



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.1.3>

УДК: 528.8; 528.83; 528.85; 528.88

ГИБРИДНАЯ ПЛАТФОРМА СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА И ИИ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ВЫЯВЛЕНИЯ ПРЕДПОСЫЛОК НАВОДНЕНИЙ

Е.В. Савченко, С.М. Маклаков

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
141190, г. Фрязино, пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 19 декабря 2025 г.

Аннотация. Представлена методика построения гибридной платформы оперативного спутникового мониторинга для раннего выявления зон затопления. Подход объединяет оптические (Sentinel-2), радиолокационные (Sentinel-1) и геостационарные (SEVIRI) наблюдения, продукты оценки осадков (МРЕ) и наземную верификацию. Выполняется унифицированная предобработка данных – геопривязка, приведение к единому пространственному разрешению, фильтрация по облачности и оконная нарезка больших сцен; рассчитывается набор индексных показателей (NDWI, MNDWI, AWEI, SWI и др.), текстурные характеристики и радиолокационные признаки. Интеграция результатов осуществляется нейросетевым модулем, формирующим вероятностные карты затопления и показатели доверия для каждого выделенного полигона. Реализация выполнена в среде Python с использованием стандартных библиотек для работы с растровыми данными и обучения нейросетей; при этом подчеркнута модульность – отдельные этапы (скачивание и сохранение сцен, предобработка, формирование обучающей выборки, обучение модели и постобработка) могут выполняться независимо и переиспользоваться для других

событий и регионов. Апробация на материалах наводнения в Крыму (июнь 2021) показала повышение точности и устойчивости обнаружения по сравнению со стандартными индексными методами и подтверждает практическую применимость предложенного решения для оперативного мониторинга и оповещения при условии дальнейшего расширения размеченной выборки и учета локальных особенностей ландшафта.

Ключевые слова: наводнения, изучение климата, визуализация данных, дистанционное зондирование, спутниковое зондирование, искусственный интеллект.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-00395-25-00.

Автор для переписки: Маклаков Сергей Михайлович, ser2110@mail.ru

Введение

Рост частоты и интенсивности экстремальных осадков обусловил увеличение числа локальных наводнений и повысил требования к системам раннего обнаружения и мониторинга гидрологических рисков. Наземные метеорологические и гидрологические сети, как правило, обладают ограниченным пространственным охватом и не всегда обеспечивают требуемую оперативность и плотность наблюдений, особенно в сложнопрофильных и труднодоступных районах. В этих условиях дистанционное зондирование Земли выступает ключевым источником данных, способным обеспечить широкий охват территории и многоканальную информацию о состоянии атмосферы и поверхности [1]. Однако практическое применение спутниковых данных в задачах оперативного выявления зон затопления сопряжено с рядом методических и технических трудностей, которые требуют системного подхода [2].

К числу существенных трудностей относятся несоответствие пространственных и временных разрешений различных спутниковых миссий, чувствительность оптических каналов к облачности и теням, различия в

спектральной характеристике датчиков и необходимость согласования радиометрических шкал. Кроме того, автоматическая интерпретация спутниковых карт подвержена ложным срабатываниям на фоне влажной растительности, сезонных стоячих вод и зеркальных отражений в городской среде. Для преодоления этих ограничений требуется комплекс мер: стандартизация процедур предобработки, использование совокупности индексных показателей, применение радарных данных в условиях облачности и внедрение методов вероятностной интерпретации результатов.

Цель настоящей работы – разработка и предложение методологии модульной гибридной платформы для оперативного мониторинга и вероятностной оценки риска затоплений на основе интеграции геостационарных (SEVIRI), оптических (Sentinel-2) и радиолокационных (Sentinel-1) продуктов, а также данных осадков и наземной валидации. Задачи работы включают в себя формализацию требований к исходным данным, процедуры предобработки и стандартизации, выбор набора индексных показателей и предложение нейросетевого модуля для интегративной интерпретации. Платформа должна обеспечивать воспроизводимую предобработку данных, расчет информативного набора индексных показателей для выделения водного покрова и повышения влажности поверхности, синтез пространственно-временных признаков и формирование вероятностных карт риска затопления, пригодных для оперативного использования службами реагирования. Она должна состоять из воспроизводимых и адаптируемых процедур, обеспечивающих повышение информативности, а также оперативности мониторинга затоплений при широком применении спутниковых ресурсов при минимальных потребностях в ручной корректировке результатов.

