

Интеграция радиолокационных и оптических данных Sentinel для мониторинга и анализа паводков на примере катастрофических наводнений 2019 года в городе Тулун

А. А. Юрьев^{1,2}, Е. П. Душкин¹, А. А. Рыбченко^{1,2}

¹Институт земной коры СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128

²Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1,
e-mail: antonyrevgeo@mail.ru

Поступила в редакцию 31.12.2024 г., принята к печати 01.04.2025 г.

Объект исследования. Город Тулун в Иркутской области, где произошли разрушительные наводнения в 2019 г., нанеся значительный ущерб инфраструктуре и населению. **Цель.** Разработка и апробация методики интеграции данных со спутников Sentinel-1 и -2 для эффективного мониторинга паводков, анализа их динамики. **Материалы и методы.** Использовались снимки радиолокационных спутников Sentinel-1 и оптических спутников Sentinel-2. Обработка данных выполнялась через SNAP и Global Mapper, она включала геометрическую коррекцию, фильтрацию и интеграцию данных. Акцент сделан на временную синхронизацию, унификацию разрешения и методы взвешенного суммирования. **Результаты.** Исследование выявило значительные изменения в динамике площади водного зеркала с 2017 по 2024 г., особенно в 2019 г. Площадь варьировалась от 3.252 до 12.018 км², среднее значение составило 4.645 км². Интеграция данных существенно повысила точность мониторинга. **Выводы.** Интеграция данных Sentinel-1 и -2 позволила улучшить точность оценки масштабов наводнений, подчеркнув важность комплексного подхода. Результаты могут быть использованы для совершенствования стратегий управления рисками и разработки мер по снижению ущерба, а также для обеспечения более полной и надежной информацией при принятии решений.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, спутниковый мониторинг, катастрофический паводок, Тулун, Sentinel-1, Sentinel-2

Источник финансирования

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-27-20059, грант Иркутской области № 30-2025-004510

Integration of Sentinel radar and optical data for monitoring and analysis of floods on the example of the catastrophic floods of 2019 in Tulun

Anton A. Yuryev^{1,2}, Egor P. Dushkin¹, Artem A. Rybchenko^{1,2}

¹Institute of the Earth's Crust, SB RAS, 128 Lermontov st., Irkutsk 664033, Russia

²V.B. Sochava Institute of Geography, SB RAS, 1 Ulan-Batorskaya st., Irkutsk 664033, Russia,
e-mail: antonyrevgeo@mail.ru

Received 31.12.2024, accepted 01.04.2025

Research subject. In 2019, the city of Tulun in the Irkutsk Oblast experienced devastating floods, causing significant damage to infrastructure and the population. Detailed analysis and monitoring are required. **Aim.** Development and testing of a methodology for integrating data from Sentinel-1 and 2 satellites for effective flood monitoring, analysis of their dynamics, and assessment of suitability for identifying flooded areas. **Materials and methods.** Images from Sentinel-1 radar satellites and Sentinel-2 optical satellites were used. Data processing was carried out using SNAP and Global Mapper, including geometric correction, filtering, and data integration. Emphasis was placed on temporal synchronization, spatial resolution unification, and weighted summation methods. **Results.** The study revealed significant changes in the dynamics

Для цитирования: Юрьев А.А., Душкин Е.П., Рыбченко А.А. (2025) Интеграция радиолокационных и оптических данных Sentinel для мониторинга и анализа паводков на примере катастрофических наводнений 2019 года в городе Тулун. *Литосфера*, 25(6), 1404-1415. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-6-1404-1415>. EDN: OBJZBR

For citation: Yuryev A.A., Dushkin E.P., Rybchenko A.A. (2025) Integration of Sentinel radar and optical data for monitoring and analysis of floods on the example of the catastrophic floods of 2019 in Tulun. *Lithosphere (Russia)*, 25(6), 1404-1415. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-6-1404-1415>. EDN: OBJZBR

of the water surface area from 2017 to 2024, especially in 2019. The flooded area ranged from 3.252 to 12.018 km², with an average value of 4.645 km². Data integration significantly enhanced monitoring accuracy. *Conclusions.* The integration of Sentinel-1 and Sentinel-2 data improved the accuracy of flood scale assessments, highlighting the importance of a comprehensive approach. The results can be used to improve risk management strategies and develop damage reduction measures, as well as to provide more complete and reliable information for decision-making.

Keywords: remote sensing, satellite monitoring catastrophic flood, Tulun, Sentinel-1, Sentinel-2

Funding information

The study was funded by the Russian Science Foundation, project No. 24-27-20059, and the Irkutsk Region, grant No. 30-2025-004510

ВВЕДЕНИЕ

В июне–июле 2019 г. в Иркутской области в результате выхода нескольких рек из своих берегов произошло два катастрофических наводнения. Пострадали Нижнеудинский, Тайшетский, Чунский, Зиминский, Куйтунский и Тулунский районы (Дугарова, 2021). По данным властей, во время наводнения в Иркутской области было подтоплено 10 890 жилых домов, из которых более 5400 домов снесено полностью или не подлежало восстановлению.

Одним из наиболее пострадавших районов оказался Тулунский, в том числе пострадал и сам г. Тулун. Наводнения привели к серьезным разрушениям инфраструктуры и тяжелым последствиям для населения. Из-за резкого подъема уровня воды в р. Ия, особенностей застройки (многие строения расположены в пойме р. Ия) и рельефа города были затоплены промышленные объекты, жилые дома, очистные сооружения, также прервано движение по федеральной трассе Р-255 “Сибирь” (Шаликовский и др., 2019; Воронова и др., 2020; Мотовилов и др., 2021).

Проведенные исследования катастрофических паводков 2019 г. в Иркутской области выявили значительное увеличение осадков и нестабильность гидрологических характеристик рек, особенно в бассейне р. Ия (Георгиевский и др., 2020). Данные дистанционного зондирования, такие как снимки Sentinel-2, доказали свою эффективность в мониторинге и оценке паводковых ситуаций, предоставляя точную информацию о затопленных территориях (Решетило, Хлебникова, 2021). Моделирование метеорологических условий, включая данные ICON и методы RCNA, показало возможности прогнозирования и картирования паводков, что является важным для управления рисками наводнений (Fernandez et al., 2023). Данные исследования подчеркивают необходимость совершенствования гидрологического мониторинга и прогнозирования, а также принятия мер по снижению рисков, включая запрет строительства в зонах затопления (Кичигина, 2020).

Традиционные методы мониторинга, такие как наземные гидрологические станции, часто име-

ют ограниченный охват и не способны обеспечить оперативное и точное отслеживание динамики затоплений на больших территориях. Спутниковые технологии, в свою очередь, могут предоставлять актуальные данные с высокой пространственной и временной разрешающей способностью (Прошин и др., 2016).

Для более эффективного метода мониторинга и контроля над подобными, как в Тулуне, происшествиями было решено провести анализ паводков с помощью комбинирования снимков Sentinel-1 и -2.

Спутники Sentinel-1 и -2 предлагают уникальные возможности для мониторинга земной поверхности. Sentinel-1, оснащенный радиолокационным оборудованием, позволяет получать данные независимо от погодных условий и времени суток, что критически важно в условиях частой облачности. Sentinel-2 обеспечивает высокое пространственное разрешение и возможность спектрального анализа, что помогает детально оценивать состояние поверхности (Fernandez et al., 2023).

