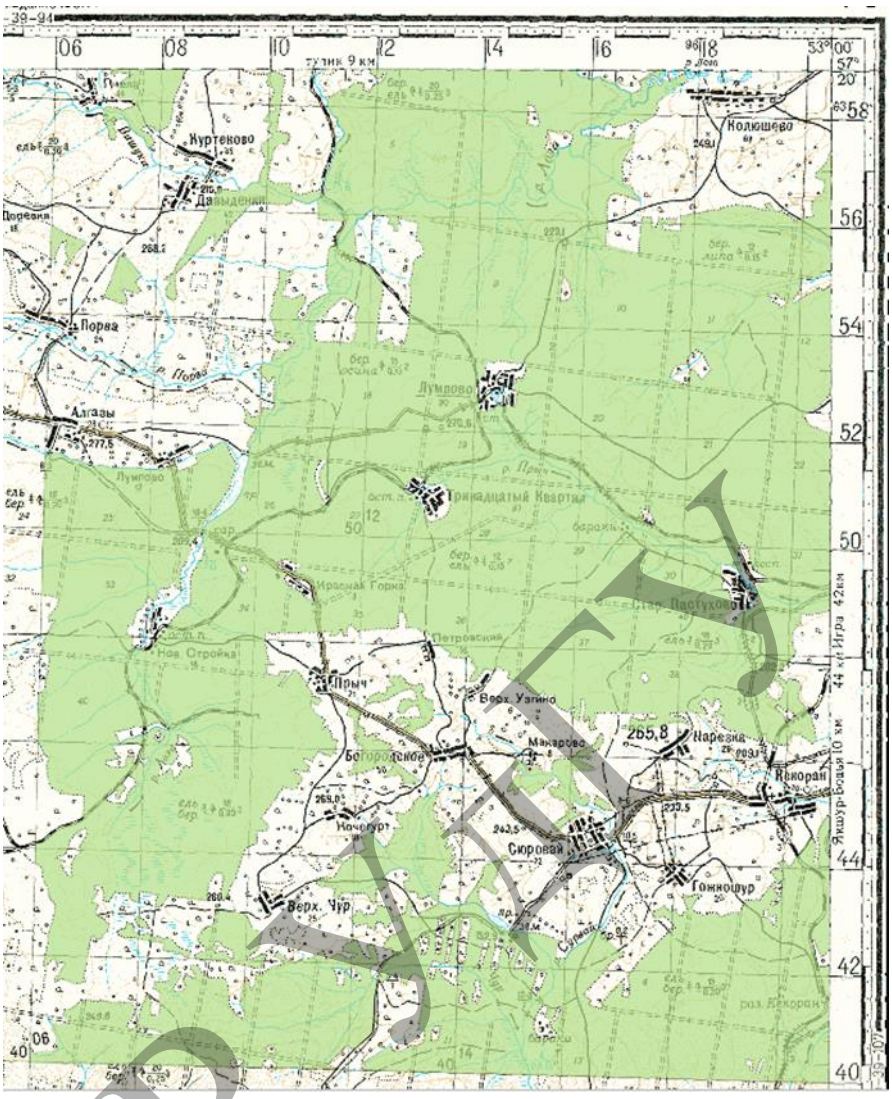


Рис.3. Векторизованный слой леса на фрагменте топокарты Генштаба в QGIS

Дополнительно для каждого полигона рассчитана площадь, что позволило сформировать количественную основу для последующего сравнения с данными спутникового дешифрирования. Данный слой в дальнейшем использовался как базовое состояние лесного покрова, отражающее ситуацию середины XX века.

4.3. Подготовка и обработка спутниковых данных Sentinel-2

Для выполнения современного этапа анализа лесного покрова использованы многоспектральные данные Sentinel-2 за июнь–июль 2025 года. Выбор данного периода обусловлен минимальной облачностью и

ВКР УдГУ

максимальной информативностью летнего спектрального отклика растительности.

