

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий

Кафедра систем искусственного интеллекта

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ Г. М. Цибульский
подпись
« _____ » _____ 2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Анализ сезонных подтоплений объектов электросетевого комплекса по данным
дистанционного зондирования Земли

09.04.02 «Информационные системы и технологии»

09.04.02.01 «Информационно-управляющие системы»

Научный

руководитель

подпись, дата

доцент, канд. техн. наук

Р. В. Брежнев

Выпускник

подпись, дата

В. А. Рождественская

Рецензент

подпись, дата

доцент, канд. биол. наук

Е. В. Федотова

Нормоконтролер

подпись, дата

Р. В. Брежнев

Красноярск 2018

Продолжение титульного листа магистерской диссертации по теме:
«Анализ сезонных подтоплений объектов электросетевого комплекса по данным
дистанционного зондирования Земли»

Нормоконтролер

подпись, дата

Р. В. Брежнев

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Обзор существующих спутниковых программ.....	7
1.1 Анализ применения данных дистанционного зондирования Земли для исследования сезонных паводков.....	7
1.2 Обзор космических съемочных систем для анализа паводков	14
1.2.2 Выбор данных дистанционного зондирования Земли для анализа состояния сезонных подтоплений объектов электросетевого комплекса...	16
1.3 Вывод по главе 1	17
2 Основные этапы подготовки данных дистанционного зондирования Земли к дешифрированию паводков	19
2.1 Этапы первичной обработки данных дистанционного зондирования Земли для решения задачи локализации участков подтопления.....	19
2.2 Вывод по главе 2	21
3 Детектирование данных дистанционного зондирования Земли для решения задачи локализации участков затопления	23
3.1 Методика локализации участков затопления на основе обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли.....	24
3.1.1 Результаты выделения водных объектов по данным спутниковой системы Landsat-8	27
3.1.2 Сегментация участков затопления	32
3.1.3 Расчет показателей точности выделения водных объектов	39
3.2 Вывод по главе 3	46
Заключение	47
Список использованных источников	49
Приложение А Основные технические характеристики оптико-электронных спутников	54
Приложение Б Диаграмма деятельности методики локализации участков затопления.....	56

Приложение В Плакаты презентации	57
--	----

ВВЕДЕНИЕ

Представление снимков в цифровом формате дало широкие возможности для развития методов дешифрирования. Проблема дешифрирования в условиях возросшего количества данных и повышения требований к скорости анализа и интерпретации остается актуальной и позволяет решать следующие задачи: контроль за территориями, подверженными сезонным затоплениям, классификация водных поверхностей, применение космических снимков для оценки площади суши, подверженной затоплению, актуализация данных затопленных территорий.

Большой интерес данная проблема вызывает у современных ученых.

Так, например, в работе [1] была проведена классификация (рассчитаны значения индекса NDVI) с целью выделения областей подтопления. В статье [2] приводится описание методики оценки потенциального развития динамики зон затопления при прохождении паводковых вод и наводнений на основе анализа многолетних данных космического мониторинга.

Физические основы, принципы и технологии космического дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) изучены и освещены в работах А. А. Воробьевой, В. Б. Кашкина, А. И. Сухинина, Е. К. Сутыриной и другие.

Возможности обработки и интерпретации данных ДЗЗ определены в научных трудах С. А. Барталева, Е. А. Лупяна, О. С. Токаревой и другие. Методы анализа и классификации, компрессии, верификации и защиты данных космической съёмки, восстановления трёхмерной модели местности рассмотрены в работе М. В. Гашникова, Н. И. Глумова, Е. В. Гошина, А. Ю. Денисова и другие.

А также на сегодняшний день разработано большое количество различных методов дешифрирования космических снимков и соответствующие системы обработки и интерпретации данных, например, «ERDAS Imaging», «ERDAS ER Mapper», «ENVI», «MultiSpec» и программные продукты компании «СканЭкс».

Однако, несмотря на большое количество научных исследований, достижения в области полной автоматизации дешифрирования, при которой можно было бы исключить или существенно ограничить участие человека в получении географической информации по космическим снимкам, пока недостаточно развиты.

Цель научно-исследовательской работы: разработка методики обнаружения и локализации участков затопления объектов электросетевого комплекса по данным дистанционного зондирования Земли, позволяющая сформировать картосхему участков затопления для оказания информационной поддержки лицам, принимающим решения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) обзор и выделение критериев релевантности данных ДЗЗ для мониторинга состояния сезонных подтоплений объектов электросетевого комплекса;

2) разработка методики локализации участков затопления на основе обработки и анализа данных ДЗЗ;

3) проведение практической апробации разработанной методики на экспериментальной территории с использованием свободно распространяемых данных ДЗЗ.

Практическая значимость научно-исследовательской работы: разработка программно-методического комплекса для детектирования и локализации фактов затопления объектов электросетевого комплекса в период паводков.

1 Обзор существующих спутниковых программ

1.1 Анализ применения данных дистанционного зондирования Земли для исследования сезонных паводков

Обоснование актуальности темы исследования является основным требованием к исследовательской работе. Поэтому, для проведения анализа востребованности и доказательства актуальности темы научного исследования необходимо рассмотреть определение понятия «Актуальность».

Актуальность темы — форма доказательств соответствия выбранной темы, возникшим общественным потребностям и состоянию научного обеспечения предстоящего исследования. Степень важности актуальности темы в данный момент и в данной ситуации для решения данной проблемы (задачи). Означает необходимость решения проблемы в настоящий период времени, своевременность, соответствие потребностям дня [3].

Наземные объекты электросетевого комплекса характеризуются повышенным риском повреждений вследствие влияния природных и техногенных факторов, таких как:

- геологические (извержение вулканов, землетрясение, сели, обвалы, осыпи, лавины, склоновый смыв);
- метеорологические (ураганы, бури);
- гидрологические (высокие уровни воды, половодье, дождевые паводки, заторы и зажоры, ветровые нагоны);
- атмосферные (ливни, снегопады);
- чрезвычайные ситуации при прорыве плотин гидротехнических сооружений;
- наводнения при увеличении сбросов гидроэлектростанций (ГЭС);
- катастрофические наводнения при прорывах плотин ГЭС и так далее.

Одним из элементов наземных объектов являются опоры воздушных линий электропередачи (ВЛЭП), являющиеся значимым звеном в единой технологической цепи снабжения потребителей электроэнергией.

На опоры оказывают влияние такие природно-климатические явления, как затопления вследствие сезонных паводков, таяния снегов, ливней и так далее. Последствия перечисленных факторов возможно отслеживать с применением методов дистанционного зондирования Земли.

Само дистанционное зондирование Земли определяют, как процесс или метод получения информации об объекте, участке поверхности или явлении путем анализа данных, собранных без контакта с изучаемым объектом, обычно в виде изображения земной поверхности в определенных участках электромагнитного спектра [4].

Электросетевой комплекс — линии электропередачи, трансформаторные и иные подстанции, распределительные пункты и иное оборудование, предназначенное для обеспечения электрических связей и осуществления передачи электрической энергии, включая локальные системы противоаварийной автоматики, сети технологической связи, обеспечивающее управление единой энергосистемой Российской Федерации и поддержку оптового рынка электрической энергии (ОРЭЭ) [5].

Более половины всех перерывов в энергоснабжении обусловлено проблемами воздушных линий электропередачи. Значительная часть причин выхода ВЛЭП из работы являются форс-мажорными, и не могут быть предупреждены средствами оперативной диагностики. Это различные непредсказуемые атмосферные воздействия, природные и геологические особенности трассы линии электропередачи (ЛЭП) [6].

Итак, паводки и наводнения — это стихийные бедствия, охватывающие большие территории и превосходящие по наносимому ущербу все другие чрезвычайные ситуации.

Паводковая обстановка на территории Российской Федерации по сей день является одной из наиболее острых проблем требующей постоянного

оперативного мониторинга. В бассейнах рек уровень воды в период весенних половодья и в период дождевых паводков часто превышает расчетный уровень критических отметок подъема воды, что приводит к подтоплению территорий [7].

Космическая информация позволяет не только наблюдать развитие паводка или половодья, но и получать оперативный прогноз зон затопления, оценивать принесенный ущерб, выявлять участки, которым еще угрожает затопление и так далее. Основными преимуществами использования ДДЗ являются:

- космические снимки охватывают большие площади;
- высокая периодичность получения данных;
- возможность получить данные о труднодоступных областях.

Недостатки:

- требуется высокая квалификация и практический опыт оператора для их обработки;
- неэффективны при исследовании небольших территорий [8].

Мониторинг чрезвычайных ситуаций связанный с паводковой обстановкой, можно условно разделить на оперативный, и пространственно-временной. Первый ориентирован на быстрое обнаружение зон подтопления, определение их характеристик и оперативную передачу информации структурам МЧС России, подразделениям Росгидромета для оценки ситуации и принятия управленческих решений. Результаты пространственно-временного мониторинга представляют собой обобщенную характеристику чрезвычайных ситуаций, зафиксированных на контролируемой территории за определенный период времени (неделя, декада, месяц и так далее). По мере накопления информации формируются временные ряды результатов космического мониторинга, на основе анализа которых определяется частота попадания территории в зоны затопления.

Мониторинг должен опираться на ежедневные оперативные наблюдения за состоянием водных объектов. Руслу таких рек, как Енисей, Обь, Амур, Лена,

Волга и их комплексы слишком велики, чтобы при наземном изучении находиться в едином поле зрения наблюдателя, и не могут отслеживаться сразу по всей площади распространения потенциальных зон затопления.

Также, для мониторинга ВЛЭП в зонах затоплений активно используется аэрофотосъемка с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). БПЛА — это летательный аппарат без экипажа на борту, использующий аэродинамический принцип создания подъемной силы с помощью фиксированного или вращающегося крыла (БПЛА самолетного и вертолетного типа), оснащенный двигателем и имеющий полезную нагрузку и продолжительность полета, достаточные для выполнения специальных задач [9].

Преимущества:

- эффективны при обследовании линий электропередач, городов и так далее;

- высокая точность получаемой информации;

- высокая производительность;

- высокая оперативность сбора данных;

- не зависит от сезонных ограничений.

Данный способ имеет недостатки:

- высокая стоимость;

- зависимость от состояния атмосферы;

- невозможность его применения при съемке местности с больших высот, снижение точности с увеличением высоты съемки [8].

Таким образом, для решения проблемы целесообразно использовать ДДЗ, которые позволяют оперативно получать информацию о состоянии водных объектов, а при помощи современных геоинформационных систем (ГИС) картографировать границы подтоплений интересующих участков рек, количественно оценить площади затопления.

Применение компьютерных алгоритмов обработки данных делает возможным автоматическое определение границы воды и суши, площадей

затопленных земель, а также выявление территорий, находящихся в опасности из-за поднимающегося уровня воды. Послепаводковая оценка изменений состоит, в первую очередь, в фиксации последствий механического влияния (разрушенных мостов, обрыв линий электропередачи, прорывов дамб, эрозионных процессов и активизации оползней), гидрологического режима (затопления земель, русловые изменения). Определение таких последствий может сопровождаться как визуальными наблюдениями, так и применением дистанционных методов — космической съемки. Последняя позволяет значительно экономить исследовательские ресурсы.

К примеру, в работе [10] данные дистанционного зондирования паводковой ситуации сибирских рек, таких как Енисей и Обь с помощью программы «ENVI» трансформируются в картографическую проекцию, а также производится классификация ДДЗ без обучения методом анализа данных ISODATA.

В статье [2] приводится описание методики оценки потенциального развития динамики зон затопления при прохождении паводковых вод и наводнений на основе анализа многолетних данных космического мониторинга. Методика позволяет получить пространственно-временную динамику зон затопления на рассматриваемой территории при развитии паводков и наводнений. Эта динамика формируется путем построения из многолетних временных рядов данных единого ряда, данные которого располагаются в порядке возрастания площади зон затопления. Такой подход устраняет недостатки, обусловленные высокой облачностью, часто наблюдаемой в паводковый период конкретного сезона, и наличием большого промежутка времени между соседними съемками. Это позволяет гораздо более полно отследить последовательность затопления территории при развитии паводков и наводнений. При этом пространственно-временная динамика затопления территории представляет собой динамику реальных зон затопления. Точность определения таких зон определяется пространственным разрешением используемых ДДЗ.

По данным зарубежных авторов [11] спутниковые данные предоставляют возможность для мониторинга динамики сезонных паводков водно-болотных угодий. В этом исследовании вводится неконтролируемый подход для оценки масштабов затопленных районов на спутниковом изображении, основанный на взаимодействии света с водой, растительностью и их сочетанием. Подход автоматически обнаруживает пороговые значения в коротковолновом инфракрасном диапазоне (SWIR) и в модифицированном нормализованном разностном вегетационном индексе (MNDVI), полученном из радиометрически скорректированных данных Sentinel-2. Затем он сочетает их значимым образом на основе базы знаний, выходящей из итеративного процесса проб и ошибок, а именно, классы интересов относятся к водным и неводным районам.

По материалам научной публикации Xianwei Wang, and Hongjie Xie дистанционное зондирование Земли предоставляет важные данные для картирования водных ресурсов, измерения гидрологических потоков, мониторинга засухи и затоплений, в то время как географические информационные системы обеспечивают наилучшие инструменты для управления водными ресурсами, засухой и наводнениями. Для решения вышеперечисленных проблем авторы статьи применяют новейшие технологии: анализ 3D-моделей поверхности и визуализацию ледниковых объектов, классификацию видеоизображений беспилотных летательных аппаратов для картирования ландшафта и планирования ирригации, измерение тропических осадков, анализ ливневого стока и его моделирование, а также классификацию оптических изображений городских водных объектов и их затоплений [12].

Авторы статьи «Технология обработки данных с космических аппаратов «Канопус-В», «Ресурс-П» и «Метеор-М» для мониторинга и картографирования паводковой ситуации» [13] предлагают новый двухэтапный метод выделения водных объектов и переувлажненных почв, основанный на использовании алгоритма кластеризации ЕССА и дерева решений, построенного с использованием средних значений спектральных характеристик кластеров. Предложенная технология позволяет в оперативном

режиме обрабатывать данные со спутников «Канопус-В», «Ресурс-П» и «Метеор-М» и строить карты паводковой обстановки. Кроме этого, в результате мониторинга формируется база данных, содержащая векторные данные участков подтопления и позволяющая вести временной анализ паводковой ситуации.