1. Источники данных и их характеристики

В качестве базовых источников данных, используемых в рассматриваемой платформе, выделяются геостационарные и орбитальные спутниковые наблюдения, радиолокационные измерения, продукты оценки осадков и наземные гидрометеорологические данные. К ним относятся: данные инструмента SEVIRI (спутники Meteosat Second Generation, MSG) [3,4], мультиспектральные снимки спутника Sentinel-2, радарные сцены спутника Sentinel-1, а также агрегированные продукты осадков Multi-Sensor Precipitation Estimate (MPE) [5]. Для архивного и уточняющего анализа рассматривается привлечение данных спутников Landsat и других оптических миссий при наличии соответствующих прав доступа.

Геостационарный канал SEVIRI обеспечивает высокую частоту повторения наблюдений (порядка 10–15 минут), что делает этот источник ключевым для оперативного отслеживания динамики облачных систем и экспресс-оценки развития конвективной активности [3]. Данные SEVIRI представлены широкополосными каналами в видимой и инфракрасной областях; их основное достоинство – это временная разрешающая способность [6], основное ограничение – относительно низкое пространственное разрешение [7] и широкополосное спектральное усреднение, требующее адаптированных подходов при расчете индексных показателей.

Орбитальные оптические снимки Sentinel-2 дают высокое пространственное и спектральное разрешение, включающее ключевые каналы зеленого спектра, ближней инфракрасной и коротковолновой инфракрасной областей, что позволяет точно различать открытую воду, заболоченные участки и растительность. Для задач картирования границ водных поверхностей и уточнения зон затопления Sentinel-2 рассматривается как основной источник подтверждающей информации при слабой облачности. При необходимости детальной ретроспективной оценки предлагается обращение к данным Landsat [8].

Радиолокационные наблюдения Sentinel-1 пригодны для картирования поверхности независимо от облачности и освещенности. Их применение особенно важно в период интенсивной облачности, когда оптические каналы не дают информативных результатов [9]. При анализе радарных данных учитывается влияние поляризации, угла визирования и покрытия растительностью, а также требуются специальные процедуры предобработки для получения надежных карт водности [10].

Агрегированные продукты осадков, в том числе МРЕ, используются как вспомогательный индикатор интенсивности выпадения осадков и как фактор подтверждения работоспособности индексных детекторов. Наземные данные гидрометеостанций и отчеты диспетчерских служб служат источником верификации и формируют метки для обучения машинных моделей [11]. В качестве вспомогательных слоев могут быть включены цифровые модели рельефа, карты землепользования и векторные слои инфраструктуры, необходимые для анализа рисков и оценки экспозиции населенных пунктов.

Требования к источникам данных включают наличие полного набора метаданных, содержащего временные отметки съемки, систему координат, параметры прибора и сведения о выполненных этапах предобработки. Обязательной составной частью качественных данных является информация о степени облачности, уровне шумов и наличии иных помех или искажений, влияющих на пригодность продукта для дальнейшего анализа. Источники должны гарантировать стабильную доступность данных и предсказуемое время их поступления в систему (время от момента съемки до момента готовности продукта).

При проектировании системы обработки может предусматриваться возможность подключения дополнительных потоков наблюдений, включая радиолокационные спутниковые съемки и региональные наземные датчики, при этом формат хранения, структура метаданных и ведение журнала происхождения данных остаются едиными. Такая организация позволяет

расширять набор входных данных без нарушения согласованности хранилища и процедур отслеживания версий продуктов.

2. Общая архитектура платформы

Архитектуру гибридной платформы предлагается выстраивать по принципу функциональной модульности с целью обеспечения непрерывного цикла обработки данных дистанционного зондирования (рис. 1). Каждый модуль предназначен для выполнения четко определенных задач и взаимодействует с другими через стандартизованные каналы обмена, что обеспечивает заменяемость компонентов, простоту масштабирования и поэтапное внедрение новых источников данных и алгоритмов.