На первом этапе выполнена загрузка и первичная подготовка спектральных каналов B2, B3, B4, B8, B11 и B12. Данные были объединены в единый мультиспектральный растр, после чего выполнено перепроецирование в систему EPSG:3857 и обрезка по границам исследуемого фрагмента топографической карты. Это обеспечило пространственное соответствие между топографической картой и современными спутниковыми данными.

Для визуального дешифрирования лесной растительности сформирована ложноцветная композиция 8-4-3, в которой лесные территории уверенно выделяются в красных оттенках за счёт высокого отражения в ближнем инфракрасном диапазоне. Безлесные территории (поля, застройка, открытые участки) отображаются в зелёно-сине-жёлтой гамме, что позволяет чётко дифференцировать классы земного покрова.

Дополнительно для повышения интерпретируемости данных использовался Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) в QGIS (рис. 4). На основе обучающих выборок были заданы классы «лес» и «не лес», после чего выполнена полуавтоматическая классификация мультиспектрального растра. Полученный результат был преобразован в векторный слой, который прошёл этап постобработки: сглаживание границ, удаление шумов классификации и исправление геометрии полигонов.

ВКР УлГУ

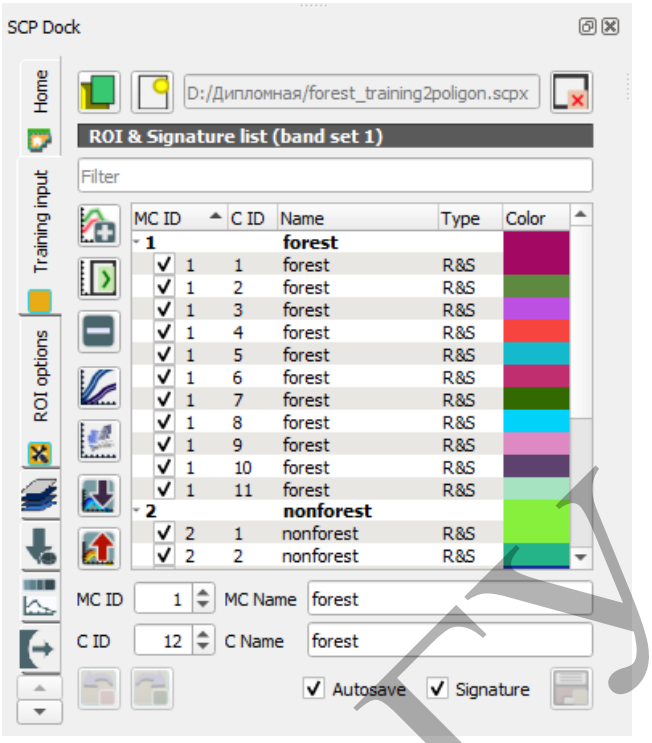


Рис. 4. Панель инструментария SCP Dock

В результате сформирован актуальный слой лесного покрова на 2025 год (рис. 5), использованный для дальнейшего сопоставления с топографической основой. Данный подход позволил совместить визуальное дешифрирование и автоматизированную классификацию, повысив достоверность выделения лесных массивов в условиях сложной мозаичной структуры ландшафта.