Авторами [14] работы продемонстрирована возможность применения метода максимального правдоподобия в программе «ENVI» с последующей постклассификационной обработкой с целью выделения класса — водные объекты. Классификация проводилась по материалам космической съемки, полученной с американского спутника Landsat-8 с применением съемочной аппаратуры OLI, TIRS с разрешением на местности 30 м в 11 спектральных диапазонах.

В работе [15] поэтапно рассматривается метод построения информационной системы для прогнозирования последствий паводков, а именно на основе данных дистанционного зондирования строится цифровая модель рельефа с последующим накоплением информации, которая позволяет рассматривать модель во временном разрезе и моделировать возможные события, в частности, наводнения. На следующем этапе применяется метод интерактивной сегментации водных объектов, основанный на использовании клеточных автоматов.

Авторами [16] работы продемонстрирована возможность применения современных алгоритмов сегментации для оперативного мониторинга лесных пожаров и паводковой ситуации по данным с российских и зарубежных спутников. Использование этих алгоритмов позволяет значительно ускорить процесс обнаружения и оценки последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС) за счёт автоматизации наиболее трудоёмких этапов обработки.

На сегодняшний день выпускается большое количество диссертаций, посвященных проблемам дистанционного зондирования Земли, как например, диссертация Андрея Михайловича Тарарина «Космический мониторинг и оценка риска затопления урбанизированных территорий

в периоды половодий» [17]. Актуальность работы предопределена тем, что по данным Министерства природных ресурсов наводнения являются одним из часто повторяющихся стихийных бедствий, охватывающих большие территории и превосходящих по наносимому ущербу последствиям от всех других чрезвычайных ситуаций. Среди основных проблем, приводящих к большим ущербам от половодий в России, можно назвать, во-первых, отсутствие достоверной информации об опасности затопления территорий, во-вторых, отсутствие законодательно закрепленных правил хозяйственного использования земель, подверженных сезонным затоплениям.

1.2 Обзор космических съемочных систем для анализа паводков

Наводнение — естественное природное явление, периодически происходящее на реках, озерах и морях, сопровождается, в местах хозяйственной деятельности, затоплением объектов жизнедеятельности, а иногда приводит к их разрушению и гибели людей. Имеются вполне обоснованные предположения, что наводнения любого типа подчиняются законам гидродинамической теории длинных волн и на основе этой теории могут быть рассчитаны и спрогнозированы. Однако в практическом плане в настоящее время это неосуществимо: требуется знание большого количества параметров. Особенно это относится к речным наводнениям. Необходимо знать не только то, что происходит в русле и на пойме в зоне разливов, но, прежде всего, условия формирования большой воды на всей площади водосбора. Для этого надо иметь сведения о множестве гидрологических характеристик: снеготаяния и интенсивность снеготаяния, зоны осадков и интенсивность ливней, влажность почвы и характеристики почво-грунтов, величины испарения, виды растительности, время добега воды по склонам и в руслах и так далее. К тому же до сих пор не разработана вполне обоснованная теория формирования речного стока. Тем не менее, многие гидрологические прогнозы составляются и даже часто оправдываются. Для этого используют выявленные заранее

региональные регрессии и эмпирические зависимости, основанные на учете одного или нескольких ведущих факторов, широко применяется метод аналогов.

Широкий спектр источников возникновения паводковых ЧС требует комплексного их изучения и борьбы с негативными последствиями [18]. Так, аэрокосмические методы используются для изучения наводнений как самостоятельное средство, в ходе выявления диапазона их возможностей, так и, чаще всего, в комплексе с другими способами — для оценки параметров, входящих в прогностические и диагностические схемы. До появления искусственных спутников Земли (ИСЗ) основным дистанционным средством наблюдения за наводнениями были аэрометоды. С появлением космических съёмок аэрофотосъёмки в наблюдениях за наводнениями перешли на вспомогательные роли, которые используются на малых и средних объектах, а также для обследования ключевых участков. Теперь для наблюдения наводнений, особенно на крупных реках, используется информация, поступающая с ИСЗ.

Космические снимки являются быстрым и относительно дешевым путем получения оперативной и точной информации о развитии наводнений [19]. Доступ к снимкам космических систем бывает: открытым, условно открытым, закрытым.

Одной из основных характеристик спутникового снимка является его пространственное разрешение. Пространственное разрешение выражается в размере самых мелких объектов, различимых на изображении. Изображение состоит из отдельных цветных точек — пикселей. Чем меньше метров на местности укладывается в один пиксель, тем выше разрешение и тем более детальное изображение на снимке можно получить.

В таблице 1 представлена классификация космических снимков по пространственному разрешению [20].

Таблица 1 — Классификация космических снимков по пространственному разрешению

Классификация снимков	Разрешение, м
Очень высокого разрешения	0,3–0,9
Высокого разрешения	1–40
Среднего разрешения	50–200
Низкого разрешения	300–1000
Очень низкого разрешения	Более 10000

Как известно пространственное разрешение характеризует размер наименьших объектов, различимых на космическом снимке. В зависимости от решения различных задач используются снимки с разным пространственным разрешением. Снимки с высоким пространственным разрешением позволяют получить более детальное изображение местности, но в то же время охват территории таким снимком будет меньше, чем со снимка с более низким разрешением.

Соответственно при половодьях и паводках крупных рек, таяния льдов, снежного покрова и так далее, целесообразно использовать материалы съёмки с средним и низким пространственным разрешением, получаемые в реальном масштабе времени [21].

Также выделяют два направления получения пространственной информации о земной поверхности из космоса: съёмка в видимом и инфракрасном диапазонах длин электромагнитных волн (оптико-электронные системы) и съёмка в сантиметровом радиодиапазоне (радарные системы).

1.2.2 Выбор данных дистанционного зондирования Земли для анализа состояния сезонных подтоплений объектов электросетевого комплекса

В данном разделе главы рассмотрим основные технические характеристики оптико-электронных спутников, представленных

в таблице А.1(Приложение А) для мониторинга паводков [22] по следующим критериям:

- пространственное разрешение;
- спектральный диапазон;
- режим съемки;
- периодичность съемки
- ширина полосы съемки;
- доступ к данным.

На основании вышеизложенного для анализа сезонных подтоплений опор ВЛЭП будут использоваться доступные снимки оптико-электронного спутника — Landsat-8, так как данный космический спутник имеет 11 спектральных каналов, также ширина полосы съемки составляет 185 км, по сравнению со спутником Terra/MODIS, где ширина составляет лишь 60 км, несмотря на одинаковую периодичность съемки и спутником Aqua/MODIS, где ширина полосы съемки значительно больше (2300 км), соответственно более низкое пространственное разрешение, чем у LandSat-8.

1.3 Вывод по главе 1

Анализ публикаций показал, что космическая съемка представляет собой наиболее эффективное средство мониторинга и обеспечивает охват территорий, пострадавших от паводков и наводнений. А возможность применения современных методов дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли является информативным методом оценки масштабов паводков, дополняющим традиционные гидрологические наблюдения.

По результатам проведенного обзора научных публикаций, можно сделать вывод о том, что задача анализа сезонных подтоплений объектов электросетевого комплекса является актуальной на сегодняшний день

и позволяет решить проблему дешифрирования паводков в условиях возросшего количества данных и повышения требований к скорости анализа и интерпретации.

Также в данной главе рассмотрены оптико-электронные спутниковые системы низкого и среднего пространственного разрешения, в результате сравнительного анализа технических характеристик в качестве данных для дешифрирования фактов затоплений выбран спутник Landsat-8.

2 Основные этапы подготовки данных дистанционного зондирования Земли к дешифрированию паводков

2.1 Этапы первичной обработки данных дистанционного зондирования Земли для решения задачи локализации участков подтопления

Процесс получения космической информации имеет многоступенчатую структуру, то прежде чем эта информация будет использоваться потребителем, необходимо обозначить уровни обработки, которую прошли материалы космических съемок. В зависимости от конкретного уровня обработки нужно четко представлять свойства и содержание представленных данных для организации технологических процессов извлечения из них необходимой информации [23].

Методы цифровой обработки изображений играют значительную роль в космических исследованиях, в том числе при составлении карт по космическим снимкам. Цифровая обработка изображений для получения географического результата представляет собой определенную для каждой задачи последовательность стандартных процедур. Ниже рассмотрены основные этапы обработки данных [24].

Наземная система обработки данных предназначена для извлечения полезной информации из мультиспектральных данных дистанционного зондирования и передачи ее потребителям. Система обработки является промежуточным звеном между датчиком дистанционного зондирования и пользователем. Поэтому ее характеристики во многом зависят как от характера данных, так и в значительной степени от требований потребителей информации дистанционного зондирования.

Ниже приведена таблица 3 с описанием иерархической структуры стандартных уровней обработки материалов космических съемок земной поверхности. Начиная с уровня 1А, каждый последующий уровень базируется

на предыдущем, с добавлением определенных радиометрических или геометрических преобразований.

Таблица 3 — Международная классификация уровней обработки и представления данных ДЗЗ из космоса

Стандартный уровень	Описание	Формат изображения	Формат метаданных
0	Абсолютно «сырые» данные, содержащие информацию с ПЗС-датчиков в процессе съемки, без каких-либо преобразований. Информация может иметь сжатие. Данный уровень является базовым для формирования последующих уровней обработки. Как правило, агентства не распространяют данные этого уровня. Используется исключительно в целях изучения работы съемочных систем	Не определен	Не определен
1A	Включает только радиометрическую коррекцию искажений, вызванных разницей в чувствительности отдельных ПЗС-датчиков сканирующей системы. Никакие геометрические исправления для изображений этого уровня не выполняются, поэтому изображения остаются практически необработанными или «сырыми». Предоставляются коэффициенты абсолютной радиометрической калибровки. Материалы данного уровня рекомендованы для последующей фотограмметрической обработки строгими методами.	RAW, TIFF	CEOS, XML
1B	Включает радиометрическую коррекцию, как и уровень обработки 1A, а также геометрическую коррекцию систематических ошибок ПЗС-датчиков сканирующей системы, в том числе панорамные искажения, искажения, вызванные вращением и кривизной Земли, колебанием высоты орбиты спутника. Применена абсолютная радиометрическая калибровка. Изображения уровня 1B иногда называют «path-oriented». Дополнительно могут быть предоставлены файлы, содержащие коэффициенты рационального многочлена (RPC), аппроксимирующие геометрию изображения. Материалы могут быть использованы для фотограмметрической обработки как строгими методами, так и аппроксимационными.	RAW, TIFF	CEOS, XML, ASCII
2A	Изображения, как правило, приведены к стандартной картографической проекции без использования наземных опорных точек. Проецирование изображения выполняется на среднюю плоскость или используется глобальная цифровая модель рельефа (DEM) с шагом на местности 1 км. Могут быть предоставлены файлы, содержащие коэффициенты рационального многочлена (RPC), аппроксимирующие геометрию изображения.	GeoTIFF	XML, ASCII

Окончание таблицы 3

2В	Изображения уровня 2А приведены к стандартной картографической проекции с использованием наземных опорных точек. Проецирование изображения выполняется на среднюю плоскость или используется глобальная цифровая модель рельефа (DEM) с шагом на местности 1 км. Могут быть предоставлены файлы, содержащие коэффициенты рационального многочлена (RPC), аппроксимирующие геометрию изображения.	GeoTIFF	XML, ASCII
3А	В отличие от уровня 2В, изображения уровня 3А проецируются в заданную картографическую проекцию путем ортотрансформирования с использованием модели снимка, опорных наземных точек и модели рельефа местности. Полученные изображения являются ортоскорректированными с определенной точностью. Изображения, как правило, нарезаются на стандартные картографические листы.	GeoTIFF	XML, ASCII
3В	Уровень 3В подразумевает объединение изображений уровня 3А в единые бесшовные растровые мозаики, покрывающие большие территории.	GeoTIFF	XML, ASCII

Формат изображения выбранной спутниковой системы Landsat-8 — GeoTIFF, имеющие стандартный уровень обработки 2А.

Спецификация GeoTIFF определяет множество тегов, необходимых для описания картографической информации TIFF формата, в котором изначально представлена информация со спутниковых систем как географического анализа. Географические данные, хранящиеся в GeoTIFF файле могут быть использованы для того, чтобы позиционировать изображение в правильном расположении и геометрии на экране дисплея географической информации. Главным преимуществом данного формата является его совместимость с широким кругом приложений и его независимость от архитектуры компьютера, операционной системы и графического аппаратного обеспечения [25].

2.2 Вывод по главе 2

На основании проведенного обзора этапов первичной обработки данных дистанционного зондирования Земли для определения состояния сезонных

подтоплений объектов электросетевого комплекса по данным ДЗЗ необходимо использовать изображение уровня 2А, которое приведено к стандартной картографической проекции и имеет формат GeoTIFF для дальнейшего дешифрирования данных.

3 Детектирование данных дистанционного зондирования Земли для решения задачи локализации участков затопления

Детектирование снимков — метод исследования территорий, акваторий и атмосферных явлений на основе зависимости между свойствами объектов и характером их воспроизведения на снимках. Дешифрирование включает обнаружение, распознавание, интерпретацию, а также определение качественных и количественных характеристик объектов и отображение результатов в графической (картографической), цифровой или текстовой формах [26].

Климатические изменения, которые произошли за последние десятилетия, ускорившийся темп урбанизации и технологического развития приводят к изменениям всех компонент атмосферы и поверхности Земли. Одной из таких компонент являются поверхностные водные объекты планеты (реки, грунтовые воды, озера) [26]. Вода является важным элементом для существования различных экосистем, в том числе и для существования человечества. Как отсутствие, так и избыток воды приводят к чрезвычайным изменениям в любых отраслях народного хозяйства. Поэтому обнаружение водных объектов и последующий контроль являются важным процессом в научных и практических исследованиях. Фактически в настоящее время отсутствует мониторинг водных объектов, который показывает изменение числа водных объектов и их площади, береговой линии и их типа.

Развитие технологий дистанционного зондирования позволяет проводить регулярные многоспектральные измерения земной поверхности. Математические методы обработки данных дистанционного зондирования позволяют получать информацию о пространственно-временных параметрах поверхности Земли, в том числе и водных объектов [27].

Процесс поиска водных объектов на основе набора измеренных многоспектральных изображений позволяет обнаруживать их по характеристикам отражательной способности природных объектов [28-30].

Водные объекты характеризуются самыми низкими значениями коэффициентов отражения среди других природных объектов. При этом все другие природные объекты даже в состоянии увлажненности имеют больший коэффициент отражения. Этот факт используется при обнаружении водных объектов на измеренном изображении [27].