Рис. 1. Архитектура гибридной платформы для оперативного мониторинга.

На уровне приема данных предусматривается размещение модулей подключения к основным поставщикам: геостационарным каналам SEVIRI, орбитальным миссиям Sentinel-2 и Sentinel-1, источникам продуктов осадков и локальным архивам наземных измерений. Модули подключения обеспечивают автоматическую загрузку, проверку целостности файлов и сохранение полной метаинформации о времени съемки и параметрах регистрации. Для оперативных задач предусматривается возможность организации приоритетных потоков обработки для критических регионов с минимальной задержкой между поступлением данных и формированием итоговых карт.

Стадию предобработки предлагается выполнять как набор воспроизводимых процедур: радиометрическая калибровка, атмосферная коррекция, выделение и маскирование облачности и теней, геометрическая привязка и приведение всех данных к единому пространственному разрешению и сетке.

Аналитический модуль предусматривает формирование комплектов индексных карт и дополнительных признаков (температурные поля, продукты осадков, текстурные характеристики). Для оперативной работы предлагается механизм генерации предварительных карт на основе доступных геостационарных и оперативно обработанных данных, с последующей уточняющей переработкой и корректировкой по мере поступления детализированных орбитальных и радиолокационных сцен.

Нейросетевая служба реализуется как самостоятельный модуль, принимающий входные слои данных, приведенные к общему формату, и выдающий пространственно-привязанные карты вероятности затопления вместе с числовыми показателями доверия, отражающими степень уверенности модели в каждом прогнозе (например, интервал неопределенности от 0 до 1 для полигона). В составе этой службы предлагаются механизмы регулярного дообучения на локальных размеченных примерах, так же возможно применение комбинированных подходов с использованием нескольких моделей одновременно для повышения надежности результатов.

Интеграционный модуль должен обеспечивать объединение аналитических продуктов с данными, выданными нейросетями, а также локальными геоинформационными слоями: цифровой моделью рельефа, картами землепользования, гидографией и объектами инфраструктуры. На его основе могут быть сформированы инструменты определения приоритетов оповещений – расчетные рейтинги для каждого обнаруженного полигона по критериям потенциального ущерба и значимости инфраструктурных объектов, что позволяет выделять наиболее критичные участки для немедленного реагирования.

Модуль визуализации и экспортных сервисов предлагается реализовать с возможностью интерактивного просмотра карт, анимации временных рядов, формирования табличных отчетов и экспорта в стандартизованные форматы. В интерфейсах следует предусмотреть инструменты для экспертной аннотации и запуска процедур переобучения на основании подтвержденных случаев, а также ведение истории изменений, правок и причин отклонений.

Наконец, архитектура должна оставаться расширяемой: подключение дополнительных спутниковых источников, региональных датчиков и прогностических моделей следует осуществлять через единые механизмы обмена данными и стандартизованные интерфейсы, без необходимости перестройки основной логики. Такой проектный подход обеспечивает технологическую устойчивость и долговременную адаптацию платформы к меняющимся требованиям мониторинга и оперативного реагирования.

3. Предобработка данных и приведение к единому формату

Предобработка направлена на получение сопоставимых и пригодных для анализа данных из разнородных источников – SEVIRI, Sentinel-2, Sentinel-1 и сопутствующих наборов. В состав процедур входят радиометрическая и атмосферная калибровка, маскирование облачности и теней, геометрическая привязка и приведение изображений к единой пространственной сетке.

Радиометрическая калибровка предусматривает перевод исходных значений измерений в физически осмысленные показатели: для оптических каналов – в коэффициенты отражения, а для тепловых каналов SEVIRI – в значения яркостной температуры. При обработке данных SEVIRI учитываются различия в спектральной чувствительности каналов, что требует применения поправочных коэффициентов или адаптации формул расчета индексных показателей [12]. Для данных Sentinel-2 целесообразно использовать специализированные методы атмосферной коррекции, направленные на снижение влияния аэрозолей и газовых поглощений на оценку отражательной способности поверхности [13].