В качестве объекта исследования выбран г. Тулун (Иркутская область) и паводок, произошедший в 2019 г. В табл. 1 представлены географические координаты углов объекта исследования для использования данных дистанционного зондирования при мониторинге водных объектов (рис. 1).

Ранее на данную территорию для решения разных задач, в том числе связанных с наводнением 2019 г. (Шаликовский и др., 2019; Плотникова, Хлебникова, 2020; Рунова, Степанова, 2024), исследователи использовали данные, полученные только со спутников Sentinel-2. Однако в рамках своего исследования коллектив авторов (Fernandez et al., 2023), также используя группу спутников Sentinel-2, в заключении своей работы для анализа паводковых режимов предложили использовать данные со спутников Sentinel-1 и -2.

Интеграция данных с разных типов спутников может позволить более точно и надежно определять зоны затопления и динамику их изменений, что крайне важно для разработки эффективных мер по предотвращению и минимизации последствий паводков. Использование комбинированных спутниковых данных также может способствовать

Таблица 1. Географические координаты выбранного объекта исследования

Table 1. Geographical coordinates of the selected study site

Номер точки	Северная широта	Восточная долгота
1	54°36'02.9811"	100°32'04.2274"
2	54°36'02.9811"	100°39'57.7148"
3	54°30'05.0355"	100°39'57.7148"
4	54°30'05.0355"	100°32'04.2274"
5	54°36'02.9811"	100°32'04.2274"

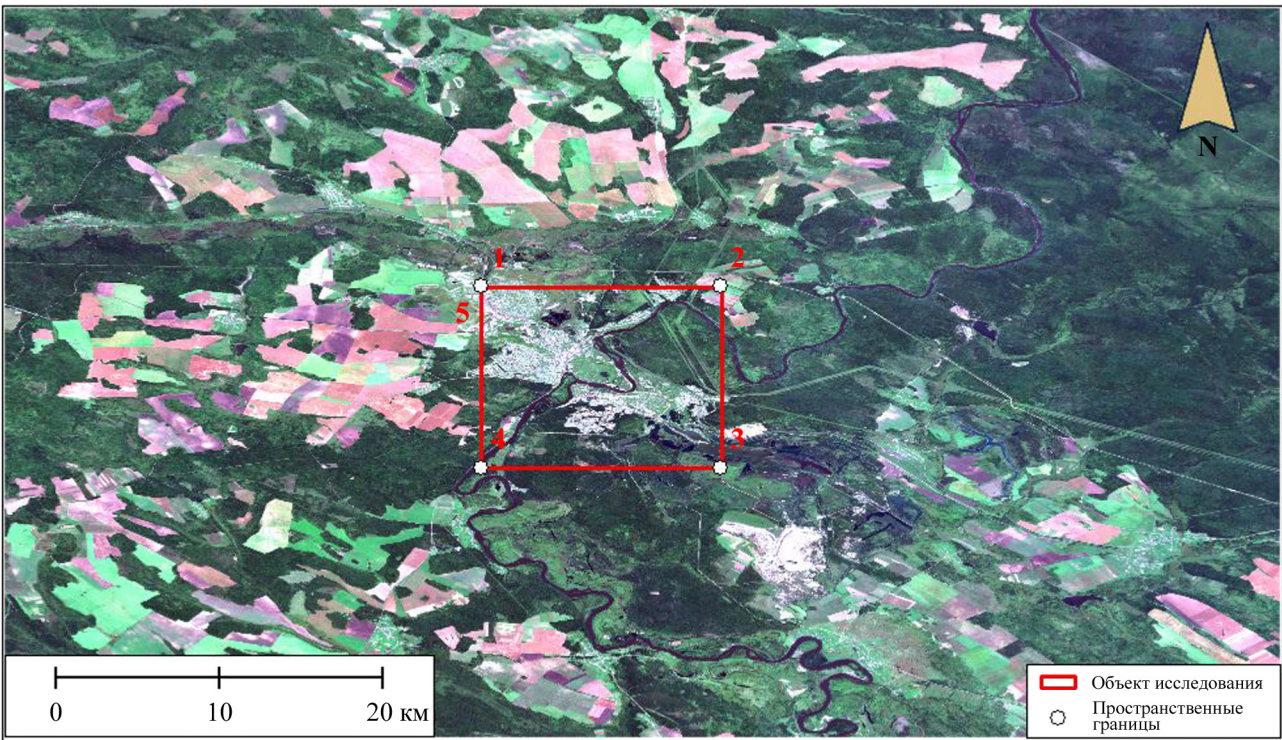


Рис. 1. Схема расположения объекта исследования.

Fig. 1. Schematic of the location of the object of study.

улучшению системы предупреждения и управления чрезвычайными ситуациями, помогая властям и службам реагирования более оперативно и точно принимать решения в условиях кризиса.

В связи с этим коллективом авторов настоящей работы поставлена цель – разработка методики комбинирования данных, полученных со спутников Sentinel-1 и -2, и проверка ее пригодности для мониторинга динамики колебания площади водного зеркала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве основных материалов исследования выступали снимки, полученные со спутников Sentinel-1 и -2. Интеграция материалов повышает надежность оценки динамики процессов, сглаживая

погрешности и пропуски в наборе данных. Это особенно важно при мониторинге быстро развивающихся наводнений, когда требуется максимально полная и актуальная информация. Эти спутники играют значительную роль в программах дистанционного зондирования Земли, предоставляя ценные данные для различных научных и прикладных исследований. Sentinel-1, оснащенный радиолокационными системами, и Sentinel-2, использующий оптические технологии, имеют свои уникальные характеристики и возможности, которые влияют на их применение при мониторинге природных явлений и изменений окружающей среды.

Sentinel-1 и -2 являются важными компонентами программы наблюдения за Землей, разработанной Европейским космическим агентством (ESA) в рамках инициативы Copernicus (Nagler et al., 2015;

Phiri et al., 2020). В табл. 2 приведены их ключевые характеристики.

Sentinel-1, оснащенный радиолокационными системами, предоставляет данные о различных природных явлениях и изменениях на поверхности Земли даже в условиях облачности (Torres et al., 2012; Potin et al., 2016). В свою очередь, Sentinel-2 использует оптические технологии для сбора высококачественных изображений, что позволяет анализировать состояние сельского хозяйства, лесных массивов и водных ресурсов (Drusch et al., 2012; Phiri et al., 2020).

Процесс отбора снимков тщательно продуман, чтобы обеспечить надежность и точность наших выводов. Основные принципы отбора следующие.

1. Временной охват. Мы стремились охватить весь летний период (июнь, июль, август) для каждого года с 2017 по 2024. Это позволило учесть сезонные изменения и динамику затоплений в разные годы.

2. Частота снимков. Мы старались отбирать по несколько снимков за каждый месяц, чтобы иметь возможность наблюдать изменения и колебания уровня воды в течение всего летнего сезона. Это обеспечивало более детализированное представление о развитии паводковых ситуаций.

3. Учет затоплений. В приоритете были снимки, на которых наблюдались явные признаки затоплений. Такой подход помогал сосредоточиться на периодах, когда паводковые события были наиболее интенсивными и требовали внимания.

4. Минимальная облачность. Важным критерием стало наличие минимальной облачности на снимках. Мы использовали снимки с облачностью

не более 15%, чтобы обеспечить высокое качество данных и точность анализа.