Одной из задач научно-исследовательской работы является разработка программно-методического комплекса локализации участков затопления для оказания информационной поддержки лиц, принимающих решения. Диаграмма деятельности методики локализации участков затопления представлена на рисунке Б.1 (Приложение Б).

3.1 Методика локализации участков затопления на основе обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли

Для обнаружения водных объектов по космическим многоспектральным изображениям широко используются следующие индексы: NDWI, NDSI, MNDWI, WRI, NDVI [24].

1) Водный индекс «Water Ratio Index» (WRI) [31] используется для оценки содержания влаги в растительном покрове. На выходе получается бинарный растр водной поверхности.

2) NDWI — Normalized Difference Water Index (нормализованный разностный водный индекс) — индекс, определяющий количество воды среди растительности, которое взаимодействует с поступающим солнечным излучением. Позволяет выявить вариации растительного покрова, связанные с условиями увлажнения. Показатель NDWI чувствителен к изменениям в жидкости воды содержания растительности. Он менее чувствителен к атмосферным воздействиям, чем Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) [32].

3) MNDWI — Modification Normalized Difference Water Index (модифицированный нормализованный разностный водный индекс). Алгоритм

был разработан Сюем (2006) и может увеличить открытые водные сооружения, эффективно подавляя и даже удаляя шумовые эффекты с поверхности, а также шумы с почвы и растительности. Улучшение значений воды по полученному MNDWI — изображению приведет к более точному извлечению водных данных из застроенной земли, почвы и растительности, все отрицательные значения не будут учитываться, поэтому удалены.

4) NDVI — Normalized Difference Vegetation Index (нормализованный относительный индекс растительности) [33]. Для выделения областей подтопления и уточнения площади паводка также используется индекс NDVI. Простой количественный показатель количества фотосинтетически активной биомассы (обычно называемый вегетационным индексом).

Расчет NDVI индекса базируется на двух наиболее стабильных, не зависящих от прочих факторов, участках спектральной кривой отражения сосудистых растений. В красной области спектра (0,6-0,7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасном диапазоне (0,7-1,0 мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листьев.

Для отображения индекса NDVI используется стандартизованная непрерывная градиентная или дискретная шкала, показывающая его значения в диапазоне от -1 до +1 (рисунок 2). Благодаря особенности отражения в NIR-RED областях спектра, природные объекты, не связанные с растительностью, имеют фиксированное значение NDVI, что позволяет использовать этот параметр для их идентификации (таблица 4).



Рисунок 2 — Дискретная шкала NDVI

На основе данного индекса возможно получение численных данных для использования в расчетах оценки и прогнозирования степени нарушенности

и ущерба от различных естественных и антропогенных бедствий, аварий и так далее.

Таблица 4— Фиксированные значения NDVI природных объектов

Тип объекта	Отражение в красной области спектра	Отражение в инфракрасной области спектра	Значение NDVI
Густая растительность	0.1	0.5	0.7
Разряженная растительность	0.1	0.3	0.5
Открытая почва	0.25	0.3	0.025
Облака	0.25	0.25	0
Снег и лед	0.375	0.35	-0.05
Вода	0.02	0.01	-0.25
Искусственные материалы (бетон, асфальт)	0.3	0.1	-0.5

В целом, главным преимуществом NDVI является легкость его получения: для вычисления индекса не требуется никаких дополнительных данных и методик, кроме непосредственно самой космической съемки и знания параметров съемки.

5) NDSI — Normalized difference snow index (снежный индекс нормированной разности). Показатель покрытия территории снегом, предназначенный для обнаружения снега на земной поверхности по данным дистанционного зондирования Земли. Позволяет различать на космических снимках заснеженные территории от облаков. Для расчета индекса используются значения спектральной яркости в зеленом и, как правило, среднем инфракрасном (1,6 мкм) диапазонах спектра [34].

Значение индекса для участков земной поверхности, занятых снегом, равняется 0,4 и более. Водные объекты также могут принимать значение NDSI, равное 0,4, однако водные объекты имеют коэффициент отражения менее 11% в зеленом диапазоне и менее 10% в среднем инфракрасном (SWIR).

Обзор всех использованных многоспектральных индексов представлен в таблице 5.

Таблица 5 — Многоспектральные индексы, используемые для определения водных объектов [25]

Индекс	Выражение	Диапазон значений
WRI	$WRI = (b_{Green} + b_{Red}) / (b_{NIR} + b_{MIR})$	Вода имеет значение больше 1
NDWI	$NDWI = (b_{Green} - b_{NIR}) / (b_{Green} + b_{NIR})$	Вода имеет положительное значение
MNDWI	$MNDWI = (b_{Green} - b_{MIR}) / (b_{Green} + b_{MIR})$	Вода имеет положительное значение
NDVI	$NDVI = (b_{NIR} - b_{Red}) / (b_{NIR} + b_{Red})$	Вода имеет отрицательное значение
NDSI	$NDSI = (b_{Green} - b_{SWIR}) / (b_{Green} + b_{SWIR})$	Вода имеет положительное значение

3.1.1 Результаты выделения водных объектов по данным спутниковой системы Landsat-8

В данной работе подсчитаны многоспектральные индексы с использованием спутникового снимка среднего пространственного разрешения. На примере данных Landsat-8 от 29 апреля 2016 года на территории реки Кува г. Кудымкар (Пермский край) [35]. Повторяемость съемки одной территории Landsat-8 составляет 16 суток. Пространственное разрешение — 30 м. За лето удастся получить 6-7 безоблачных сцен одной и той же территории.

Для расчета многоспектрального индекса выбрана свободно распространяемая инсталлируемая геоинформационная система «QuantumGIS» (QGIS).

1) Одной из первых задач обработки спутниковых снимков является объединение каналов снимка, снятых в различных спектрах в один растр. Снимки со спутника Landsat-8 представлены в 11 спектральных каналах.

Инструмент объединения QGIS создаст один многоканальный файл в формате GeoTIFF (рисунок 3).

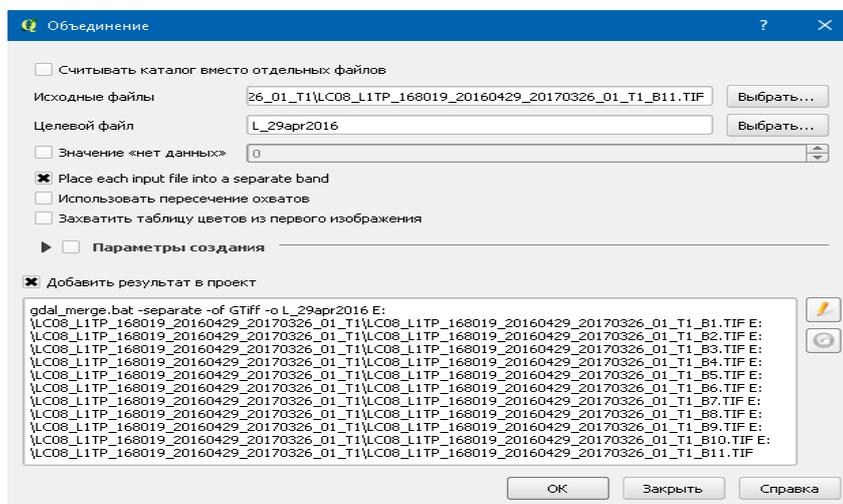


Рисунок 3 — Объединение каналов снимка Landsat-8

После процедуры объединения каналов, в окне программы QGIS отображается снимок с заданным названием «L_29apr2016» в виде растрового слоя формата GeoTIFF (рисунок 4).

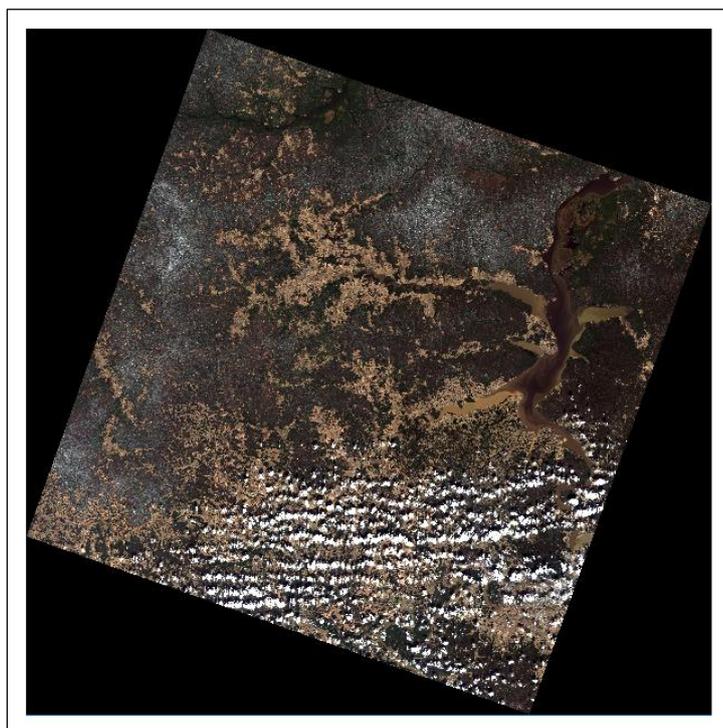


Рисунок 4 — Растровый слой снимка Landsat-8

2) Расчет индекса NDVI: необходимо открыть вкладку «Растр» и выбрать «Калькулятор растров». В окне «Выражение» калькулятора растров требуется ввести формулу NDVI для расчёта индекса. Рассчитанный индекс отобразится в окне программы в виде нового растрового слоя «NDVI» (рисунок 5):

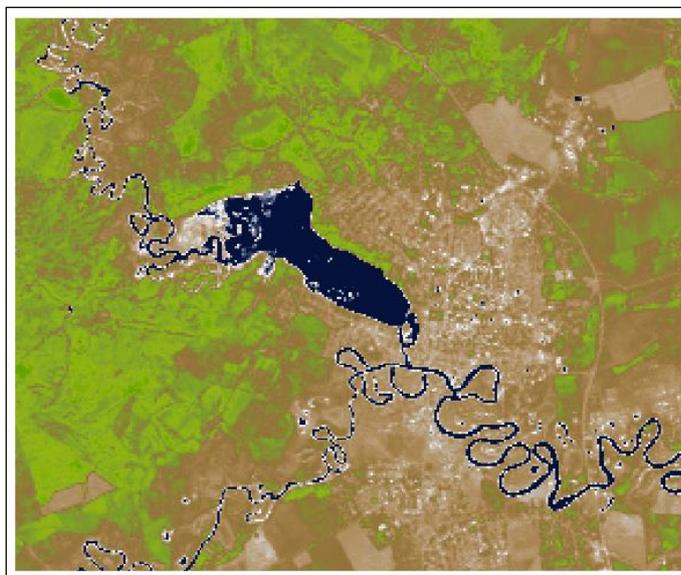


Рисунок 5 — Растровый слой рассчитанного индекса NDVI

После того, как посчитан индекс, необходимо определить значения диапазона для воды. Для этого переходим в панель инструментов и выбираем «Определить объекты» и, проходя по карте находим максимальное и минимальное значение для каждого пикселя (рисунок 6).

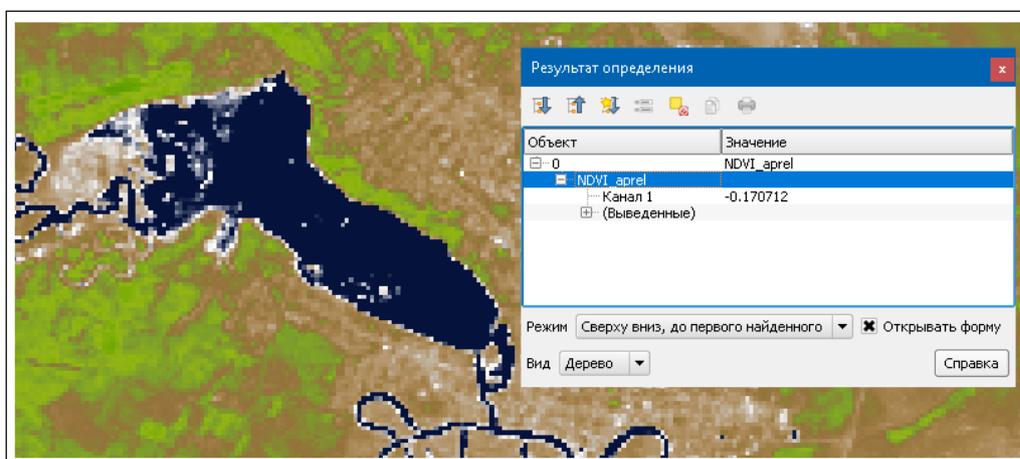


Рисунок 6 — Результат определения значения индекса NDVI

Далее, выполняя аналогичные вышеизложенные операции рассчитываем многоспектральные индексы NDWI, MNDWI, NDSI, WRI.