ВКР УлГУ

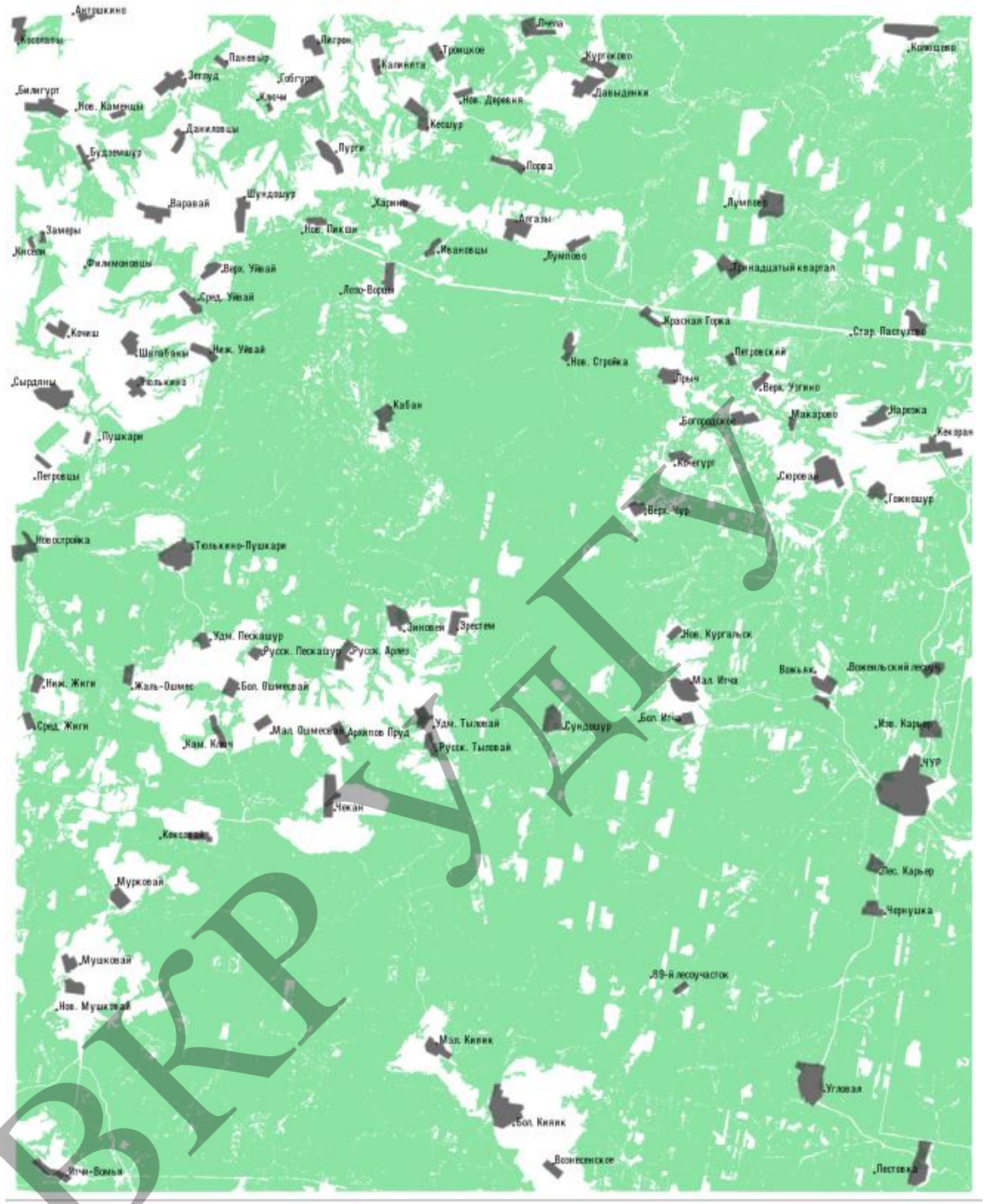


Рис. 5. Оцифрованный слой лесного покрова на 2025 год

4.4. Классификация и построение векторных слоёв лесного покрова

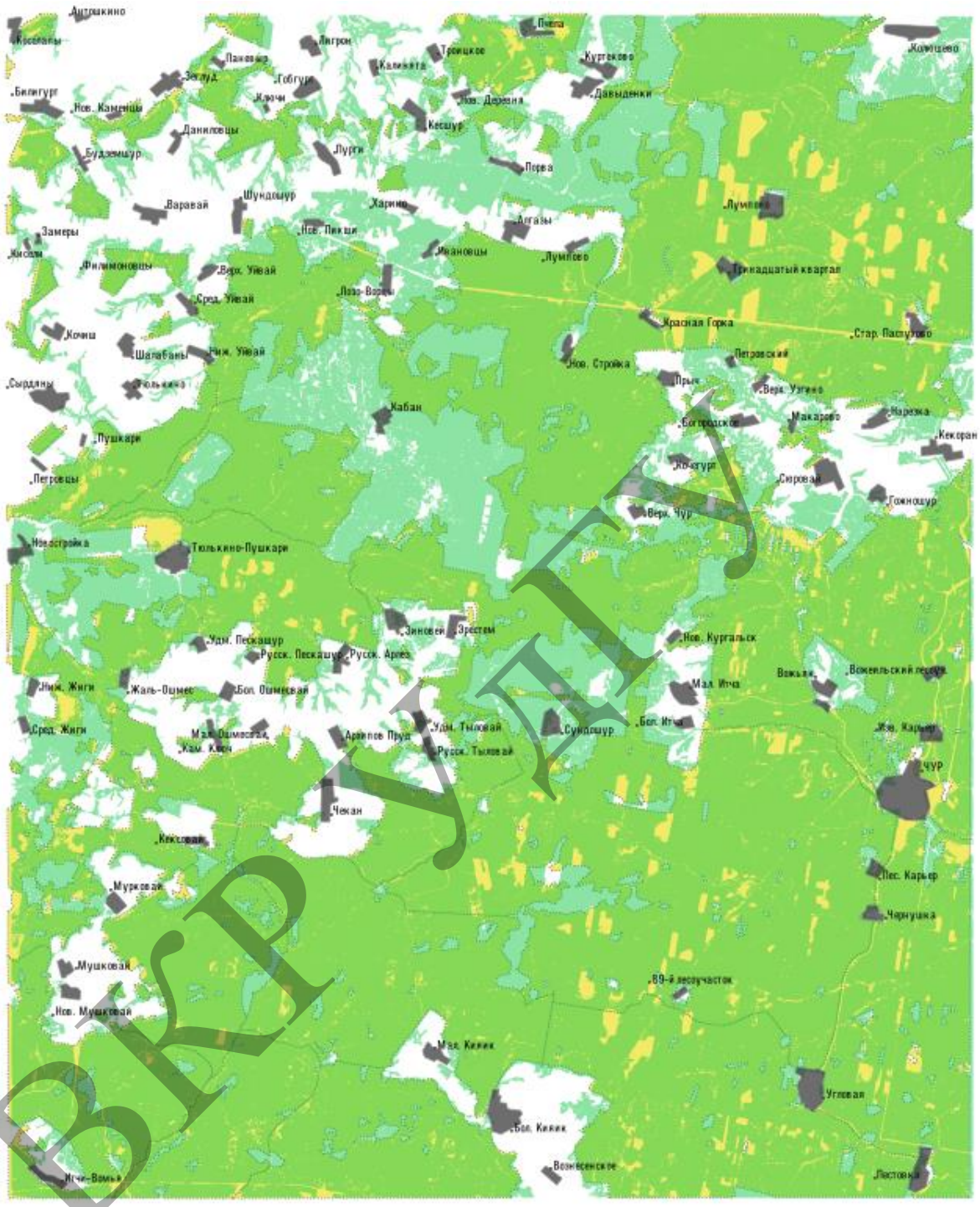
Заключительный этап практической части работы включал классификацию спутникового изображения Sentinel-2, формирование векторного слоя современного лесного покрова и последующее сопоставление

ВКР УдГУ

полученных данных с лесными контурами, оцифрованными по топографической карте Генерального штаба.

Сопоставление исторического и современного векторных слоёв выполнялось методом наложения. В результате были выделены три основные категории изменений: участки совпадения лесных контуров, зоны появления новых лесных массивов и территории сокращения лесного покрова (рис. 6). Участки совпадения, отображённые зелёным цветом, характеризуют территории, где границы лесов за рассматриваемый период практически не изменились. Бирюзовым цветом выделены зоны появления новых лесов, а жёлтым — территории, на которых лесной покров был утрачен.