Таким образом, процесс отбора снимков нацелен на получение наиболее полной и точной информации о состоянии и изменениях водных поверхностей в пределах объекта исследования.

Методы, применяемые в исследовании, направлены на интеграцию и анализ данных в целях получения точной информации о динамике изменения площади водного зеркала.

Перед непосредственно интеграцией данных проводилась их предварительная обработка. Она включала несколько ключевых этапов, обеспечивающих точность и надежность последующего анализа.

Ниже представлена табл. 3, которая демонстрирует временной ряд снимков, процент используемых снимков и допустимую облачность для обоих спутников. Эта информация поможет лучше понять возможности и ограничения, связанные с использованием данных, полученных с этих спутников.

Анализировалось относительно равное количество снимков, что обеспечило оптимальное сочетание радиолокационных и оптических данных, позволяя эффективно проводить мониторинг динамики изменения площади водного зеркала. Такой подход позволил максимально использовать преимущества каждого спутника для достижения высокой точности и надежности результатов.

1. *Обработка данных Sentinel-1.* Для радиолокационных данных Sentinel-1 применялось программное обеспечение SNAP (Sentinel Application Platform) версии 11.0. Программа SNAP, разрабо-

Таблица 2. Ключевые характеристики спутников

Table 2. Key characteristics of satellites

Характеристика	Sentinel-1 (SAR)	Sentinel-2
Тип	Радиолокационные спутники	Спутники с оптическими системами
Орбита	Полярная орбита, высота 693 км над ур. моря	Полярная орбита, высота 786 км над ур. моря
Спектральные диапазоны	Диапазон микроволн 5.4–7.5 ГГц	13 спектральных полос, диапазон 0.4–2.5 мкм
Пространственное разрешение	До 5 м	10 м. Спектральные каналы B03 и B08 (NDWI)
Частота повторения	≈6 дней	≈5 дней
Дата запуска	Sentinel-1A – 2014 г., Sentinel-1B – 2016 г., Sentinel-1C – 2024 г. Спутник Sentinel-1D находится в разработке	Sentinel-2A – 2015 г., Sentinel-2B – 2017 г., Sentinel-2C – 2024 г., который в конечном счете заменит спутники А и В. Пуск спутника Sentinel-2D запланирован на 2028 г.
Производитель	Airbus Defence and Space	Airbus Defence and Space и Thales Alenia Space
Страна	Европейский Союз (в рамках программы ESA)	
Ресурсы для скачивания	Copernicus Open Access Hub, Sentinel Hub, NASA Earthdata, Alaska Satellite Facility – Alaska Hub	

Таблица 3. Характеристика используемых снимков

Table 3. Characteristics of the used images

Тип спутника	Период наблюдения	Общее кол-во снимков	Кол-во используемых снимков	Процент используемых снимков	Допустимая облачность
Sentinel-1	01.06.17– 31.08.21 (летний период)	252	58	23%	Не зависит от облачности
Sentinel-2	01.06.17–31.08.24 (летний период)	1147	51	5%	До 15%

танная Европейским космическим агентством, предоставляет мощные инструменты для обработки и анализа данных, полученных с радиолокационных спутников. Этот инструмент обладает широким спектром функций для предобработки, включая геометрическую коррекцию, фильтрацию спекл-шумов и калибровку данных, что позволяет получить более чистые и точные изображения для анализа (рис. 2, 3).

2. *Обработка данных Sentinel-2.* Для оптических данных Sentinel-2 применялось программное обеспечение Global Mapper версии 24.1. Оно используется для коррекции атмосферных влияний, радиометрической коррекции и унификации данных, что включает устранение облачности и других атмосферных искажений, а также позволяет интегрировать данные в единую географическую систему координат.

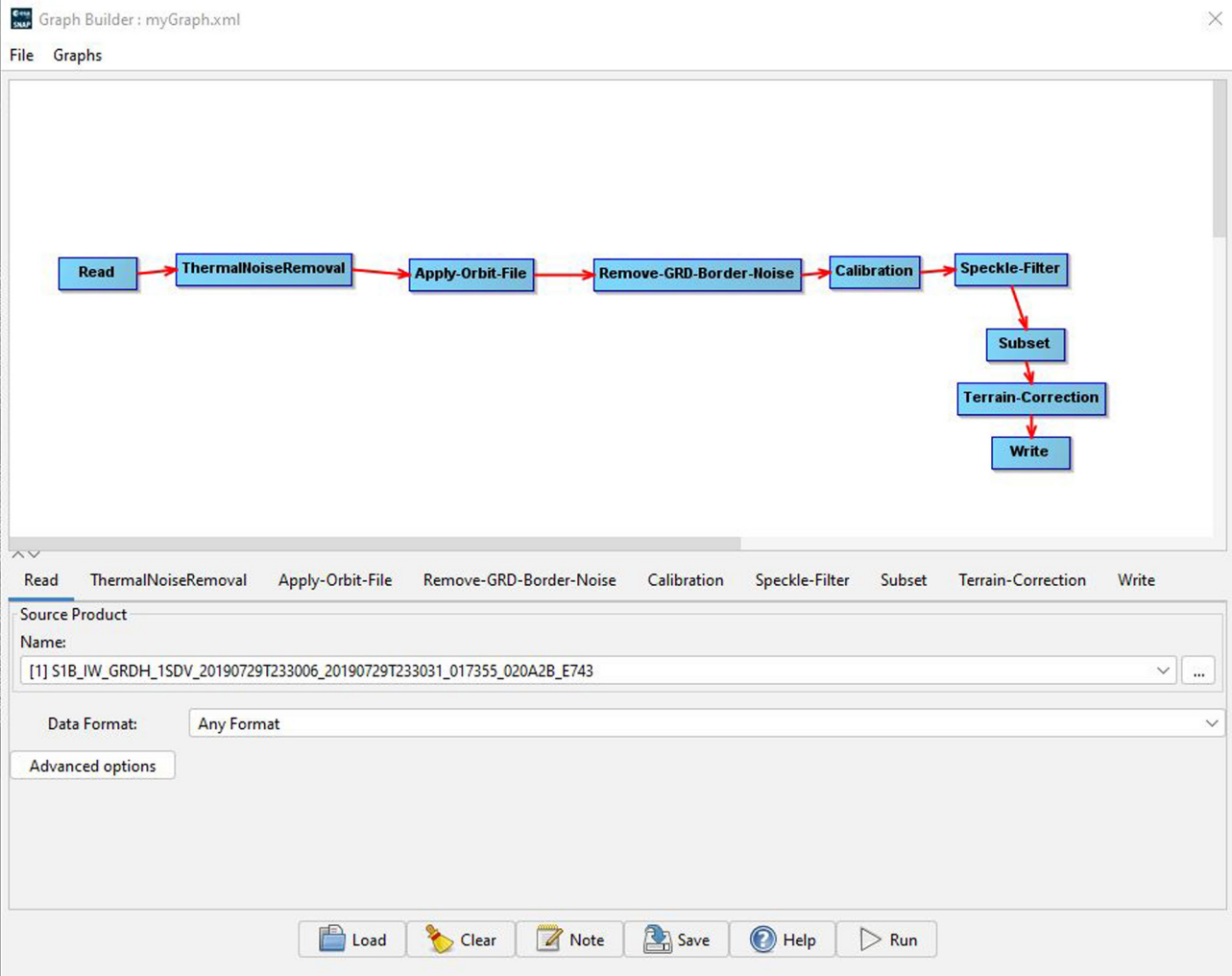


Рис. 2. План-схема этапов предварительной обработки снимков SAR в программе SNAP.