Результат рассчитанного индекса NDWI представлен на рисунке 7:

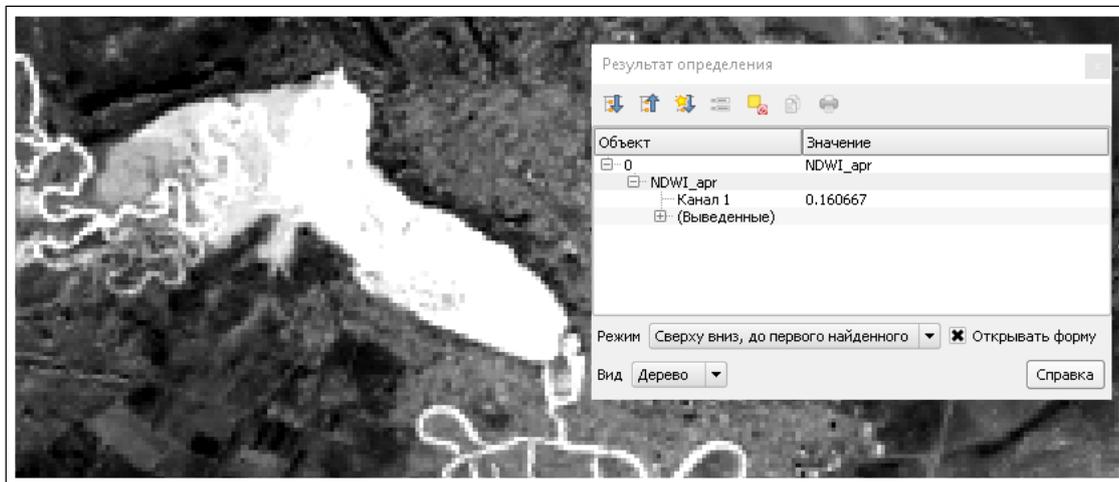


Рисунок 7 — Результат определения значения индекса NDWI

Результат рассчитанного индекса MNDWI представлен на рисунке 8:

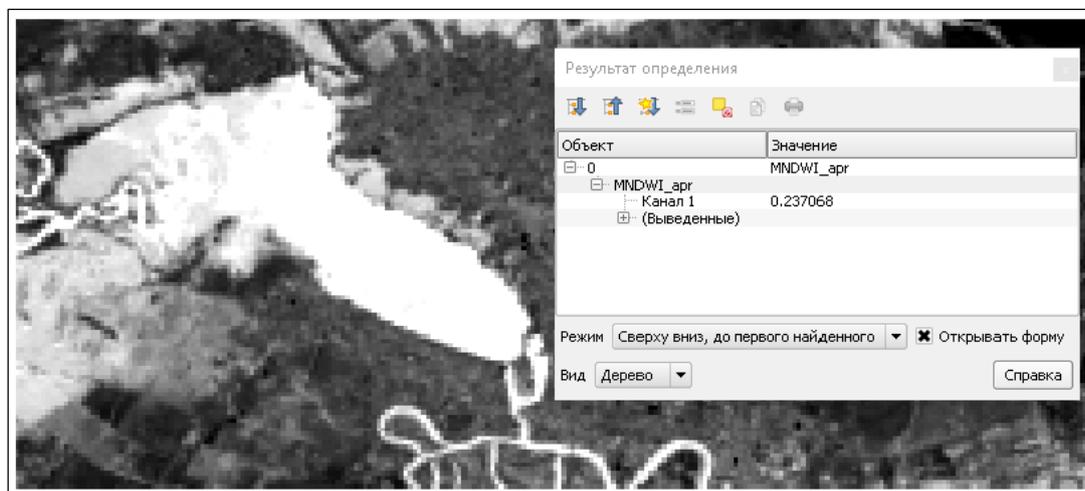


Рисунок 8 — Результат определения значения индекса MNDWI

Ниже представлены результаты рассчитанного индекса NDSI (рисунок 9) и индекса WRI (рисунок 10).

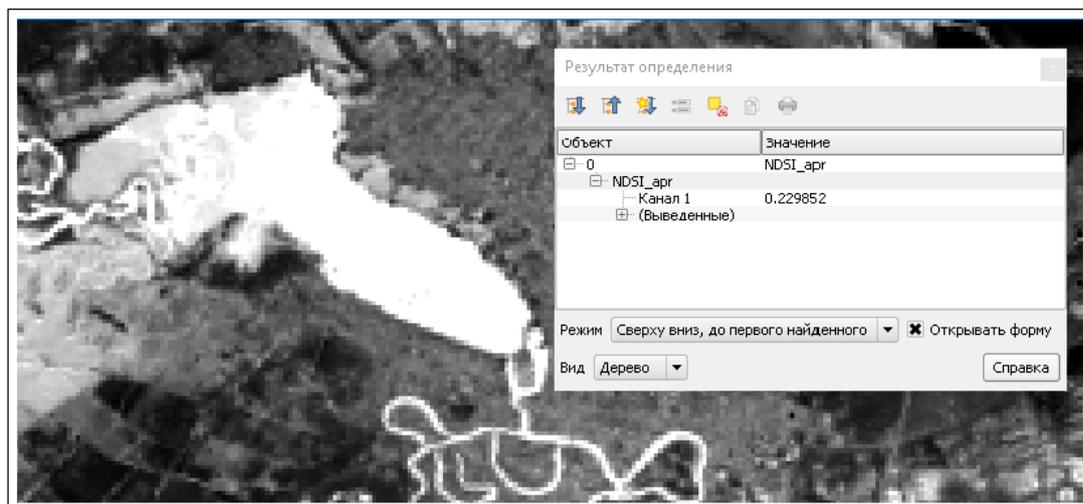


Рисунок 9 — Результат определения значения индекса NDSI

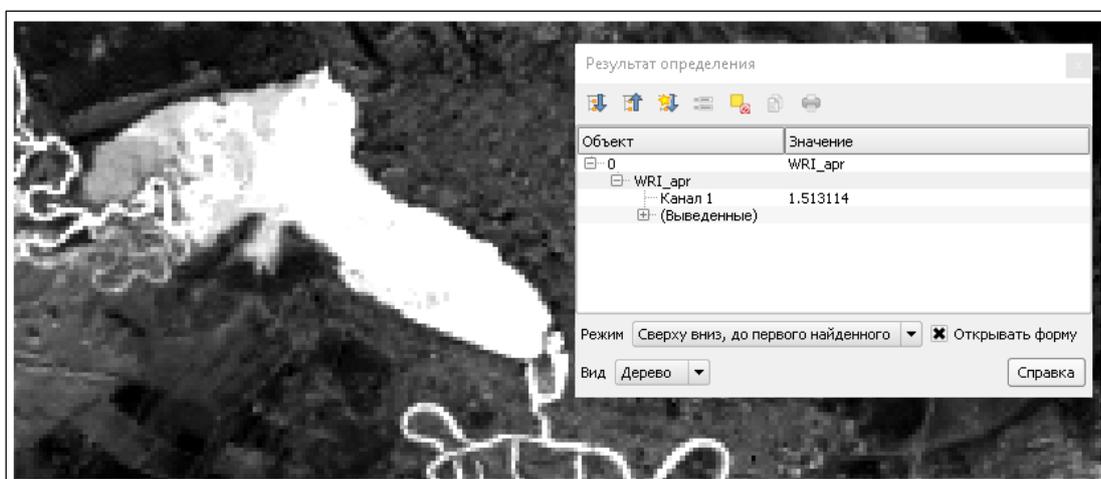


Рисунок 10 — Результат определения значения индекса WRI

В таблице 6 приведены диапазоны значений принадлежности пикселей к водным объектам.

Таблица 6 — Диапазоны значений многоспектральных индексов

Название метода	Диапазон значений поиска
WRI	$>1,0$
NDWI	$>0,1$
MNDWI	$>0,1$
NDVI	$-0,5 < x \leq 0$
NDSI	$0,06 < x \leq 0,4$

3.1.2 Сегментация участков затопления

Сегментацией изображения называют разбиение изображения на области в соответствии с заданным критерием однородности. При решении задач обработки изображений и компьютерного зрения, сегментация играет важную роль. Область — это множество четырех или восьмисвязных пикселей при определении «соседства» в соответствии с выбранным признаковым пространством. Обычно пиксели, которые соответствуют одной и той же области, имеют какие-либо схожие параметры (цвет, яркость и так далее).

Классификация алгоритмов выделяют следующие алгоритмы сегментации:

- пороговые алгоритмы;
- алгоритм наращивания областей;
- граничные алгоритмы;
- алгоритмы сегментации на основе кластеризации [33].

1) Пороговые алгоритмы. Если необходимо распознавать изображение, области которого значительно различаются по яркости, то рекомендуется использовать пороговые алгоритмы, например, для сегментации алгоритмом порогового распределения необходимо получить бинарное изображение из полутонового. Для этого устанавливается некоторое пороговое ограничение. После квантования функция изображения отображает элементы изображения с уровнем яркости больше порогового в значение 1, меньшее порогового 0. В таких случаях оптимальное значение порога определяется достаточно легко на основе анализа гистограмм. Дальнейшее естественное развитие — мультипороговая сегментация. При отсутствии шумов и других возмущений, колебание яркости происходит только на границах выделяемой области. Такая модель может быть упрощена до единой размерности, тогда распределение яркости однозначно совпадает с формой контура границы.

Данные алгоритмы позволяют сегментировать простые изображения, но, как правило, не дают хорошего результата на изображениях с наличием

неровного освещения, вспышек, теней и различных помех, что, к сожалению, часто встречается в реальных ситуациях. Кроме того, при наличии значительных интервалов между экстремумами определение значимого минимума может быть затруднительным.

Для уменьшения влияния указанных недостатков разработаны алгоритмы, которые реализуют анализ взвешенных значений экстремумов, а точнее анализируют интенсивность и градиент.

2) Алгоритмы наращивания областей. Если на изображении имеет место устойчивая связность внутри отдельных сегментов, то рекомендуется использовать алгоритмы наращивания областей — происходит группировка соседних элементов с одинаковыми или близкими уровнями яркости, которые после объединяются в однородные области. Наиболее распространенные алгоритмы нахождения областей включают в себя такие алгоритмы, как слияние — расщепление областей, алгоритм водоразделов и алгоритм центроидного связывания.

Простые способы наращивания областей используют только совокупности свойств отдельных групп точек для определения примитивных областей. Более сложные алгоритмы построены на объединении примитивных областей.

При центроидном связывании на основании информации об объекте выбираются стартовые точки, которым присваиваются различные метки. Точки с одинаковыми метками образуют отдельные множества. Такой алгоритм наиболее пригоден для сегментации простых изображений. Для более сложных изображений выбор точек проводится по итерациям, на каждой из которых рассматривается набор точек на предмет принадлежности их соседей данному множеству. Точки, включенные в множество на предыдущих итерациях, не рассматриваются. Так проводится анализ всех множеств по очереди. Точки, добавленные к множеству на данной итерации, называются фронтом, а объединение фронтов — волной, поэтому такие алгоритмы получили название — волновые.

Алгоритм слияния — расщепления разделяет точки изображения путем разбиения некоторым образом изображения на квадраты, которые затем анализируются для их проверки на однородность (чаще всего это однородность по яркости). Если квадрат не удовлетворяет условиям однородности, то заменяется четырьмя «подквadrатами», а подходящие по условию однородности 4 квадрата могут быть объединены в одну область.

К недостаткам алгоритмов нахождения областей в первую очередь относят то, что данные алгоритмы выделяют общие фрагменты, зачастую не показывая информации об изменении яркости внутри области и возможных внутренних границах. Однако эти алгоритмы зарекомендовали себя более эффективными при работе с зашумленными изображениями.

3) Граничные алгоритмы. Другой способ сегментации заключается в нахождении точек, лежащих на границах областей. Характеристика яркости — основная для определения границ, хотя часто используются такие характеристики, как текстура и, конечно же, градиент.

Алгоритмы выделения границ состоят из фильтрации (улучшение выделения границ при наличии шумов), усиления (акцент на точках, где происходит перепад яркости), выделения (используя пороговое значение, решение, выделять ли точки в границу) и локализации (определение месторасположения и направления).

В общем, существующие алгоритмы делятся на алгоритмы сравнения с эталоном и дифференциально-градиентные алгоритмы. Оба подхода определяют, когда колебание градиента яркости становится достаточно большим, чтобы утверждать, что здесь находится граница объекта. Принципиальная разница алгоритмов заключается в способе локальной оценки градиентного значения и определении локальной направленности границ, что немаловажно в некоторых схемах распознавания объектов.

В целом, выделение границ дает весьма неплохие результаты для интерпретации изображения. Карты границ могут быть построены в различных масштабах, что позволяет получать коррелированные результаты.

К недостаткам можно отнести то, что многие схемы имеют большую вычислительную сложность, что не оправдано для многих приложений и не позволяет использовать алгоритмы в системах реального времени. Необходимо учитывать также, что для точной оценки значения и направленности границ необходимо использовать разные маски; получение маски путем перестановки коэффициентов циклически по соседям «по квадрату» не всегда будет гарантировать достоверный результат; оптимизация в целях устранения шумов накладывает на маски дополнительные условия.

4) Алгоритмы сегментации на основе кластеризации. Отдельной ветвью выделяются алгоритмы сегментации, основанные на кластеризации. Их преимущество — автоматические и могут быть использованы для любого количества признаков и классов. Существующие алгоритмы кластеризации, такие как K-средних, медоидный, CURE, ROCK, DBSCAN, созданы для нахождения кластеров, соответствующих какой-либо статической модели. Эти алгоритмы могут дать сбой, если параметры модели были выбраны некорректно, по отношению к классифицируемым данным, или если модель не охватывает в должной мере характеристики кластеров. Также многие алгоритмы допускают погрешности, если данные состоят из кластеров разной формы, плотности и размеров.

Далее, для решения задачи локализации участков подтопления опор ВЛЭП будет использован программный модуль детектирования пикселей воды, реализованный на языке программирования Python. Модуль основан на использовании многоканальных спектральных индексов. Метод представляет собой пороговую функцию, где в качестве исследуемого признака используются вычисленные значения по формулам водных индексов. Блок-схема алгоритма изображена на рисунке 11 на примере индекса NDWI:

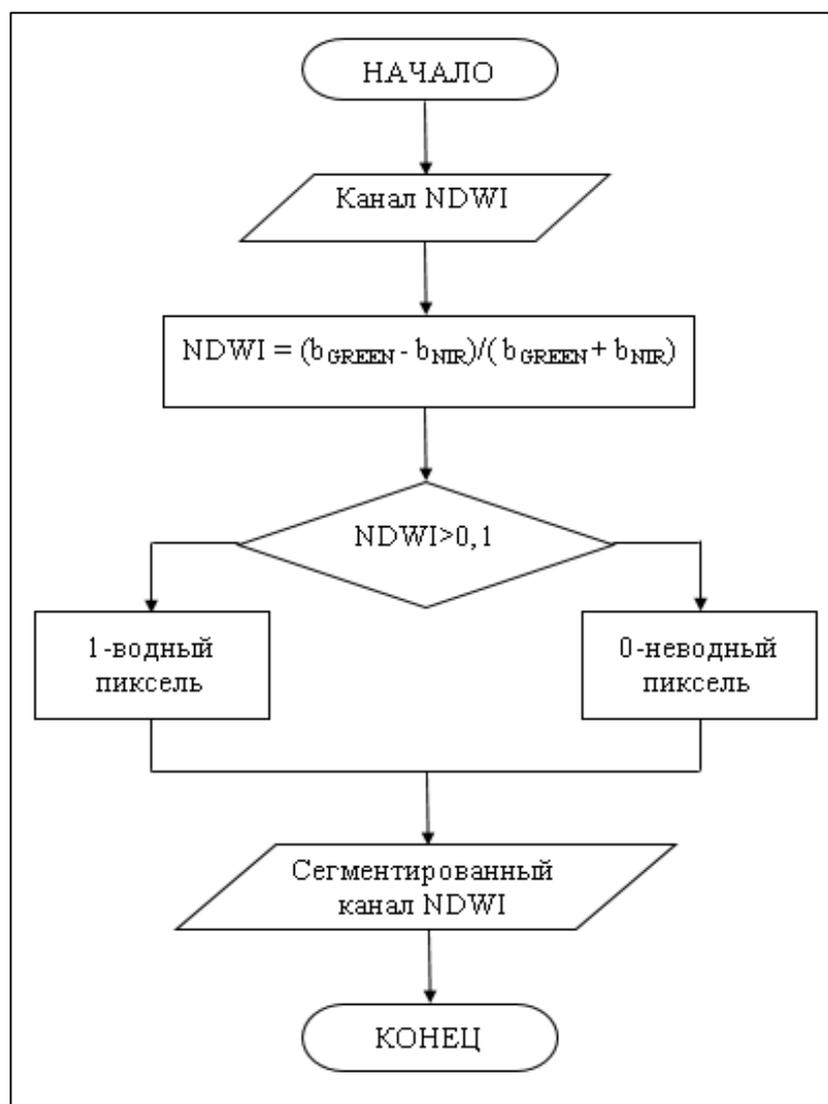


Рисунок 11 — Алгоритм работы программного модуля сегментации изображения

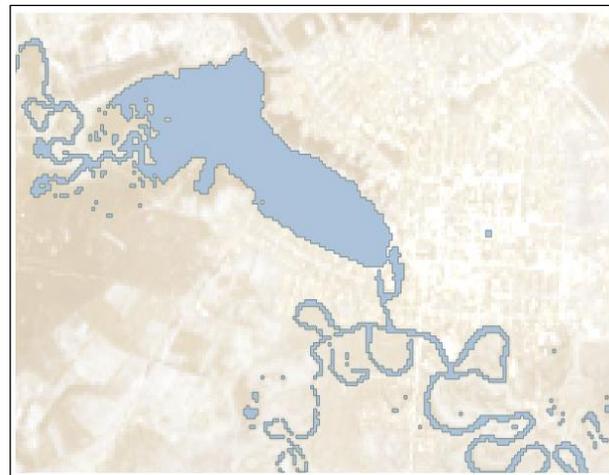
На данном этапе детектирования водных объектов программный модуль сегментации разделяет все пиксели изображения по заданному пороговому значению спектрального индекса и создает выходной растровый файл формата GeoTIFF, содержащий информацию о типах пикселей в виде бинарного изображения.

Далее, посредством QGIS необходимо преобразовать данные растрового выходного файла сегментации в полигоны векторного слоя, с целью записи этих данных в выходной векторный файл.

Ниже представлены результаты сегментации водных объектов по каналу WRI (рисунок 12, а) и водные объекты в векторном формате (рисунок 12, б).



а



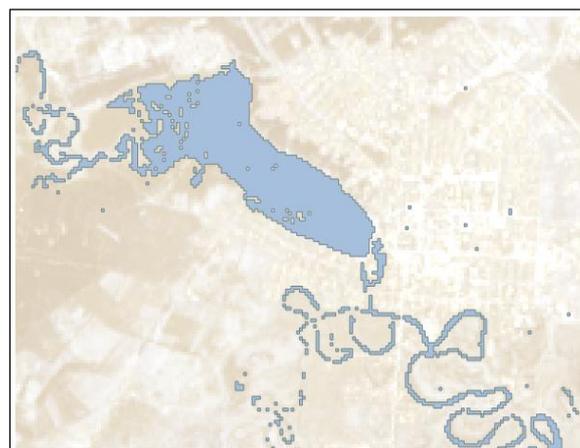
б

Рисунок 12 — Результаты локализации водных объектов: а — результат сегментации по каналу WRI; б — водные объекты в векторном формате

На рисунке 13 представлены результаты сегментации и водные объекты в векторном формате по каналу NDWI:



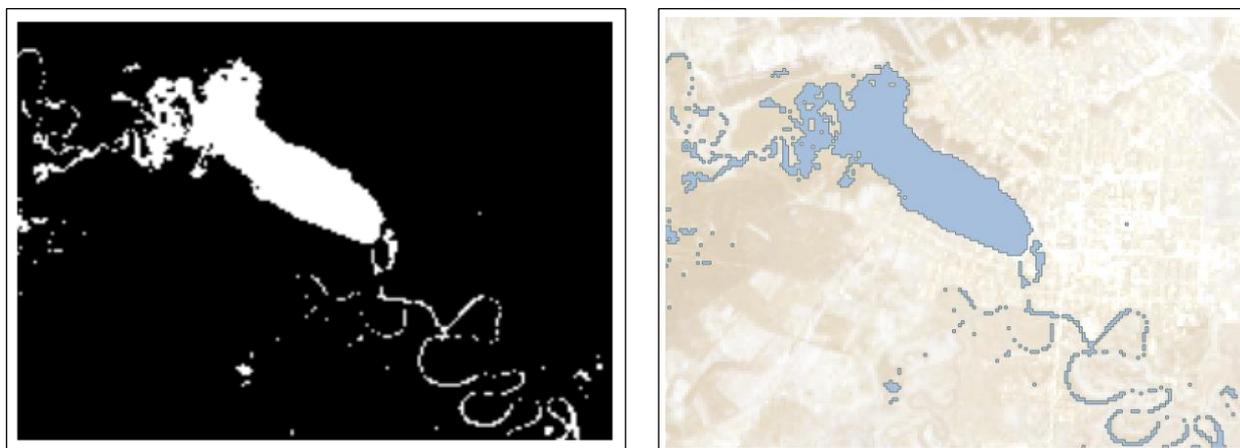
а



б

Рисунок 13 — Результаты локализации водных объектов: а — результат сегментации по каналу NDWI; б — водные объекты в векторном формате

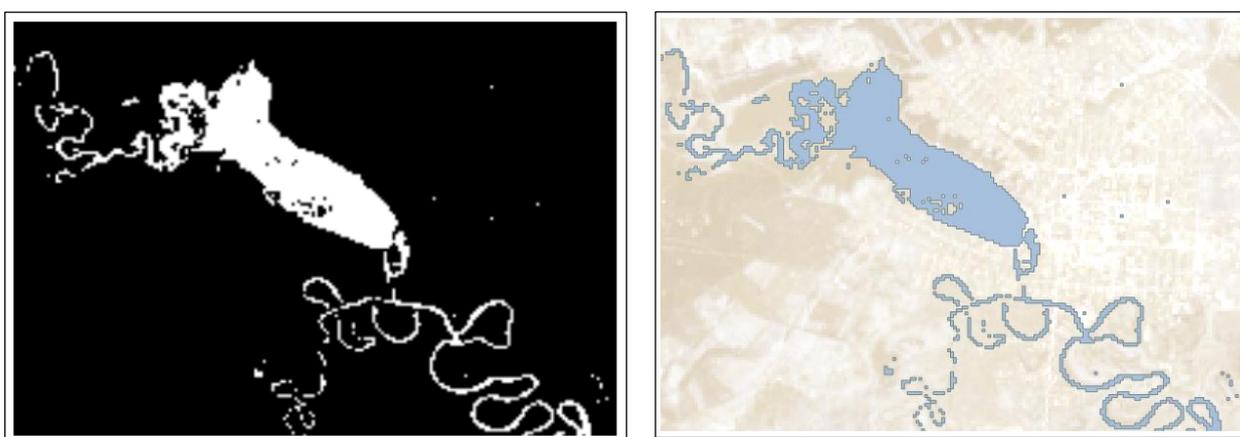
Ниже представлены результаты сегментации, водные объекты в векторном формате по каналу MNDWI (рисунок 14) и NDVI (рисунок 15):



а

б

Рисунок 14 — Результаты локализации водных объектов: а — результат сегментации по каналу MNDWI; б — водные объекты в векторном формате



а

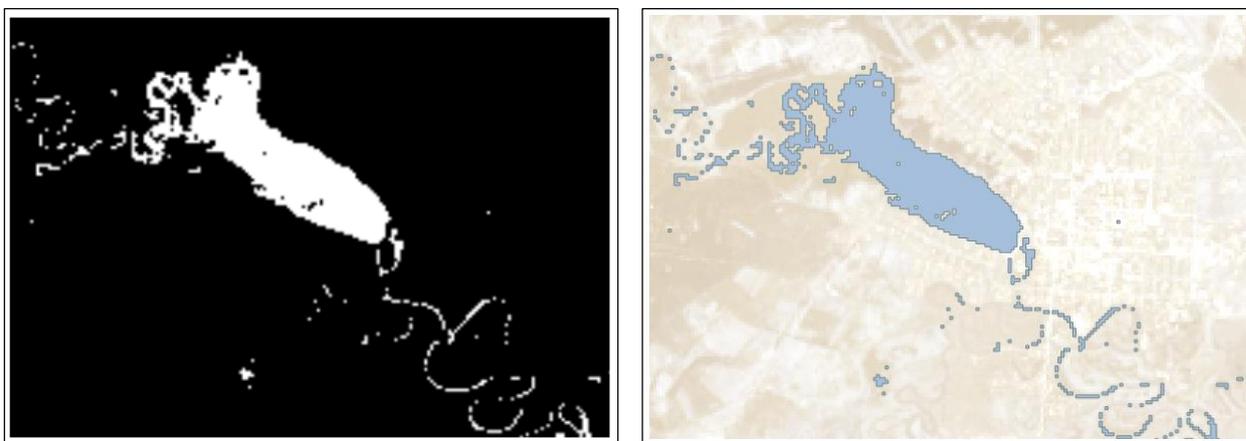
б

Рисунок 15 — Результаты локализации водных объектов: а — результат сегментации по каналу NDVI; б — водные объекты в векторном формате

На рисунке 16 представлены результаты сегментации водных объектов по каналу NDSI и водные объекты в векторном формате.

Таким образом, для каждого индекса выполнена сегментация на основе учета диапазона значений выше указанных многоспектральных водных

индексов, позволяющих выделять водные объекты (бинаризация изображений: 0 — неводные объекты и 1 — водные объекты).



а

б

Рисунок 16 — Результаты локализации водных объектов: а — результат сегментации по каналу NDSI; б — водные объекты в векторном формате

3.1.3 Расчет показателей точности выделения водных объектов

Матрица ошибок представляет собой инструмент, использующий кросс-табуляцию для показа того, как соотносятся значения совпадающих классов, полученные из различных источников. В качестве источников могут выступать, проверяемый растр (тематическая классификация) и опорный более точный источник данных (растр или набор полевых данных в виде точек). При интерпретации результатов обычно полагается, что проверяемый результат потенциально является неточным, а проверочный растр хорошо отражает реальную ситуацию. В противном случае, если проверочный растр также несовершенен, нельзя говорить об «ошибке», а следует говорить о «разнице» между двумя наборами данных. Для построения матрицы могут использоваться все ячейки растра (пиксели) или выборка ячеек, расположенных случайно, стратифицировано случайно или согласно какому-либо другому распределению.

По одной из осей матрицы записываются названия классов легенды классификации проверяемого набора данных, по второй — классы легенды данных, используемых для проверки (рисунок 17).

		Реальные классы					Σ
		A	B	C	D	E	
Расчетные классы	A	n_{AA}	n_{AB}	n_{AC}	n_{AD}	n_{AE}	n_{A-}
	B	n_{BA}	n_{BB}	n_{BC}	n_{BD}	n_{BE}	n_{B-}
	C	n_{CA}	n_{CB}	n_{CC}	n_{CD}	n_{CE}	n_{C-}
	D	n_{DA}	n_{DB}	n_{DC}	n_{DD}	n_{DE}	n_{D-}
	E	n_{EA}	n_{EB}	n_{EC}	n_{ED}	n_{EE}	n_{E-}
Σ		n_{-A}	n_{-B}	n_{-C}	n_{-D}	n_{-E}	N

Рисунок 17 — Матрица ошибок

Серым отмечена главная диагональ матрицы, показывающая случаи, где расчетные классы и реальные данные совпадают (правильная классификация). Сумма значений диагональных элементов показывает общее количество правильно классифицированных пикселей, а отношение этого количества к общему количеству пикселей в матрице N называется общей точностью сегментации и обычно выражается в процентах:

$$\varepsilon = \frac{n_{AA} + n_{BB} + n_{CC} + n_{DD} + n_{EE}}{N} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $n_{AA} + n_{BB} + n_{CC} + n_{DD} + n_{EE}$ — общее количество правильно сегментированных пикселей;

N — общее количество пикселей в матрице [36].

Построение матрицы ошибок производится по фрагменту изображения реки Кува г. Кудымкар (Пермский край), представленного на рисунке 18, выборка для реального класса производилась при помощи инструментов программного продукта «ENVI».



Рисунок 18 — Фрагмент изображения реки Кува
г. Кудымкар (Пермский край)

Матрица ошибок для индекса WRI представлена в таблице 7. Поля «Да» и «Нет» отражают количество попавших в класс водной поверхности пикселей.

Таблица 7 — Матрица ошибок для индекса WRI

WRI	Реальный класс			Σ
	Да	Нет	Σ	
Да	1991	645	2636	
Нет	150	3326	3476	
Σ	2141	3971	6112	

Расчет общей точности сегментации индекса WRI производится по формуле (1):

$$\varepsilon_{WRI} = \frac{1991 + 3326}{6112} \cdot 100 \% = 87 \%$$

Также были получены следующие результаты сегментации:

- общая ошибка сегментации $\varepsilon_i = 13 \%$;
- ошибка пропусков $\varepsilon_j = 1,07 \%$;
- ошибка ложной сегментации $\varepsilon_\delta = 0,92 \%$.

Матрица ошибок для индекса NDWI представлена в таблице 8:

Таблица 8 — Матрица ошибок для индекса NDWI

NDWI	Реальный класс			Σ
		Да	Нет	
Да		1971	331	2302
Нет		170	3640	3810
Σ		2141	3971	6112

Общая точность сегментации индекса NDWI равна:

$$\varepsilon_{NDWI} = \frac{1971 + 3640}{6112} \cdot 100 \% = 92 \%$$

Общая ошибка сегментации $\varepsilon_i = 8 \%$.

Ошибка пропусков $\varepsilon_j = 1,1 \%$.

Ошибка ложной сегментации $\varepsilon_\delta = 0,92 \%$.

Матрица ошибок для индекса MNDWI представлена в таблице 9:

Таблица 9 — Матрица ошибок для индекса MNDWI

MNDWI	Реальный класс			Σ
		Да	Нет	
Да		1912	257	2169
Нет		229	3714	3943
Σ		2141	3971	6112

Общая точность сегментации для индекса MNDWI равна:

$$\varepsilon_{MNDWI} = \frac{1912 + 3714}{6112} \cdot 100 \% = 92 \%$$

Общая ошибка сегментации $\varepsilon_i = 8 \%$.