ВКР УлГУ



ВКР УдГУ

Рис. 6. Наложения двух векторных слоёв : бирюзовый цвет — современные леса по снимку Sentinel-2, желтый цвет — леса по карте Генштаба 1960-х годов, зеленый цвет — леса не претерпевшие изменений.

Количественный анализ показал увеличение общей площади лесов с 676,6 км² по топографической карте до 797 км² по современным спутниковым данным. Полученный прирост, составивший 120,4 км², указывает на

преобладание процессов восстановления древесной растительности в пределах исследуемой территории.

Наиболее интенсивное увеличение лесной площади выявлено в северо-восточной части исследуемого листа, охватывающей территории Якшур-Бодьинского и Игринского районов. В районах Верхнего Чура, Сюровая, Кекорана, Куртеково, Давыденок, Лумпово, Колюшево и территории бывшего населённого пункта Тринадцатый Квартал зафиксировано формирование значительного количества новых лесных массивов. Вероятно, данные изменения связаны с постепенным сокращением хозяйственного использования земель и естественным зарастанием ранее освоенных территорий древесной растительностью.

В центральной части территории, в районе населённых пунктов Новые Пикши, Красная Горка и Старое Пастухово, выявлена крупная линейная просека, отсутствующая на топографической карте 1960-х годов. По современным спутниковым данным на данном участке проходит линия электропередачи, строительство и эксплуатация которой потребовали формирования устойчивого безлесного коридора, разделившего ранее единый лесной массив.

В северо-восточной и юго-восточной частях карты в пределах лесных просек выявлены многочисленные локальные участки сокращения лесного покрова. Они представлены относительно небольшими территориями правильной геометрической формы, что позволяет связать их происхождение с хозяйственной деятельностью, включая лесозаготовку, санитарные рубки или расчистку отдельных участков.

В северо-западной части существенных изменений сельскохозяйственного землепользования не зафиксировано — в районах деревень Билигурт и Варавай структура открытых сельскохозяйственных территорий в целом сохраняется. При этом в районах Харина и Порвы территории, ранее представленные редколесьем, в настоящее время характеризуются формированием более плотного лесного покрова.

ВКР УдГУ

Аналогичная ситуация наблюдается в районе бывшего населённого пункта Пчела, где сокращение хозяйственной активности сопровождалось естественным зарастанием территории.

Одновременно значительные процессы лесовосстановления наблюдаются и в других частях территории исследования. В центральной части исследуемого участка в районах Сундошура и Кабана также отмечается формирование новых лесных массивов, что, вероятно, связано с прекращением активного использования прилегающих земель. В целом по территории исследования фиксируются как небольшие локальные вырубки, так и обратные процессы зарастания ранее открытых участков, что формирует выраженно неоднородную пространственную структуру изменений.

В юго-западной части листа, преимущественно в пределах Увинского района, существенных изменений не выявлено. В районах Большого Ошмесвая, Эрестема и Чекана границы лесных массивов остаются практически неизменными. Отдельно можно отметить процессы зарастания в районе Средних Жиг и территории Тюлькино–Пушкарей, где также наблюдается сокращение хозяйственного освоения.

Для юго-восточной части территории, охватывающей Якшур-Бодьинский и частично Завьяловский районы, характерно появление отдельных небольших безлесных фрагментов внутри крупных лесных массивов, преимущественно в пределах существующих просек. В то же время в районах Вожьяка и Вожеильского лесоучастка отмечается зарастание территорий лесной растительностью на фоне прекращения постоянного использования. В районе Большого и Малого Кияика изменений лесного покрова не зафиксировано.

Таким образом, проведённая классификация и построение векторных слоёв лесного покрова позволили выявить пространственно неоднородные изменения на территории исследования. Общая тенденция свидетельствует о преобладании процессов естественного лесовосстановления, несмотря на

ВКР УдГУ

наличие локальных участков сокращения лесных массивов, обусловленных хозяйственной деятельностью и развитием инфраструктуры.