Fig. 2. Plan-scheme of SAR images preprocessing stages in SNAP programme.

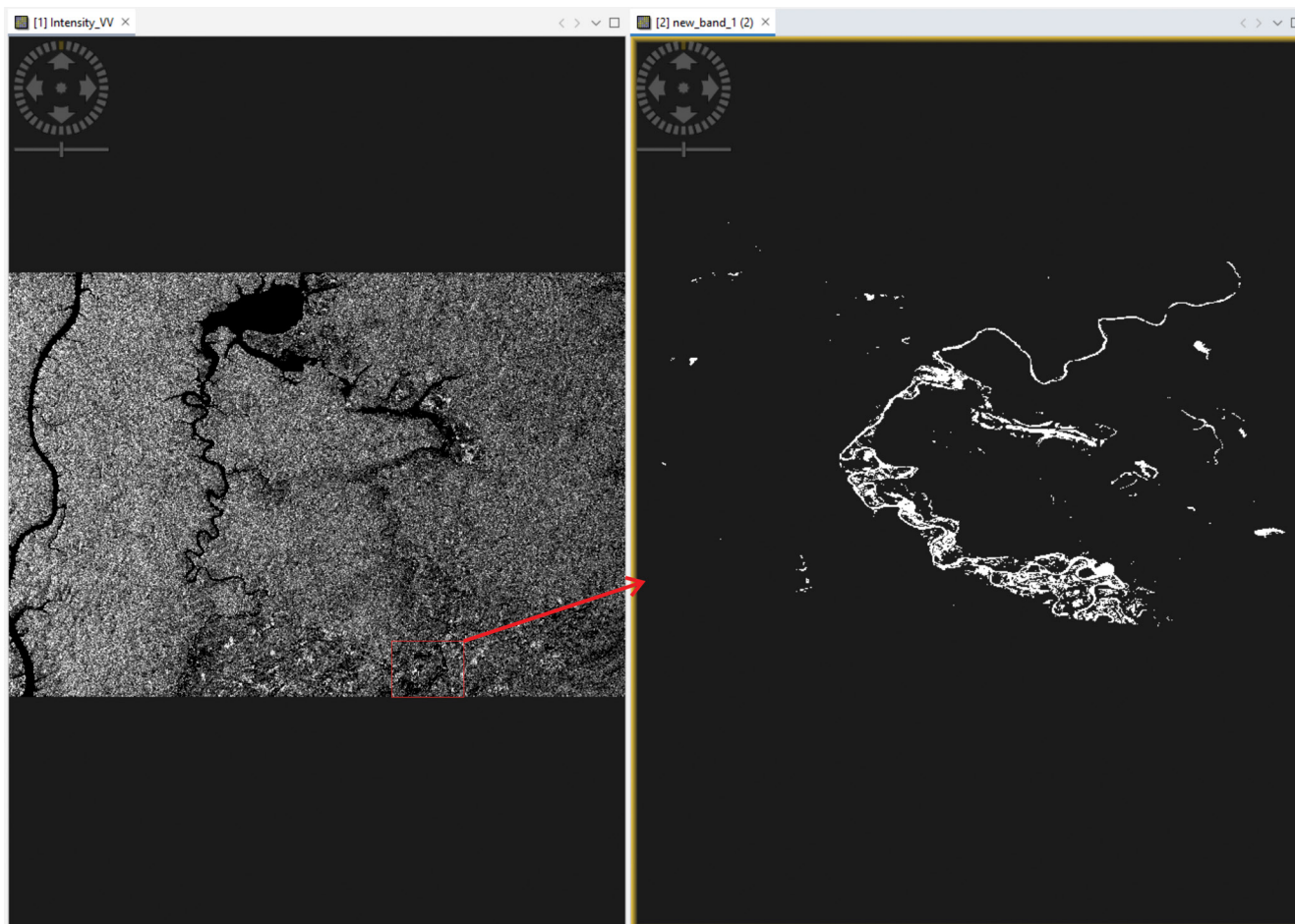


Рис. 3. Результаты предобработки снимков SAR в программе SNAP.

Fig. 3. Results of SAR images preprocessing in SNAP programme.

3. *Выделение площади водного зеркала на оптических снимках космической программы Sentinel-2.* Здесь применяется расчет нормализованного дифференциального водного индекса (NDWI), который определяется по формуле:

$$NDWI = \frac{B3 - B8}{B3 + B8},$$

где B3 – отражательная способность в зеленом спектральном диапазоне, B8 – в ближнем инфракрасном диапазоне. Этот индекс позволяет эффективно выделять водные объекты и зоны затопления на основе различий в отражательной способности.

Расчет NDWI производился в программе Global Mapper версии 24.1 (рис. 4).

Анализ временных рядов позволяет оценить динамику изменений и выявить ключевые тренды в развитии паводков.

Интеграция данных из различных источников, таких как Sentinel-1 и -2, является критически важным этапом, обеспечивающим синергетический

подход к анализу и интерпретации спутниковых изображений (рис. 5).

Этот процесс включает несколько ключевых шагов.

1. Приведение к единой географической проекции, такой как EPSG: 4326 – WGS 84, является основополагающим шагом в работе с геопространственными данными. Эта проекция широко признана и используется во всем мире, обеспечивая стандартное представление объектов на глобальной карте. Преобразование данных в единую проекцию позволяет объединять информацию из различных источников без потери точности. Это особенно важно при анализе данных разных спутников, таких как Sentinel-1 и -2, которые используют разные исходные системы координат. Приведение всех данных к единому стандарту упрощает их совместное применение и интеграцию, позволяя исследователям и аналитикам легко сопоставлять и анализировать информацию. Это также облегчает визуализацию данных, делая их доступными для широкого круга пользователей, от ученых до