Ошибка пропусков $\varepsilon_j = 1,1 \%$.

Ошибка ложной сегментации $\varepsilon_{\delta} = 0,89 \%$.

Матрица ошибок для индекса NDVI представлена в таблице 10:

Таблица 10 — Матрица ошибок для индекса NDVI

NDVI	Реальный класс			
		Да	Нет	Σ
Да		1836	249	2085
Нет		305	3722	4027
Σ		2141	3971	6112

Общая точность сегментации для индекса NDVI равна:

$$\varepsilon_{NDVI} = \frac{1836 + 3722}{6112} \cdot 100 \% = 91 \%$$

Общая ошибка сегментации $\varepsilon_i = 9 \%$.

Ошибка пропусков $\varepsilon_j = 1,2 \%$.

Ошибка ложной сегментации $\varepsilon_{\delta} = 0,85 \%$.

Матрица ошибок для индекса NDSI представлена в таблице 11:

Таблица 11 — Матрица ошибок для индекса NDSI

NDSI	Реальный класс			
		Да	Нет	Σ
Да		1784	353	2137
Нет		357	3618	3975
Σ		2141	3971	6112

Общая точность сегментации для индекса NDSI равна:

$$\varepsilon_{NDSI} = \frac{1784 + 3618}{6112} \cdot 100 \% = 88 \%$$

Общая ошибка сегментации $\varepsilon_i = 12 \%$.

Ошибка пропусков $\varepsilon_j = 1,2 \%$.

Ошибка ложной сегментации $\varepsilon_{\delta} = 0,83 \%$.

Сводная таблица 12 для результатов сегментации фрагмента снимка при помощи индексов WRI, NDWI, MNDWI, NDVI, NDSI представлена ниже:

Таблица 12 — Результаты сегментации фрагмента снимка для индексов WRI, NDWI, MNDWI, NDVI, NDSI

Индекс	Общая точность	Общая ошибка сегментации	Ошибка пропусков	Ошибка ложной сегментации
WRI	87 %	13 %	1,07 %	0,92 %
NDWI	92 %	8 %	1,1 %	0,92 %
MNDWI	92 %	8 %	1,1 %	0,89 %
NDVI	91 %	9 %	1,2 %	0,85 %
NDSI	88 %	12 %	1,2 %	0,83 %

По результатам таблицы 12 индекс NDWI и MNDWI показывают высокую общую точность на тестовых данных, следовательно, данные индексы можно использовать для детектирования водных объектов, получая относительно точные результаты сегментации.

На рисунке 19 представлена картосхема локализации участков затопления (отмеченные красным цветом). Потенциальную опасность представляет угроза разлива реки в местах прохождения опор воздушных линий электропередачи (отмеченные желтым цветом), находящиеся в прибрежной зоне реки Кува г. Кудымкар (Пермский край).

По данным МЧС 29 апреля 2016 года [37] наблюдались опасные гидрологические явления, когда уровень воды в реке превысил критическую отметку (5,5 м) и составил 6,1 м. Рисунок 19, а можно сравнить с рисунком 19, б, где изображен снимок Landsat-8 от 5 мая 2018 года на ту же территорию, когда уровень воды в реке составлял 4 м.

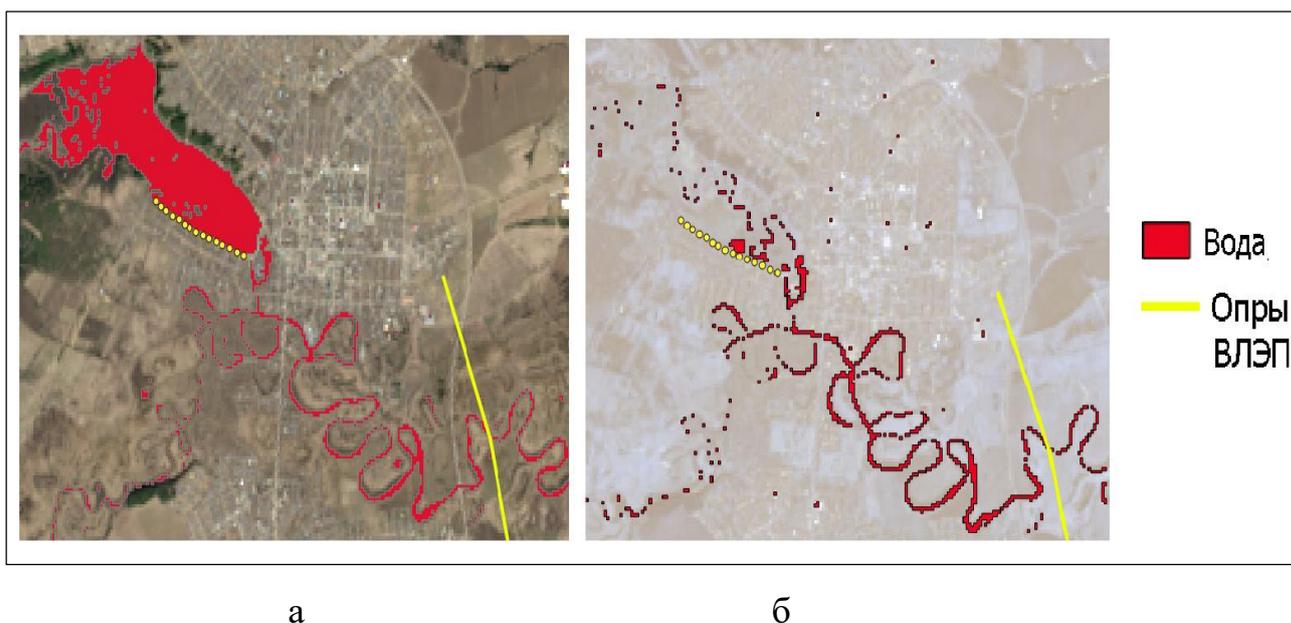


Рисунок 19 — Картосхема: а — снимок Landsat-8 от 29.04.2016 г.; б — снимок Landsat-8 от 05.05.2018г.

Из рисунка 19, а видно, что в конце апреля 2016 года на исследуемой территории действительно сложилась такая ситуация, при которой произошло масштабное затопление. На рисунке 19, б видно, что в начале мая 2018 года на исследуемой территории затопления не было.

Таким образом, для решения задачи определения фактов затопления объектов электросетевого комплекса имеет смысл использовать разработанную методику для детектирования и локализации фактов затопления объектов электросетевого комплекса в период паводков, также данная методика способна оказывать информационную поддержку для лиц, принимающих решения.

3.2 Вывод по главе 3

В ходе разработки методики локализации участков затопления на основе обработки и анализа данных ДЗЗ выполнены следующие этапы: проектирование диаграммы деятельности методики локализации участков затопления, выполнен расчет многоспектральных индексов воды и определены диапазоны значений принадлежности пикселей к водным объектам, разработана блок-схема алгоритма работы программного модуля сегментации изображения реализованного на языке программирования Python, а также продемонстрированы результаты сегментации по каналам WRI, NDWI, MNDWI, NDVI, NDSI, и их последующая векторизация в формат shp.

Выполнен расчет общей точности сегментации, общей ошибки сегментации, ошибки пропусков и ошибки ложной сегментации для водных индексов, в результате чего индексы NDWI и MNDWI показали наиболее высокую общую точность на тестовых данных.

Проведена практическая апробация разработанной методики на экспериментальной территории с использованием свободно распространяемых данных ДЗЗ и построена картосхема локализации участков затопления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы были решены следующие задачи:

- проведен анализ актуальности применения информационно-управляющих систем для обработки сезонных подтоплений объектов электросетевого комплекса по данным дистанционного зондирования Земли;

- выполнен обзор и определены критерии выбора космических оптико-электронных съемочных систем среднего и низкого пространственного разрешения, в результате сравнительного анализа основных технических характеристик спутниковых программ в качестве данных для дешифрирования фактов затоплений выбран спутник Landsat-8;

- рассмотрены существующие стандартизированные уровни обработки и представления данных ДЗЗ из космоса, и сделан вывод, что формат изображения выбранной спутниковой системы Landsat-8 — GeoTIFF, имеющий стандартный уровень обработки 2A;

- разработана методика локализации участков затопления на основе обработки и анализа данных ДЗЗ, а именно:

- проведен обзор многоспектральных водных индексов для дешифрирования фактов подтопления объектов электросетевого комплекса по данным дистанционного зондирования Земли, также выполнено их вычисление и определены диапазоны для воды;

- для каждого индекса выполнена сегментация с помощью программного модуля, реализованного на языке Python, на основе учета диапазона значений пяти водных многоспектральных индексов, позволяющих выделять водные объекты;

- построена картосхема локализации участков затопления.

- Построена матрица ошибок, по результатам которой определены индексы NDWI и MNDWI, показывающие наиболее высокую общую точность на тестовых данных;

- выполнена практическая апробация разработанной методики на экспериментальной территории с использованием свободно распространяемых данных ДЗЗ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1) Шагаев, М. П. Оценка возможностей использования данных прибора MODIS для мониторинга паводковой обстановки на примере паводка на реке Чулым весной 2014 года / М. П. Шагаев, Е. Н. Кулик // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2015. — Т. 4. № 1. — С. 32-37.

2) Архипкин, О. П. Оценка потенциального развития паводков на основе анализа многолетних временных рядов ДДЗ / О.П. Архипкин, Г.Н. Сагатдинова, Ж.А. Бралинова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2014. — Т. 11. № 4. — С. 127-136.

3) Словари и энциклопедии на Академике [Электронный ресурс]: // Режим доступа: <http://dic.academic.ru/>

4) Чандра А. М., Гош С. К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / Пер. с англ. А. В. Кирюшина. — М.: Техносфера, 2008 — 288 с.

5) Словарь энергетических терминов [Электронный ресурс]: // Режим доступа: <http://www.megaresort.ru>

6) Системы мониторинга состояния воздушных ЛЭП, требования к ним, возможные реализации, практические результаты [Электронный ресурс]: // Режим доступа: <https://rusov.com>

7) Новгородцева О. Г. Мониторинг паводковой ситуации по данным дистанционного зондирования и составление карты паводковой обстановки в бассейне р. Обь // ГЕО-Сибирь — 2008. IV Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 5 т. (Новосибирск, 22-24 апреля 2008 г.). — Новосибирск: СГГА, 2008. Т. 3, ч. 2. — С. 270-273.

8) Конспект лекций по дисциплине «Дистанционное зондирование и фотограмметрия» [Электронный ресурс]: // Режим доступа: <http://ecolog.pro>

9) Барбасов В.К., Гаврюшин Н.М., Дрыга Д.О., Батаев М.С, Алтынов А.Е. Многопорторные беспилотные летательные аппараты и возможности

их использования для дистанционного зондирования Земли [Электронный ресурс]: // Режим доступа: <http://съемкавоздуха.рф>

10) Антонов В. Н., Новгородцева О. Г. Мониторинг и картографирование паводковой ситуации в Сибирском федеральном округе / В. Н. Антонов, О. Г. Новгородцева // Образовательные ресурсы и технологии. — 2014. — № 5 (8). — С. 81-86.

11) Georgios A. Kordelas, Ioannis Manakos, David Aragonés, Ricardo Díaz-Delgado, Javier Bustamante. Fast and Automatic Data-Driven Thresholding for Inundation Mapping with Sentinel-2 Data // Remote Sens. — 2018. — 10. — P. 910.

12) Xianwei Wang, and Hongjie Xie. A Review on Applications of Remote Sensing and Geographic Information Systems (GIS) in Water Resources and Flood Risk Management // Water. — 2018. — 10. P. 608.

13) Рылов, С. А. Технология обработки данных с космических аппаратов «Канопус-В», «Ресурс-П» и «Метеор-М» для мониторинга и картографирования паводковой ситуации / С. А. Рылов, О. Г. Новгородцева, И. А. Пестунов, О. А. Дубровская, Ю. Н. Синявский // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы II международной научной конференции / Сиб. федер. ун-т, Ин-т космич. и информ. технологий; науч. ред. Е. А. Ваганов; отв. ред. М. В. Носков. — 2015 — 367 с.

14) Адамович, Т. А., Кантор Г. Я. Оценка площадей затопления территорий в период весеннего паводка по данным дистанционного зондирования Земли // Экология родного края: проблемы и пути их решения материалы XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Вятский государственный университет. — 2017. — Т. Книга (1). — с. 16-18.

15) Кит, М.Р. Построение информационной системы для прогнозирования последствий паводков на основе результатов дистанционного зондирования Земли / М. Р. Кит, С. В. Плесовских // Электронное научное издание «Ученые заметки ТОГУ». — 2015. — Т. 6. № 1. — С.186 – 192.

16) Пестунов, И. А. Сегментация спутниковых изображений в задачах оперативного анализа последствий чрезвычайных ситуаций (на примере лесных пожаров и паводков) / И. А. Пестунов, С. А. Рылов, О. А. Дубровская, Ю. Н. Синявский, О. Г. Новикова, Д. Ю. Завьялова // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы III международной научной конференции / Сиб. федер. ун-т, Ин-т космич. и информ. технологий; науч. ред. Е. А. Ваганов; отв. ред. М. В. Носков. — 2016 — 295 с.

17) Тарарин, А. М. Космический мониторинг и оценка риска затопления урбанизированных территорий в периоды половодий: дис.канд. техн. наук: 25.00.36 / Тарарин Андрей Михайлович. — Нижний Новгород, 2010. — 135 с.

18) Моделирование паводков в Красноярском крае. Геопортал ИВМ СО РАН Электронный ресурс]: // Режим доступа: <http://gis.krasn.ru>

19) В. Ф. Усачев., Н. Ю. Бурда, Наводнения и Геоинформационные технологии. — СПб. Государственный гидрологический институт, 2009. 12 с.

20) Шалькевич, Ф.Е. Методы аэрокосмических исследований: курс лекций / Ф.Е. Шалькевич. — Минск.: БГУ, 2006. — 161 с.

21) Первая международная конференция Земли из Космоса — наиболее эффективные решения [электронный ресурс] / Режим доступа: <http://enu.kz>

22) Космическая съемка [Электронный ресурс]: Геоинформационные системы и космический мониторинг // Режим доступа: <https://sovzond.ru>

23) А. В. Беленов Стандартные уровни обработки и форматы представления данных ДЗЗ из космоса. Мировой опыт // Геоматика. — 2009. — № 4(5). — с. 18-20.