ВКР УдГУ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы реализовано обновление топографической карты масштаба 1:100 000 на территории Удмуртской Республики на основе сопоставления карты Генерального штаба и современных спутниковых данных Sentinel-2 с использованием геоинформационных технологий.

В процессе работы выполнены подготовка исходных данных, геопривязка и векторизация лесных контуров по топографической карте, обработка спутниковых данных, а также классификация лесного покрова с применением инструмента SCP в программной среде QGIS.

В результате сопоставления полученных данных выявлены изменения лесного покрова за период с 1960-х годов до настоящего времени. Установлено увеличение площади лесов с 676,6 км² до 797 км², что свидетельствует о преобладании процессов лесовосстановления при наличии локальных участков антропогенного сокращения лесной растительности.

Полученные результаты подтвердили эффективность применения данных дистанционного зондирования Земли и ГИС-технологий для обновления топографической информации и анализа изменений природных компонентов территории.

ВКР УдГУ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по топографической съёмке масштаба 1:100 000. — М.: ГУГК, 1980. — 312 с.
2. Методические указания по обновлению топографических карт. — М.: Роскартография, 2003. — 184 с.
3. Берлянт А. М. Картография: учебник. — М.: Аспект Пресс, 2011. — 448 с.
4. Бондур В. Г. Космическая информация в науках о Земле. — М.: Наука, 2013. — 520 с.
5. Ефремов Ю. В. Геоинформационные системы. — М.: КНОРУС, 2018. — 320 с.
6. Корнилов А. Г. Картография и основы топографического черчения. — М.: Геодезиздат, 2010. — 384 с.
7. Кучерявенко А. С. Основы ДЗЗ в геоинформатике. — СПб.: Политех, 2016. — 296 с.
8. Лобанов В. А. Основы картографии. — М.: Недра, 2012. — 416 с.
9. Михайлов В. И. Дистанционное зондирование Земли. — М.: МИИГАиК, 2014. — 368 с.
10. Салищев К. А. Картоведение. — М.: МГУ, 2004. — 288 с.
11. Фокин С. В. Геодезия и картография. — М.: Высшая школа, 2015. — 352 с.
12. Congalton R. G., Green K. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data. — Springer, 2008. — 183 p.
13. Drusch M. et al. Sentinel-2 mission overview // Remote Sensing of Environment. — 2012. — Vol. 120. — P. 25–36.
14. ESA. Sentinel-2 User Handbook. — European Space Agency, 2021. — 64 p.
15. Jensen J. R. Introductory Digital Image Processing. — 2015. — 544 p.
16. Malenovský Z. et al. Remote sensing classification methods review. — 2012. — 30 p.
17. Richards J. A. Remote Sensing Digital Image Analysis. — Springer, 2013. — 494 p.

ВКР УлГУ

18. Toth C., Jóźków G. Remote sensing platforms and sensors // ISPRS Journal. — 2016. — 40 p.
19. ГОСТ 21667-76. Карты топографические. Общие требования. — М.: Госстандарт СССР, 1976.

Интернет-ресурсы

20. ESA. Sentinel-2 spectral bands description [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Режим доступа: https://sentinel.esa.int (дата обращения: 19.06.2026).
21. GIS-Lab. Документация и материалы по ДЗЗ [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Режим доступа: https://gis-lab.info/docs.html (дата обращения: 11.06.2026).
22. GIS-Lab. Классификация космических снимков в QGIS [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Режим доступа: https://wiki.gis-lab.info/w/Классификация_космического_снимка_с_обучением_с_помощью_QGIS_и_GRASS (дата обращения: 14.06.2026).
23. GIS-Lab. Условные обозначения и дешифрирование [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Режим доступа: https://gis-lab.info/docs.html#Условные_обозначения (дата обращения: 18.06.2026).
24. QGIS Documentation [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Режим доступа: https://docs.qgis.org (дата обращения: 19.06.2026).
25. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Режим доступа: https://semiautomaticclassificationmanual.readthedocs.io/en/latest/scp_dock.html (дата обращения: 18.06.2026).

ВКР УлГУ