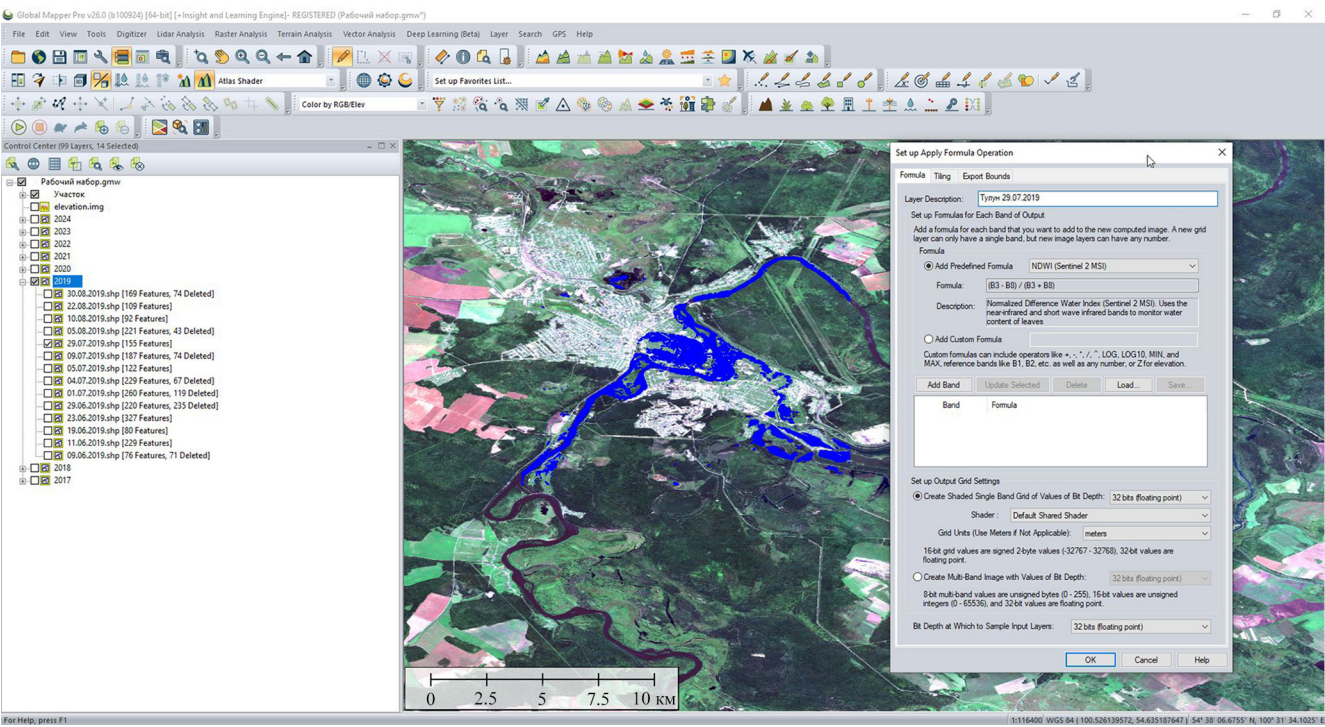


Рис. 4. Расчет индекса NDWI.

Fig. 4. NDWI index calculation.

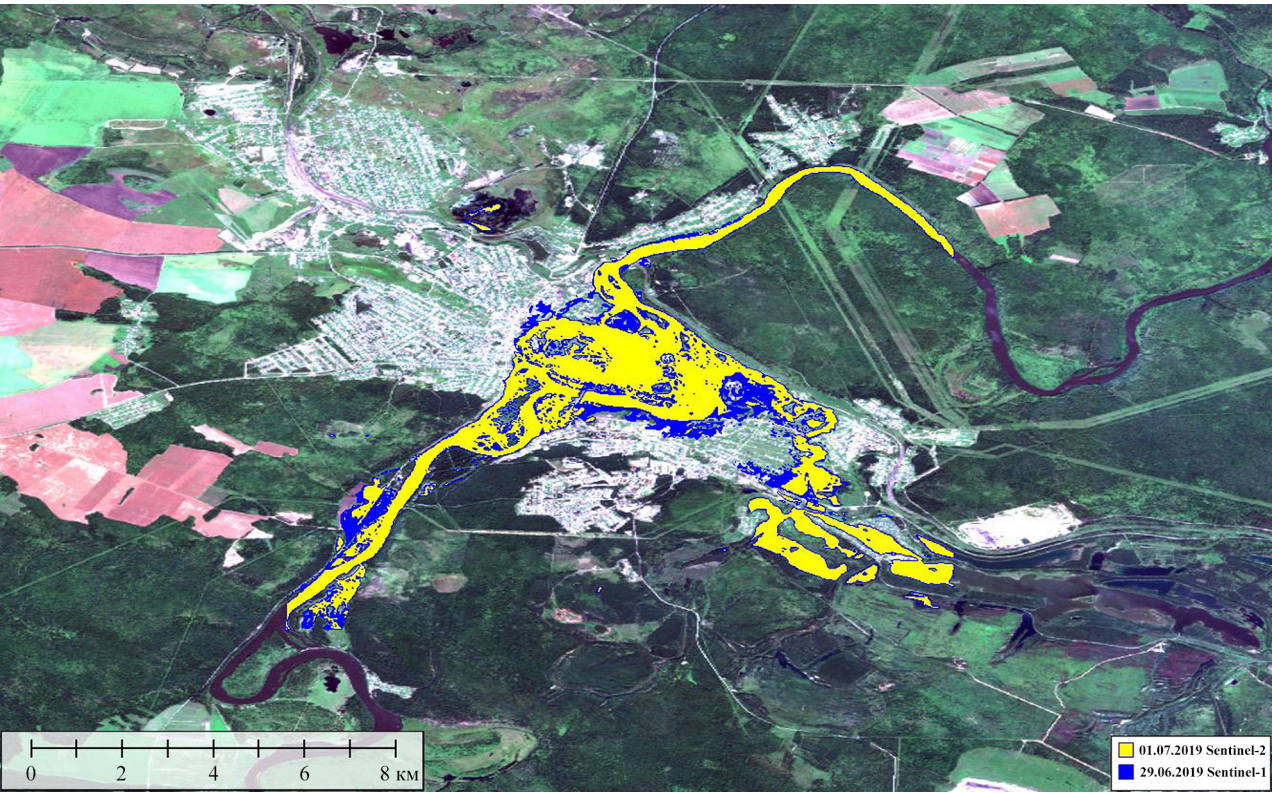


Рис. 5. Результат интеграции данных.

Fig. 5. Result of data integration.

государственных органов и планировщиков. Кроме того, использование общепринятой проекции обеспечивает совместимость с различными геоинформационными системами, что расширяет возможности для дальнейшего анализа и применения данных в различных областях.

2. Унификация пространственного разрешения – важный шаг при интеграции данных с разных спутников, таких как Sentinel-1 и -2, которые изначально могут иметь различное разрешение. Sentinel-1, обладая радиолокационными возможностями, обычно имеет разрешение до 5 м, в то время как оптический Sentinel-2 предлагает разрешение 10 м для своих ключевых спектральных каналов. Это различие может создавать проблемы при попытке совместного анализа данных, так как разная детализация может привести к несоответствиям в интерпретации изображений.

Для решения этой проблемы применяется метод ресемплинга, который позволяет преобразовать изображения к единому пространственному разрешению – в данном случае к 10 м. Этот процесс включает интерполяцию пикселей, чтобы выравнять данные по масштабу, что особенно важно для корректного наложения и сопоставления изображений. Ресемплинг обеспечивает согласованность данных, упрощая их сравнение и анализ.

Приведение к единому разрешению позволяет избежать искажений и артефактов, которые могут возникнуть при работе с изображениями разной детализации. Это критично при мониторинге таких динамичных процессов, как паводки, где требуется оперативное и точное наблюдение. Единое разрешение облегчает выявление изменений и тенденций, поскольку все данные представляются в одинаковом масштабе.

Кроме того, унификация разрешения делает данные более пригодными для автоматизированных систем анализа и методов машинного обучения, так как они требуют согласованных входных данных. Это расширяет применение данных в научных исследованиях, управлении рисками и принятии стратегических решений, позволяя более эффективно использовать спутниковую информацию для повышения устойчивости к природным катаклизмам.

1. Совмещение временных рядов данных из разных источников, таких как спутники Sentinel-1 и -2, является важным аспектом для обеспечения их согласованного анализа. Эти спутники имеют различные характеристики частоты съемки: Sentinel-1 обеспечивает обновление данных примерно каждые 6 дней, в то время как Sentinel-2 может предоставлять новые данные примерно каждые 5 дней. Эти различия в частоте обновления создают необходимость в синхронизации временных рядов, чтобы данные из обоих источников могли быть эффективно использованы вместе.