Маскирование облачности и теней выполняется с использованием доступных продуктов облачных масок, спектральных и текстурных признаков, а также с учетом временной динамики кадров SEVIRI для снижения числа ложных погрешностей. Облачные участки, помеченные как непрозрачные, исключаются из оптического индексного анализа; при этом для таких областей планируется привлечение радарных данных Sentinel-1 или агрегированных продуктов осадков (MPE) для обеспечения информационной полноты.

Геометрическая обработка включает приведение изображений к картографически точному положению на местности и согласование их в единой системе координат, а также уточнение и совмещение кадров разных миссий с использованием цифровой модели рельефа и опорных векторных слоев. Исправление локальных смещений выполняется с целью достижения требуемой пространственной точности, необходимой для сопоставления индексных карт с векторными слоями объектов инфраструктуры. Для сохранения аналитической гибкости исходные кадры архивируются до выполнения процедур приведения к общему пространственному разрешению.

Приведение данных к общему пространственному разрешению и объединение наблюдений по времени должно осуществляться с учетом компромисса между сохранением пространственной детализации и устойчивостью признаков. В оперативном режиме может использоваться упрощенная схема временного объединения на основе ближайших по времени доступных кадров SEVIRI для обеспечения быстрого отклика, с последующей уточняющей переработкой и корректировкой результатов по мере поступления более детализированных оптических и радарных сцен (Sentinel-2, Sentinel-1). Для архивных аналитических задач в таком случае возможно использование более точных методов пространственной интерполяции и временной фильтрации.

Вспомогательные маски и тематические слои, формируемые в процессе предобработки – маски облачности, маски сезонных изменений поверхности, карты урбанизированных зон и гидрографические границы – используются как

фильтры при расчете индексных показателей и при определении уровня доверия к выделенным объектам. Экспорт приведенных данных осуществляется в стандартизованных форматах пространственных продуктов с полным комплектом метаданных, что обеспечивает их интеграцию в геоинформационные системы эксплуатации и верификации.

4. Набор индексных показателей для выделения водного покрова и оценки влажности поверхности

Для решения задачи обнаружения поверхностной воды и зон повышенной влажности предлагается использовать набор спектральных индексов, каждый из которых дополняет остальные с точки зрения чувствительности к определенным сценам и типам помех. В составе набора рассматриваются нормализованные разностные индексы (NDWI, MNDWI), мультиспектральный автоматизированный индекс (AWEI), а также индексы, предназначенные для фильтрации контекста растительности и грунта (NDVI, SAVI). Для крупных оперативных систем целесообразно включать также индекс SWI и другие авторские индексы, адаптированные под конкретный набор имеющихся данных.

Ниже приведены краткие определения и рабочие формулы, используемые в платформе. При применении к данным определенной миссии следует заменять ссылки на «зеленую», «ближнюю инфракрасную» и «коротковолновую инфракрасную» полосы конкретными номерами каналов (например, для Sentinel-2: зеленый (Green) – канал 3, ближняя инфракрасная (NIR) – канал 8, SWIR – каналы 11 или 12). В случае геостационарных приборов (SEVIRI) отсутствие узкополосных SWIR-каналов требует использования аппроксимаций и скорректированных коэффициентов.

Нормализованный разностный индекс открытой воды:

$$\text{NDWI} = (\text{Green} - \text{NIR}) / (\text{Green} + \text{NIR}), \quad (1)$$

где Green – отражательная способность в зеленом канале, NIR – отражательная способность в ближней инфракрасной полосе. Значения NDWI, как правило,

находятся в интервале $[-1,1]$; положительные значения часто указывают на наличие открытой воды [14].

Модифицированный нормализованный разностный индекс воды:

$$MNDWI = (Green - SWIR) / (Green + SWIR), \quad (2)$$

где SWIR – отражательная способность в коротковолновой инфракрасной полосе. MNDWI улучшает подавление влияния урбанизированных и засоренных покрытий по сравнению с классическим NDWI и часто дает более корректные границы водного покрова в городских и прибрежных зонах [15].