24) Сутырина Е. Н. Дистанционное зондирование Земли : учеб. пособие / Е. Н. Сутырина. — Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. — 165 с.

25) Н.А. Куртушин, С.Ю. Чупин Обработка спутниковых снимков Landsat-8 // Доклады ТУСУРа. — 2016.

26) Водный кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс] : федер. закон от 30.06.2006 № 74-ФЗ ред. от 29.07.2017 // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». — Режим доступа: <http://www.consultant.ru>

27) М.Ю. Катаев, А.А. Бекеров Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям // Доклады ТУСУРа. — 2017. — Т. 20 ,№ 4. — с. 105-108

28) Modelling spatial-temporal change of Poyang Lake using multitemporal Landsat imagery / F. Hui, B. Xu, H. Huang, Q. Yu, P. Gong // International Journal of Remote Sensing. — 2008. — Vol. 29, No. 20. — P. 5767 — 5784.

29) Ji L. Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index / L. Ji, L. Zhang, B. Wylie // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. — 2009. — Vol. 75, No. 11. — P. 1307 — 1317.

30) Sun F. Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery / F. Sun, W. Sun, J. Chen, P. Gong // International Journal of Remote Sensing. — 2012. — Vol. 33, No. 21. — P. 6854— 6875.

31) Бизли, Б.М. Python. Подробный справочник / Б.М. Бизли. — СПб.; М. : Символ, 2010. — 858 с.

32) Преснякова А. Н., Писарев А. В., Храпов С. С. Исследование динамики затопления территории Волго-Ахтубинской поймы по данным космического мониторинга // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика . — 2017. —№ 1 (38). — С. 66-74

33) Евдокимов С. И., Михалап С. Г. Определение физического смысла комбинации каналов снимков LANDSAT для мониторинга состояния наземных и водных экосистем // Естественные и физико-математические науки. — 2015. —№ 7. — С. 21-32.

34) Cox, Helen. Mapping snow cover using MODIS Part II: Normalized Difference Snow Index / Helen Cox, Maziyar Boustani, Laura Yetter — California State University — Northridge, 2014

35) Геологическая служба США [Электронный ресурс]: // Режим доступа: <https://ers.cr.usgs.gov>

36) Матрица ошибок и расчет показателей точности тематических карт
[Электронный ресурс]: // Режим доступа: <http://gis-lab.info>

37) Главное управление МЧС России по Пермскому краю [Электронный ресурс]: // Режим доступа: <http://59.mchs.gov.ru>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 — Основные технические характеристики оптико-электронных спутников

Пространственное разрешение (в надире), м	Спектральный диапазон, мкм	Режим съемки	Периодичность съемки, сутки	Ширина полосы съемки, км	Доступ к снимкам
LANDSAT-8					
30	0,43–0,45 (фиолетовый или coastal) 0,45–0,52 (синий) 0,53–0,60 (зеленый) 0,63–0,68 (красный) 0,85–0,89 (ближний ИК)	VNIR	16	185	Свободно распространяемые
30	1,36–1,39 (Cirrus) 1,57–1,65 (SWIR-1) 2,11–2,29 (SWIR-2)	SWIR			
15	0,50–0,68	PAN			
100	10,6–11,19 (TIRS 1) 11,5–12,51 (TIRS 2)	TIR			
TERRA/MODIS					
15	1: 0,52–0,60 2: 0,63–0,69 3N (nadir looking): 0,76–0,86 3B (backward looking): 0,76–0,86	VNIR	16	60	Свободно распространяемые
30	4: 1,600–1,700 5: 2,145–2,185 6: 2,185–2,225 7: 2,235–2,285 8: 2,295–2,365 9: 2,360–2,430	SWIR			
90	10: 8,125–8,475 11: 8,475–8,825 12: 8,925–9,275 13: 10,25–10,95 14: 10,95–11,65	TIR			

Окончание таблицы А.1

Пространственное разрешение (в надире), м	Спектральный диапазон, мкм	Режим съемки	Периодичность съемки, сутки	Ширина полосы съемки, км	Доступ к снимкам
AQUA/MODIS					
250	1–2 :0,62–0,88	Гиперспектральный	0,5	2300	Свободно распространяемые
500	3–7 :0,46–2,16				
1000	8–19 :0,41–0,97				
	20–25 :3,66–4,55				
	26: 1,36–1,39				
	27–36:0,54–14,39				
SENTINEL-2A, 2B					
10	0,490; 0,560; 0,665; 0,842	Гиперспектральный	10	290	Свободно распространяемые
20	0,705; 0,740; 0,783; 0,865; 1,610; 2,190				
60	0,443; 0,945; 1,375				

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

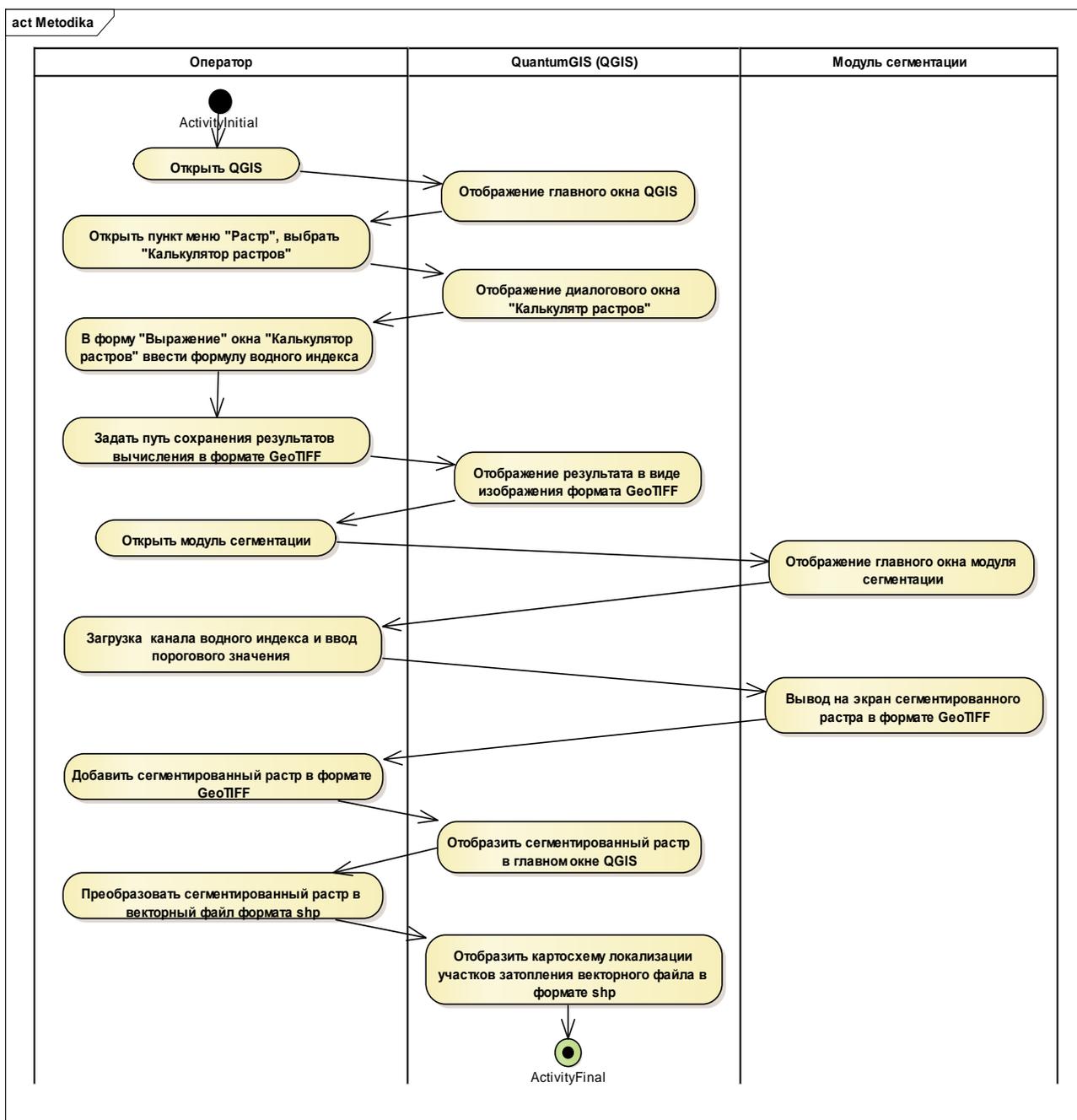


Рисунок Б.1 — Диаграмма деятельности методики локализации участков затопления

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Плакаты презентации

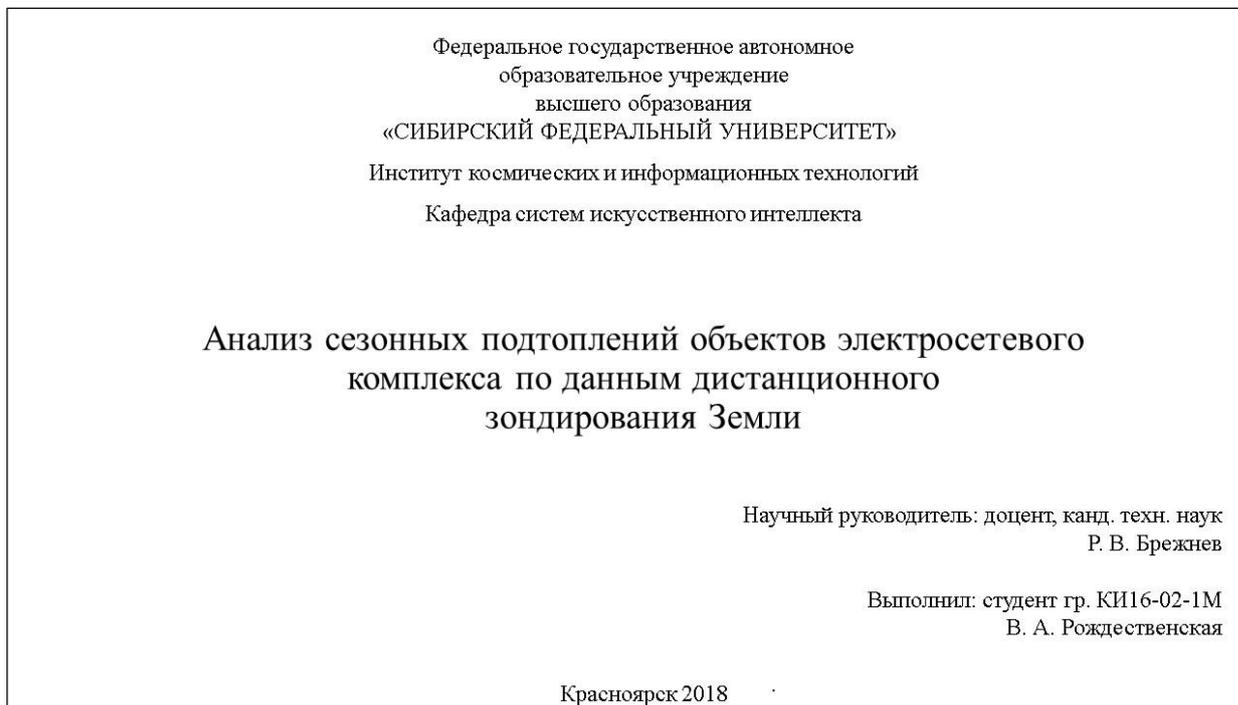


Рисунок В.1 — Плакат презентации № 1

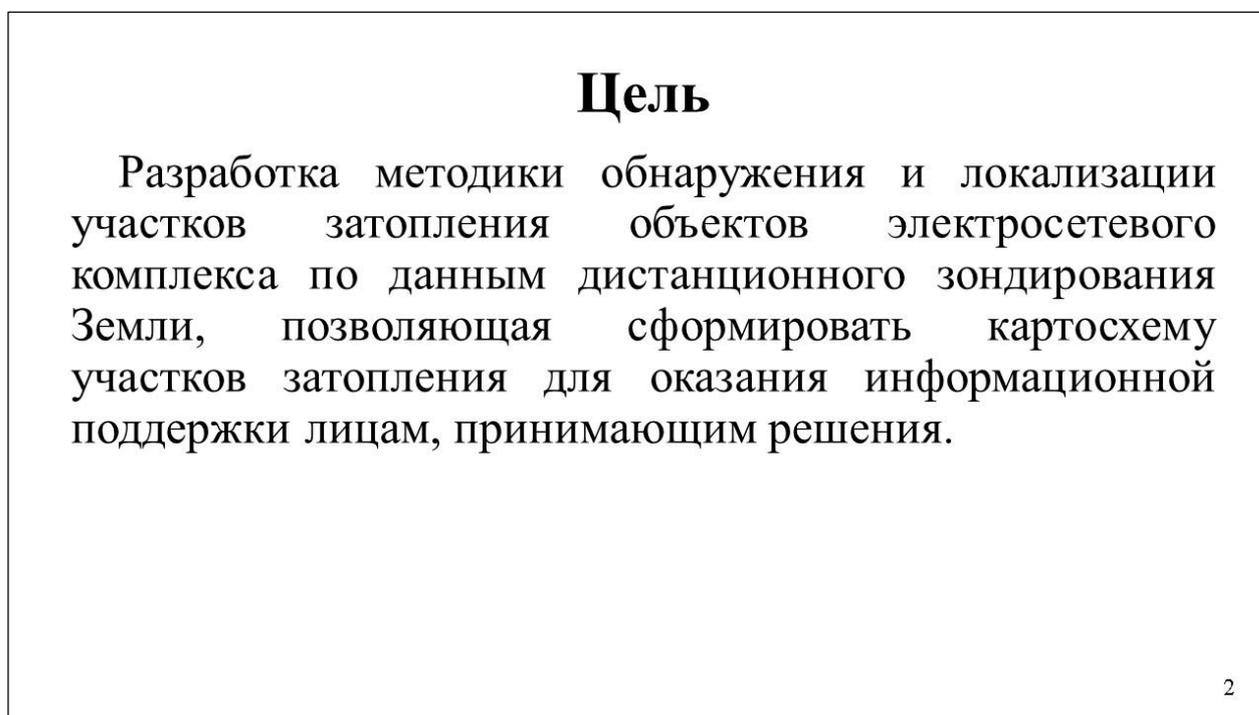


Рисунок В.2 — Плакат презентации № 2

Задачи

- 1) обзор и выделение критериев релевантности данных ДЗЗ для мониторинга состояния сезонных подтоплений объектов электросетевого комплекса;
- 2) разработка методики локализации участков затопления на основе обработки и анализа данных ДЗЗ;
- 3) проведение практической апробации разработанной методики на экспериментальной территории с использованием свободно распространяемых данных ДЗЗ.