Синхронизация временных рядов включает в себя приведение данных к общим временным отметкам. Это может означать интерполяцию временных данных или использование методов агрегирования, чтобы заполнить пробелы и обеспечить согласованность временных интервалов. Такой подход позволяет авторам наблюдать изменения во времени более точно, используя данные обоих спутников для комплексного анализа.

Синхронизация временных рядов особенно важна при изучении динамичных процессов, таких как паводки, где временной аспект играет ключевую роль. Она позволяет определять временные тенденции, оценивать скорость изменений и лучше понимать динамику явлений.

Кроме того, совмещенные временные ряды повышают надежность и точность анализа, так как обеспечивают более полное покрытие событий, минимизируя вероятность пропуска ключевых моментов. Это особенно важно для управления рисками и принятия решений в условиях ограниченного времени, где требуется оперативная и точная информация. Совмещение временных рядов также упрощает интеграцию данных в автоматизированные системы мониторинга и прогнозирования, делая их более эффективными и надежными.

2. Объединение оптической и радиолокационной информации и методы наложения изображений. Интеграция данных из радиолокационных спутников Sentinel-1 и оптических спутников Sentinel-2 является ключевым аспектом для получения более полной и точной картины состояния водных объектов.

Для эффективного объединения этих данных применяется метод взвешенного суммирования. Он позволяет интегрировать радиолокационные и оптические данные с учетом их специфических сильных и слабых сторон.

Взвешенное суммирование включает несколько ключевых этапов.

– Назначение весов. Каждому типу данных присваивается определенный вес, отражающий его значимость для анализа. Например, в условиях облачности, где радиолокационные данные более надежны, они могут получить больший вес по сравнению с оптическими данными.

– Комбинация данных. Данные из различных источников комбинируются через вычисление взвешенной суммы значений пикселей. Итоговое значение пикселя рассчитывается как средневзвешенное, где вклад каждого источника данных пропорционален его весу.

– Оптимизация весов. В некоторых случаях веса могут быть оптимизированы с помощью алгоритмов машинного обучения, что позволяет адаптировать их в зависимости от изменяющихся условий наблюдения и повысить точность анализа.

– Учет контекста. Метод взвешенного суммирования позволяет учитывать контекстные факторы, такие как сезонные изменения и погодные условия, что делает итоговый анализ более надежным и адаптивным.

Преимущества интеграции данных.

– Повышенная точность оценки: Интеграция разнородных данных позволяет более точно определять площадь водного зеркала, что критично для нашего исследования.

– Гибкость и адаптивность. Метод взвешенного суммирования с возможностью динамической настройки весов делает анализ более гибким и адаптивным к изменяющимся условиям.

– Комплексный анализ. Объединение радиолокационных и оптических данных дает более полное представление о водных объектах, что улучшает качество мониторинга и анализа.

В результате интеграции спутниковых данных с использованием единой географической проекции, унификации пространственного разрешения, совмещения временных рядов и объединения оптической и радиолокационной информации достигается значительное улучшение качества и точности анализа. Эти методики позволяют исследователям эффективно объединять данные из различных источников, обеспечивая согласованность и полноту информации.

Приведение данных к единой географической проекции упрощает интеграцию и анализ, унификация разрешения устраняет искажения, а синхронизация временных рядов улучшает временную согласованность. Объединение оптических и радиолокационных данных посредством взвешенного суммирования дает более полное представление о состоянии объектов, что критически важно для мониторинга и принятия решений.

Таким образом, комплексный подход к обработке данных спутников Sentinel-1 и -2 расширяет возможности их применения в научных исследованиях и управлении рисками, повышая эффективность использования спутниковой информации для решения актуальных задач.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В рамках проведенного исследования по интеграции радиолокационных и оптических данных Sentinel для мониторинга паводков в районе г. Тулун выявлены значительные изменения в динамике площади водного зеркала в период с 2017 по 2024 г. Это исследование предоставило важные сведения о природе и масштабах паводковых явлений в регионе, что критически важно для управления рисками и планирования мер по минимизации ущерба.

1. Диапазон колебаний площади затопления. Анализ данных показал, что площадь водного зер-

кала в исследуемом периоде варьировалась в широком диапазоне. Минимальная площадь затопления зафиксирована 2 июня 2017 г. и составила 3.252 км². Между тем максимальная площадь затопления достигла 12.018 км² 29 июня 2019 г. Эти данные подчеркивают значительную изменчивость паводковых явлений в регионе, что обусловлено как климатическими факторами, так и изменениями в гидрологических характеристиках рек.

2. Среднеарифметическое значение является одним из базовых статистических показателей, которое отражает общую тенденцию изменения площади (S , км²) за период с 2017 по 2024 г.: в 2017 г. – ≈ 4.029 км², 2018 г. – ≈ 4.525 , 2019 г. – ≈ 6.368 , 2020 г. – ≈ 4.380 , 2021 г. – ≈ 4.634 , 2022 г. – ≈ 4.214 , 2023 г. – ≈ 4.421 , 2024 г. – ≈ 4.586 км².

Для наших данных среднее арифметическое значение S равно ≈ 4.645 км².

3. Медианное значение площади затоплений составило 4.508 км², что близко к среднему показателю. Это указывает на относительно равномерное распределение данных, однако наличие экстремальных значений свидетельствует о необходимости постоянного мониторинга и анализа данных для своевременного выявления и реагирования на экстремальные условия.

5. Среднеквадратическое значение – важный показатель, который позволяет оценить вариативность и распределение значений площади S (км²) за рассматриваемый период с 2017 по 2024 г. Среднеквадратическое значение для данного набора данных составляет ≈ 4.825 км².

6. Среднеквадратическое отклонение – это мера, которая показывает, насколько значения в наборе данных разбросаны относительно их среднего значения. Оно позволяет понять, как сильно данные варьируются, и является одним из показателей статистического разброса. В нашем случае среднеквадратическое отклонение ≈ 1.458 км², что свидетельствует об умеренном разбросе значений в наборе данных относительно среднего. Это число помогает оценить, насколько сильно колеблются наши значения вокруг среднего значения по всему набору данных.

В результате изучения паводковых процессов в районе г. Тулун за период с 2017 по 2024 г. обнаружена существенная изменчивость площади водного зеркала в 2019 г. На гистограмме, представленной на рис. 6, визуализируется динамика изменения площади водного зеркала за весь период исследования.

Особенно показательным в контексте паводковых явлений в регионе стал 2019 г. Гистограмма на рис. 7 демонстрирует изменения площади водного зеркала в течение этого года, когда зафиксированы наиболее интенсивные и масштабные паводковые события, значительно превышающие средние показатели других лет.

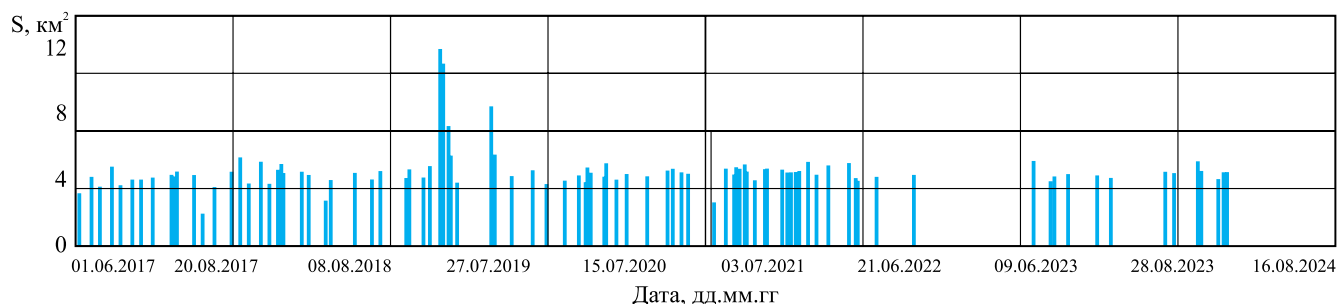


Рис. 6. Изменение площади водного зеркала за весь период наблюдения (2017–2024 гг.).