Automated Water Extraction Index – существуют несколько вариантов: для сцен, содержащих тени и темные поверхности, и для сцен без выраженных теней. На практике используются проверенные эмпирические выражения, например:

$$AWEI = 4 * Green - (2 * NIR + SWIR1 + SWIR2), \quad (3)$$

(варианты коэффициентов могут отличаться в зависимости от исходной публикации и используемого набора каналов). Практическая интерпретация: большие положительные значения AWEI свидетельствуют о высокой вероятности наличия открытой воды [16].

Superfine Water Index (SWI) и другие специализированные индексы применяются в задачах глобального картирования водного покрова и в сценариях, где требуется высокая контрастность между водой и сложным фоном (например, загрязненная вода, мелководье):

$$SWI = (NIR - SWIR1) / (NIR + SWIR1), \quad (4)$$

SWI и родственные индексы разрабатываются для конкретных платформ (MODIS, Sentinel) и требуют подстановки соответствующих каналов [17].

Индексы растительности (NDVI, SAVI) используются не как первичная детекция воды, а как контекстная фильтрация: высокая положительная величина NDVI указывает на вегетативное покрытие, что уменьшает вероятность наличия открытой воды:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED), \quad (5)$$

SAVI (индекс, учитывающий влияние почвенной яркости) полезен в засушливых регионах при необходимости отделения влажной растительности от мелководных участков:

$$SAVI = ((NIR - Red) / (NIR + Red + L)) * (1 + L), \quad (6)$$

где L – Значение покрытия зеленой растительности, например, 0,5.

Практические замечания по применению индексов в платформе:

- Рекомендуется рассчитывать несколько индексов параллельно и формировать вектор подтверждения (consensus vector) для каждого пикселя или полигона. Совместное использование MNDWI и AWEI дает более устойчивую классификацию в условиях урбанизированной или затененной местности [18]. Пороговые значения для бинарной классификации «вода/не вода» не являются универсальными; для большинства сцен для MNDWI и NDWI часто применяется порог около нуля, но в ряде регионов и для определенных сезонов требуются адаптивные пороги, рассчитанные по архивным распределениям индексов [19]. Для данных SEVIRI следует применять модифицированные формулы или эмпирические коррекции коэффициентов, поскольку узкополосные SWIR-каналы отсутствуют или существенно отличаются по ширине. В таких условиях целесообразно сформировать калибровочную таблицу соответствий между индексами, вычисленными на Sentinel-2, и их аппроксимациями на SEVIRI для конкретного региона; это позволяет использовать преимущества высокой частоты SEVIRI при сохранении сопоставимости с детализацией орбитальных снимков.
- Рекомендуемый алгоритмический подход в платформе: первичный расчет набора индексов для каждого доступного кадра; формирование полей вероятностей на основе консенсуса индексов и дополнительных признаков (температура облачных вершин, оценка осадков по МРЕ); последующая классификация с учетом контекстных масок (урбанизация, рельеф, аномальные участки). Такой многоступенчатый подход снижает число ложных срабатываний и повышает воспроизводимость результатов.

5. Нейросетевой модуль: архитектура и обучение

Нейросетевой модуль предназначен для интеграции многоканальных спутниковых и вспомогательных признаков, учета пространственно-временной динамики и формирования вероятностных оценок наличия зон повышенной влажности и затоплений [20,21,22]. Архитектурное решение ориентируется на сочетание методов, обеспечивающих извлечение локальных пространственных признаков, моделирование временных зависимостей и оценку неопределенности предсказаний.

За базовый уровень пространственной обработки принимаются сверточные нейронные сети, адаптированные к многоуровневым входам (индексные карты, температурные поля, карты влажности, текстурные признаки). Для учета временной динамики используется гибридная схема, включающая блоки, способные моделировать последовательности наблюдений; в практической реализации применимы рекуррентные архитектуры с механизмами долговременной памяти и архитектуры, основанные на механизмах внимания, обеспечивающие учет длительных зависимостей [23].