3

Рисунок В.3 — Плакат презентации № 3

Актуальность



Рисунок 1 — Паводок в апреле 2016 года г. Кудымкар (Пермский край)



Рисунок 2 — Последствия тайфуна «Лайонрок» в сентябре 2016 года (Приморский край)



Рисунок 3 — Затопление территории вблизи аэропорта г. Игарка в мае 2013 года

4

Рисунок В.4 — Плакат презентации № 4

Практическая значимость работы

Разработка программно-методического комплекса для детектирования и локализации фактов затопления объектов электросетевого комплекса в период паводков.

5

Рисунок В.5 — Плакат презентации № 5

Предмет исследования

Методика для обнаружения участков затопления, позволяющая оказывать информационную поддержку лицам, принимающим решения.

Объект исследования

Наземные объекты электросетевого комплекса в зоне затопления.

6

Рисунок В.6 — Плакат презентации № 6

Выбор данных ДЗЗ для анализа состояний сезонных подтоплений объектов электросетевого комплекса

Таблица 1 — Технические характеристики оптико-электронных спутников по данным компании «Совзонд»

Пространственное разрешение (в надире), м	Периодичность съемки, сутки	Ширина полосы съемки, км	Доступ к снимкам
LANDSAT-8			
15, 30, 100	16	185	Свободно распространяемые
TERRA/MODIS			
15, 30, 90	16	60	Свободно распространяемые
AQUA/MODIS			
250, 500, 1000	0,5	2300	Свободно распространяемые
SENTINEL-2A, 2B			
10, 20, 60	10	290	Свободно распространяемые

7

Рисунок В.7 — Плакат презентации № 7

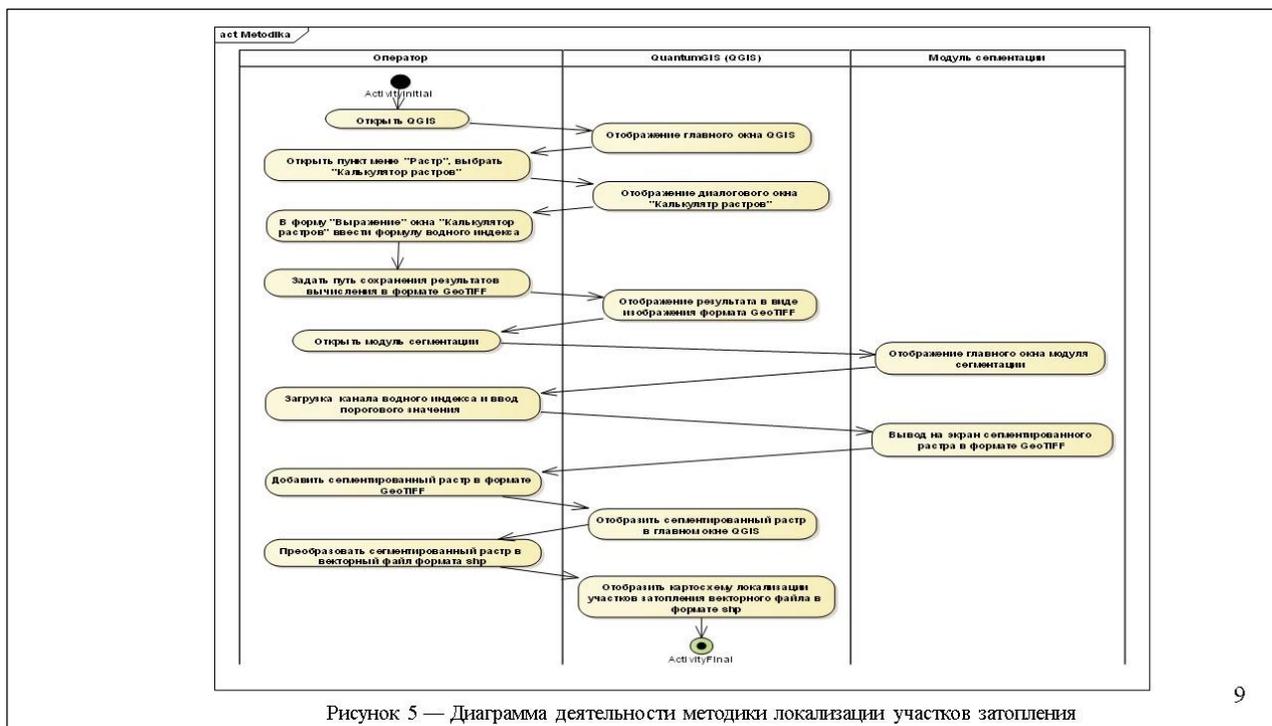
Экспериментальные данные дистанционного зондирования Земли



Рисунок 4 — Фрагмент изображения реки Кува г. Кудымкар (Пермский край) по данным ers.cr.usgs.gov

8

Рисунок В.8 — Плакат презентации № 8



9

Рисунок В.9 — Плакат презентации № 9

Многоспектральные индексы, используемые для определения водных объектов

Таблица 2 — Формулы и диапазоны значений многоспектральных индексов по материалам статьи М. Ю. Катаева, А. А. Бекерова

Индекс	Выражение	Диапазон значений
WRI	$(b_{Green} + b_{Red}) / (b_{NIR} + b_{MIR})$	Вода имеет значение больше 1
NDWI	$(b_{Green} - b_{NIR}) / (b_{Green} + b_{NIR})$	Вода имеет положительное значение
MNDWI	$(b_{Green} - b_{MIR}) / (b_{Green} + b_{MIR})$	Вода имеет положительное значение
NDVI	$(b_{NIR} - b_{Red}) / (b_{NIR} + b_{Red})$	Вода имеет отрицательное значение
NDSI	$(b_{Green} - b_{SWIR}) / (b_{Green} + b_{SWIR})$	Вода имеет положительное значение

Таблица 3 — Диапазоны значений водных объектов для снимка Landsat-8 от 26.04.2016 г.

Индекс	WRI	NDWI	MNDWI	NDVI	NDSI
Диапазон значений	>1,0	>0,1	>0,1	-0,5 < x ≤ 0	0,06 < x ≤ 0,4

10

Рисунок В.10 — Плакат презентации № 10

Алгоритм сегментации участков затопления

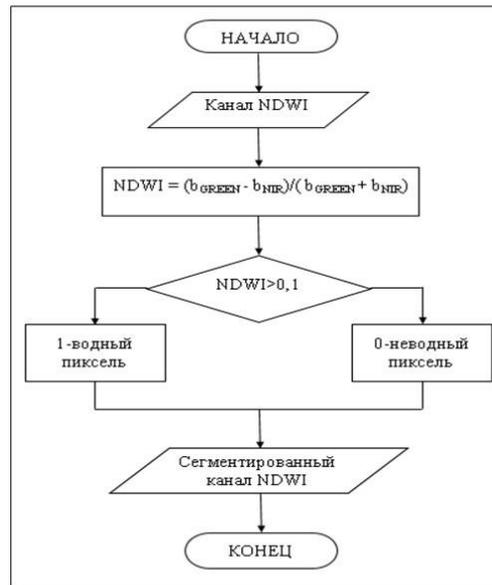


Рисунок 6 — Алгоритм работы программного модуля сегментации изображения

11

Рисунок В.11 — Плакат презентации № 11

Результаты локализации водных объектов по каналу NDWI

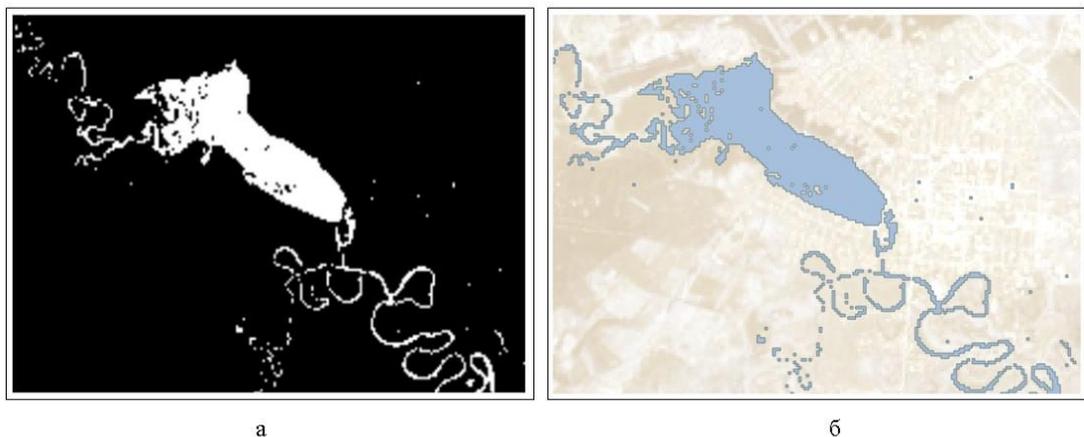


Рисунок 7 — Результаты локализации водных объектов: а — результат сегментации по каналу NDWI; б — водные объекты в векторном формате

12

Рисунок В.12 — Плакат презентации № 12

Результаты локализации водных объектов по каналу MNDWI

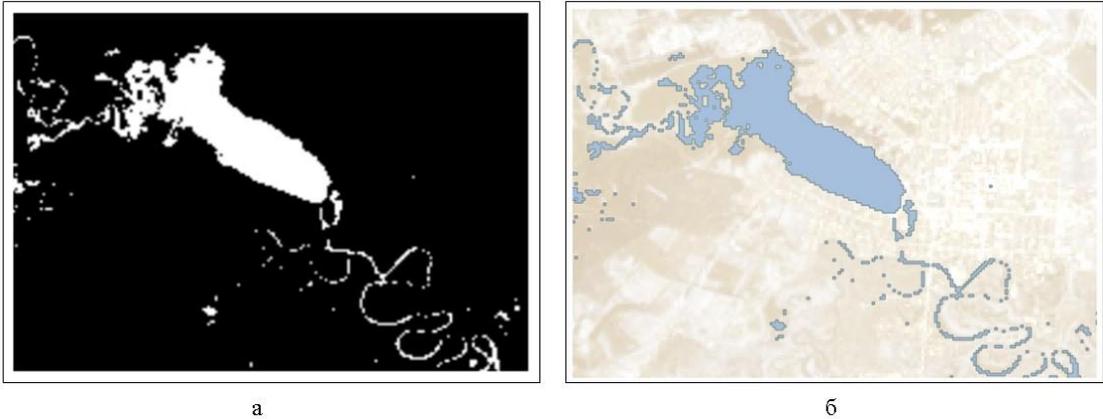


Рисунок 8 — Результаты локализации водных объектов: а — результат сегментации по каналу MNDWI; б — водные объекты в векторном формате

13

Рисунок В.13 — Плакат презентации № 13

Сравнение результатов показателя общей точности выделения водных объектов

Расчет общей точности производится по формуле:

$$\varepsilon = \frac{n_{AA} + n_{BB} + n_{CC} + n_{DD} + n_{EE}}{N}, \quad (1)$$

где $n_{AA} + n_{BB} + n_{CC} + n_{DD} + n_{EE}$ — общее количество правильно сегментированных пикселей; N — общее количество пикселей в матрице.

Таблица 4 — Результаты сегментации фрагмента снимка для индексов WRI, NDWI, MNDWI, NDVI, NDSI

Индекс	Общая точность
WRI	87%
NDWI	92%
MNDWI	92%
NDVI	91%
NDSI	88%

14

Рисунок В.14 — Плакат презентации № 14

Картосхема локализации участков затопления

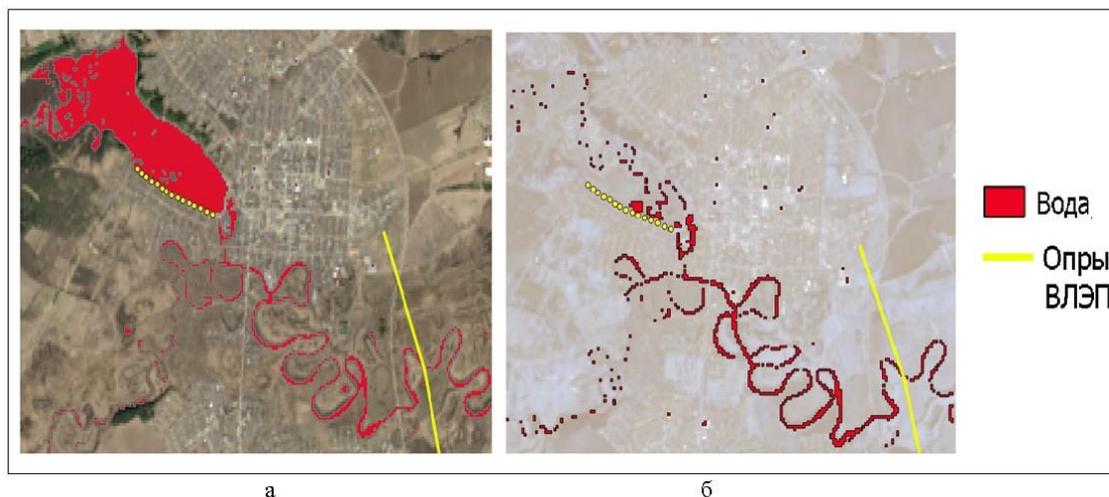


Рисунок 9 — Картосхема: а — снимок Landsat-8 от 29.04.2016 г.; б — снимок Landsat-8 от 05.05.2018г.

15

Рисунок В.15 — Плакат презентации № 15

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- определены критерии выбора спутниковых программ дистанционного зондирования Земли, релевантных решению задачи локализации участков затопления;
- разработана методика локализации участков затопления объектов электросетевого комплекса по данным ДЗЗ;
- создана картосхема локализации участков затопления объектов электросетевого комплекса;
- результат разработанной методики апробирован на экспериментальной территории;
- выполнен сравнительный анализ результатов показателей общей точности выделения участков затопления.

16

Рисунок В.16 — Плакат презентации № 16

Публикации

1) «Анализ сезонных подтоплений опор ВЛЭП по данным дистанционного зондирования Земли»;

2) «Анализ возможности использования данных дистанционного зондирования Земли для определения участков просеки, подлежащих расчистке в местах прохождения воздушных линий электропередачи».

17

Рисунок В.17 — Плакат презентации № 17