Fig. 6. Changes in Water Surface Area Over the Entire Observation Period (2017–2024).

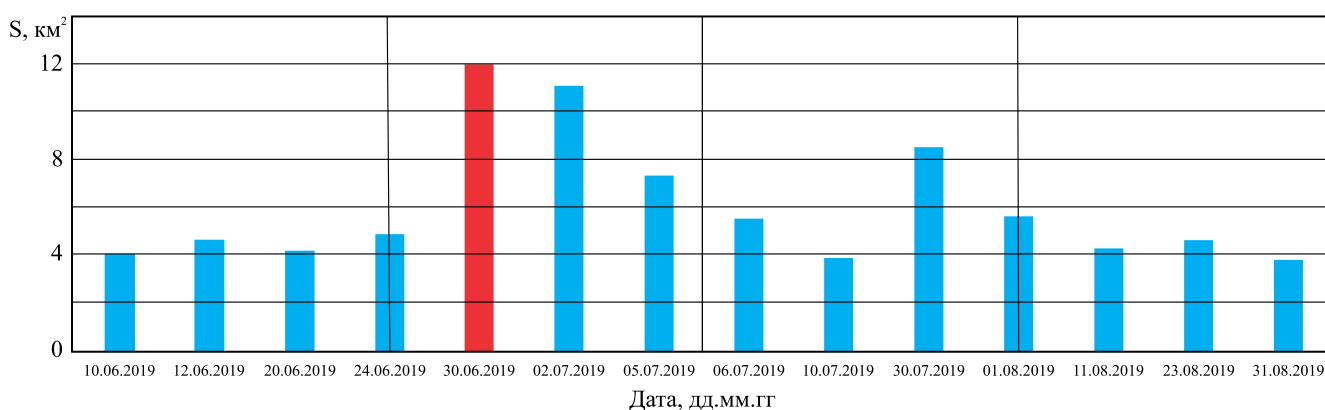


Рис. 7. Изменение площади водного зеркала в 2019 г.

Fig. 7. Changes in Water Surface Area in 2019.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования подчеркивают важность комплексного подхода к мониторингу паводковых событий, который включает использование как радиолокационных, так и оптических данных. Радиолокационные данные спутников Sentinel-1, способных проникать через облака и обеспечивать надежное наблюдение в любых погодных условиях, позволяют точно оценивать границы водоемов и выявлять изменения в их площади. Оптические данные Sentinel-2 предоставляют детализированную спектральную информацию.

Интеграция данных из различных источников позволяет значительно улучшить точность оценки масштабов и динамики паводковых явлений. Это особенно важно для разработки эффективных стратегий управления рисками, связанными с паводками, и принятия обоснованных решений для минимизации их последствий. Полученные данные могут способствовать улучшению стратегии управления рисками, включая разработку планов по защите населения и инфраструктуры,

а также меры по минимизации ущерба от будущих паводков.

Дальнейшее развитие методов интеграции данных дистанционного зондирования и их применение в различных климатических и географических условиях позволят улучшить понимание и управление природными рисками. Это будет способствовать повышению устойчивости сообществ к экстремальным погодным условиям и обеспечению безопасности населения в условиях изменяющегося климата.

Таким образом, интеграция современных технологий дистанционного зондирования в процессы мониторинга и анализа паводков является важным шагом к эффективному управлению рисками и повышению безопасности в условиях изменяющегося климата. Это исследование подчеркивает необходимость постоянного мониторинга и применения комплексного подхода для обеспечения более полной и надежной картины происходящих процессов, что, в свою очередь, улучшает качество принимаемых решений и мер по реагированию на экстремальные погодные условия.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования по интеграции радиолокационных и оптических данных Sentinel для мониторинга паводков в районе г. Тулун сделаны следующие выводы.

1. Необходимость постоянного мониторинга для своевременного реагирования на экстремальные условия (максимальные значения площади водного зеркала).

2. Необходимость комплексного подхода. Использование как радиолокационных, так и оптических данных Sentinel позволило повысить точность в оценке масштабов наводнений. Это подчеркивает важность комплексного подхода к мониторингу природных явлений, что обеспечивает более полную и надежную картину происходящих процессов.

3. Практическое применение результатов. Полученные данные о динамике и масштабах паводков могут быть использованы для улучшения стратегий управления рисками, связанными с наводнениями. Это включает в себя разработку планов по защите населения и инфраструктуры, а также меры по минимизации ущерба от будущих паводков.

4. Перспективность дальнейших исследований. Развитие методов интеграции данных дистанционного зондирования и их применение в различных климатических и географических условиях позволят улучшить понимание и управление природными рисками, способствуя повышению устойчивости сообществ к экстремальным погодным условиям.