Входные данные для нейросетевого модуля формируются на этапе предварительной обработки и содержат набор слоев: рассчитанные индексные карты (NDWI, MNDWI, AWEI, SWI и др.), карты растительности (NDVI, SAVI), динамические поля осадков (MPE), температурные поля облачных вершин и маски (облака, тени, городские объекты). Для обеспечения согласованности размерности все входные слои приводятся к единой сетке и нормализуются по физическим единицам. В качестве дополнительного признака может использоваться вектор совпадения с гидрографической сетью и индекс удаленности от известных водоемов.

Валидация модуля может проводиться на выделенных тестовых выборках района и проверяться на данных из других территориальных областей, что позволяет оценить достоверность результатов и устойчивость модуля к региональным особенностям. Процедуры валидации должны включать пространственные метрики (пересечение по площади, индекс совпадения

полигона), а также операционные показатели эффективности – задержку обнаружения и частоту ложных тревог.

Процедуры дообучения и адаптации должны быть рассчитаны на регулярное обновление: предусмотрено периодическое пополнение обучающей базы новыми размеченными событиями и механизмы частичного дообучения моделей с сохранением накопленного опыта. Также необходима возможность ручной корректировки обучающих меток и цикла обратной связи, при котором подтвержденные внутриоперационные события используются для повышения качества последующих предсказаний.

6. Реализация ключевых элементов платформы на материалах наводнения в Крыму (июнь 2021 года) и полученные результаты

Для проверки работоспособности ключевых элементов предложенной методики была сформирована экспериментальная выборка, основанная на данных, относящихся к наводнению в Крыму, произошедшему в июне 2021 года и периоду непосредственно до и после этих событий, с 15 по 25 июня [24,25]. В выборку вошли многовременные последовательности геостационарных кадров SEVIRI, отдельные оптические сцены Sentinel-2, радиолокационные сцены Sentinel-1 и продукты осадков МРЕ, а также отчетные данные региональных служб (оперативные сводки МЧС [26] и данные Крымского УГМС [27]), использовавшиеся для внешней верификации и разметки. Набор покрывал типовые сценарии события: прибрежные и внутренние поймы, урбанизированные участки и сельскохозяйственные территории, а также переходные состояния «до события – во время события – после события», что позволило учитывать временную динамику проявлений затопления.

В качестве обучаемой модели была выбрана сверточная нейронная сеть многоуровневой архитектуры (UNet-подобная схема с краткими обходными связями), дополненная блоком аккумулирования временной информации для серии наблюдений по одной и той же территории. Система обучения нейросети была реализована в качестве программного комплекса, выполненного в среде

Python. Далее приведено описание конкретных шагов, реализованных с его помощью. Исходные продукты (Sentinel-2 L2A, Sentinel-1 GRD, SEVIRI, продукты осадков) были приведены к единой геопривязке и пространственному разрешению опорного канала (10м). Для обработки больших сцен реализована оконная нарезка: сцены делились на фрагменты 256×256 пикселей, для каждого фрагмента выполнялось локальное перепроектирование необходимых каналов. В ходе подготовки для каждого фрагмента рассчитывались наборы признаков: спектральные индексы (NDWI, MNDWI, AWEI, SWI, индексы растительности), температурные поля, карта интенсивности осадков и текстурные характеристики; радарные каналы (VV, VH) нормализовались отдельным потоком подготовки.

На входе реализован специальный загрузчик, который с помощью библиотеки rasterio читает геопривязанные растровые файлы, выбирает нужные каналы по заранее подготовленному перечню участков сцены и собирает из них многослойные численные массивы, пригодные для подачи в модель. В загрузчике реализованы фильтрация по облачности (SCL или внешняя маска), центрированная вырезка прямоугольных фрагментов нужного размера, приведение каналов к сопоставимым шкалам и временное хранилище подготовленных результатов для ускорения повторных прогонов. Для обучения предусмотрены процедуры формирования пакетов изображений с возможностью параллельной подгрузки данных (несколько рабочих потоков одновременно) и применение настраиваемой генерации дополнительных вариантов изображений – повороты, зеркальные отражения, небольшие смещения, изменения яркости/контраста и имитация помех – что увеличивает разнообразие обучающей выборки.