Таким образом, интеграция современных технологий дистанционного зондирования в процессы мониторинга и анализа паводков является важным шагом к эффективному управлению рисками и повышению безопасности в условиях изменяющегося климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Воронова А.Е., Рублев И.В., Соловьева И.А., Панов Д.Ю., Гордеева О.С., Батанов Д.В., Завьялова Д.Ю., Косторная А.А. (2020) Спутниковый мониторинг экстремального наводнения в Иркутской области 2019 года. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, **17**(1), 263-266.
- Георгиевский В.Ю., Грек Е.А., Лобанова А.Г., Молчанова Т.Г. (2020) Условия формирования катастрофического паводка 2019 года на реке Ие и оценка его характеристик. *География и природн. ресурсы*, (4), 86-94.
- Дугарова Г.Б. (2021) Анализ и оценка последствий наводнения в г. Тулуне (Иркутская область). *ЭКО*, (1), 130-150.
- Кичигина Н.В. (2020) Опасность паводочных наводнений в бассейнах левых притоков Ангары. *География и природн. ресурсы*, **41**(4), 45-55.
- Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Федорова А.Д., Шихов А.Н., Виноградова Т.А. (2020) Моделирование разрушительных паводков летом 2019 г. на реке Ие (Иркутская область). *География и природн. ресурсы*, (4), 66-76.
- Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н., Полянин В.О. (2021) Катастрофические паводки в бассейне ангары в 2019 году: моделирование условий формирования и водного режима рек. *Изв. РАН. Сер. геогр.*, **85**(2), 302-316.
- Плотникова М.А., Хлебникова Е.П. (2020) Исследование методов выявления изменений территорий по разновременным космическим изображениям. *Интерэкспо Гео-Сибирь*, **6**(2), 48-58.
- Прошин А.А., Лупян Е.А., Балашов И.В., Кашницкий А.В., Бурцев М.А. (2016) Создание унифицированной системы ведения архивов спутниковых данных, предназначенной для построения современных систем дистанционного мониторинга. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, **13**(3), 9-27.
- Решетило Н.С., Хлебникова Е.П. (2021) Возможность использования данных дистанционного зондирования при мониторинге водных объектов. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*, **6**, 248-255.
- Рунова Е.М., Степанова О.А. (2024) Анализ динамики вегетационного индекса зеленых насаждений городов иркутской области в период вегетационной активности. *J. Agricult. Environ.*, **1**(41). <https://doi.org/10.23649/JAE.2024.41.11>
- Шаликовский А.В., Лепихин А.П., Тиунов А.А., Курганович К.А., Морозов М.Г. (2019) Наводнения в Иркутской области 2019 года. *Водн. хоз-во России*, (6), 48-65.
- Drusch M., Del Bello U., Carlier S., Colin O., Fernandez V., Gascon F., Hoersch B., Isola C., Laberinti P., Martimort P., Meygret A., Spoto F., Sy O., Marchese F., Bargellini P. (2012) Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sens. Environ.*, **120**, 25-36.
- Fernandez H.M., Granja-Martins F., Dziuba O., Pereira D.A.B., Isidoro J.M.G.P. (2023) Comparison of Ratioing and RCNA Methods in the Detection of Flooded Areas Using Sentinel 2 Imagery (Case Study: Tulun, Russia). *Sustainability*, **15**, 10233-10248.
- Nagler T., Rott H., Hetzenecker M., Wuite J., Potin P. (2015) The Sentinel-1 Mission: New Opportunities for Ice Sheet Observations. *Remote Sens.*, **7**(7), 9371-9389.
- Opekunova M.Y., Kichigina N.V., Rybchenko A.A., Silaev A.V. (2023) Channel Deformations and Hazardous Processes of the Left-Bank Tributaries of The Angara River (Eastern Siberia). *Water*, **15**(2), 291-312.
- Phiri D., Simwanda M., Salekin S., Nyirenda V.R., Murayama Y., Ranagalage M. (2020) Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping: A Review. *Remote Sens.*, **12**(14), 2291-2326.
- Potin P., Rosich B., Grimont P., Miranda N., Shurmer I., O'Connell A., Torres R., Krassenburg M. (2016) Sentinel-1 Mission Status. *Proc. of EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar*. Hamburg, Germany, 1-6.
- Torres R., Snoeij P., Geudtner D., Bibby D., Davidson M., Attema E., Potin P., Rommen B., Floury N., Brown M., Traver I.N., Deghaye P., Duesmann B., Rosich B., Mi-

randa N., Bruno C., L'Abbate M., Croci R., Pietropaolo A., Huchler M., Rostan F. (2012) GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sens. Environ.*, **120**, 9-24.

REFERENCES

- Drusch M., Del Bello U., Carlier S., Colin O., Fernandez V., Gascon F., Hoersch B., Isola C., Laberinti P., Martimort P., Meygret A., Spoto F., Sy O., Marchese F., Bargellini P. (2012) Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sens. Environ.*, **120**, 25-36.
- Dugarova G.B. (2021) Analysis and evaluation of flood impact in Tulun (Irkutsk region). *ECO*, (1), 130-150. (In Russ.)
- Fernandez H.M., Granja-Martins F., Dziuba O., Pereira D.A.B., Isidoro J.M.G.P. (2023) Comparison of Ratioing and RCNA Methods in the Detection of Flooded Areas Using Sentinel 2 Imagery (Case Study: Tulun, Russia). *Sustainability*, **15**, 10233-10248.
- Georgievskii V.Yu., Greck E.A., Lobanova A.G., Molchanova T.G. (2020) Formation conditions for the catastrophic flood of 2019 on the Iya river and assessment of its characteristics. *Geografiya i Prirodn. Resursy*, (4), 86-94. (In Russ.)
- Kichigina N.V. (2020) Flood hazard within the basins of the left tributaries of the Angara. *Geografiya i Prirodn. Resursy*, **41**(4), 45-55. (In Russ.)
- Makar'eva O.M., Nesterova N.V., Fedorova A.D., Shikhov A.N., Vinogradova T.A. (2020) Modeling of the summer 2019 disastrous floods on the Iya river (Irkutsk oblast). *Geografiya i Prirodn. Resursy*, (4), 66-76. (In Russ.)
- Motovilov Yu.G., Gel'fan A.N., Polyanin V.O. (2021) Catastrophic floods in the angara river basin in 2019: modeling the conditionsof formation and water regime of rivers. *Izv. RAN. Ser. geogr.*, **85**(2), 302-316. (In Russ.)
- Nagler T., Rott H., Hetzenecker M., Wuite J., Potin P. (2015) The Sentinel-1 Mission: New Opportunities for Ice Sheet Observations. *Remote Sens.*, **7**(7), 9371-9389.
- Opekunova M.Y., Kichigina N.V., Rybchenko A.A., Silaev A.V. (2023) Channel Deformations and Hazardous Processes of the Left-Bank Tributaries of The Angara River (Eastern Siberia). *Water*, **15**(2), 291-312.
- Phiri D., Simwanda M., Salekin S., Nyirenda V.R., Murayama Y., Ranagalage M. (2020) Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping: A Review. *Remote Sens.*, **12**(14), 2291-2326.
- Plotnikova M.A., Khlebnikova E.P. (2020) Study of methods for identifying territorial changes by multi-time satellite images. *Interexpo GEO-Siberia*, **6**(2), 48-58. (In Russ.)
- Potin P., Rosich B., Grimont P., Miranda N., Shurmer I., O'Connell A., Torres R., Krassenburg M. (2016) Sentinel-1 Mission Status. *Proc. of EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar*. Ham-burg, Germany, 1-6.
- Proshin A.A., Loupian E.A., Balashov I.V., Kashnitskiy A.V., Burtsev M.A. (2016) Unified satellite data archive management platform for remote monitoring systems development. *Sovremennye Problemy Distantstionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, **13**(3), 9-27. (In Russ.)
- Reshetilo N.S., Khlebnikova E.P. (2021) Possibility of using remote sensing data for monitoring water objects. *Interexpo GEO-Siberia*, **6**, 248-255. (In Russ.)
- Runova Y.M., Stepanova O.A. (2024) An analysis of the dynamics of the vegetation index of green spaces in irkutsk region cities during the period of vegetation activity. *J. Agricult. Environ.*, **1**(41). (In Russ.) <https://doi.org/10.23649/JAE.2024.41.11>
- Shalikovskii A.V., Lepikhin A.P., Tiunov A.A., Kurganovich K.A., Morozov M.G. (2019) The 2019 Floods in Irkutsk Region. *Vodnoe Khozyaistvo Rossii*, (6), 48-65. (In Russ.)
- Torres R., Snoeij P., Geudtner D., Bibby D., Davidson M., Attema E., Potin P., Rommen B., Floury N., Brown M., Traver I.N., Deghaye P., Duesmann B., Rosich B., Miranda N., Bruno C., L'Abbate M., Croci R., Pietropaolo A., Huchler M., Rostan F. (2012) GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sens. Environ.*, **120**, 9-24.
- Voronova A.E., Rublev I.V., Solov'eva I.A., Panov D.Yu., Gordeeva O.S., Batanov D.V., Zav'yalova D.Yu., Kostornaya A.A. (2020) Satellite observation of extreme flooding in the Irkutsk Region in 2019. *Sovremennye Problemy Distantstionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, **17**(1), 263-266. (In Russ.)