Предложенная вычислительная схема представляет собой последовательность этапов обработки, реализованную в виде «сжатие – учет времени – восстановление» с перекрестными связями между уровнями. На начальном этапе производится многоканальная обработка входных изображений: каждый кадр преобразуется в набор пространственных признаков

посредством последовательности сверточных блоков. На последующих ступенях пространственное разрешение постепенно уменьшается, что обеспечивает формирование более абстрактных, крупномасштабных описаний сцены; одновременно количество признаковых каналов возрастает, позволяя аккумулировать более сложную и разнородную информацию о пространственной структуре и спектральных соотношениях.

В средней части архитектуры предусмотрена схема учета временной динамики. При наличии серии наблюдений для одного участка географии выходы «сжимающей» части подаются в блок, аккумулирующий информацию о предыдущих состояниях. Этот блок фиксирует изменения признаков во времени и тем самым повышает способность модели отличать кратковременные явления (например, следы непродолжительных осадков) от устойчивых элементов ландшафта. Таким образом достигается учет последовательных изменений без ущерба для пространственной локализации.

Для повышения точности локальных решений и отбора релевантных сочетаний каналов включен механизм пространственно-канальной фокусировки. Он усиливает отклик сети на информативные участки и комбинации признаков, что особенно важно при объединении оптических и радарных сведений в условиях сложного фона. Внутри блоков применения сверток использованы краткие обходные связи, что улучшает сходимость обучения и снижает риск деградации качества при увеличении глубины модели.

Выходная часть сети восстанавливает исходное пространственное разрешение, объединяя многомасштабные представления через прямые связи с соответствующими уровнями сжатия. Итоговая продукция модели включает растровую карту вероятности наличия водного покрова для каждого пикселя.

Обучение модели проводилось с использованием адаптивного стохастического метода оптимизации на основе алгоритма ADAM (Adaptive Moment Estimation) [28]. В экспериментах применялись стандартные настройки, обеспечивающие надежную сходимость: небольшая L2-регуляризация весов для снижения переобучения и объем пакета данных, адаптированный под объем

видеопамяти (в эксперименте – эквивалент 8–12 изображений в одном пакете). Процесс обучения контролировался по проверочному набору: при отсутствии улучшения контрольной метрики в течение нескольких итераций осуществлялась остановка и сохранялась лучшая по валидации версия модели. Для компенсации сильного дисбаланса классов предусмотрены два практических механизма: увеличение вклада ошибок редкого класса в суммарную функцию потерь и приоритизация «трудных» отрицательных образцов при формировании обучающих пакетов – это повышает чувствительность модели к редким, но важным событиям.

Модель выдает на выходе растровую карту вероятностей наличия водного покрова для каждого пикселя. В последующем применяются этапы постобработки: бинаризация вероятностной карты по порогу (порог настраиваем; в экспериментах исследовались несколько наборов порогов и параметров минимальной площади для отбраковки шумовых объектов); морфологические операции и контекстная фильтрация (удаление мелких пятен, слияние смежных областей с учетом гидрографии); векторизация полученных масок с сохранением геометрии и формированием таблицы характеристик (площадь, периметр, временная метрика и др.); создание сводного отчетного файла-таблицы с суммарной информацией по сцене. Практическая реализация кода учитывала производительность: запись результатов выполняется блочно (по окнам), результаты перепроекций для Sentinel 1 сохраняются на компьютере (чтобы повторно не тратить ресурсы), а если в папке результатов уже есть полный набор выходных файлов для сцены – повторная обработка сцены пропускается.

Для каждой исходной сцены генерируется следующий набор файлов, пригодных как для визуализации, так и для аналитики: растровая карта вероятностей, рассчитанная по оптическим каналам (Sentinel-2); бинарная маска затопленных территорий по данным Sentinel-2, сформированная на основе вероятностной карты с применением порогового отбора и пространственной очистки результатов; растровая карта вероятностей, оцененная на основе

радиолокационных данных (Sentinel-1) после перепроекции на опорную сетку; бинарная маска (Sentinel-1); объединенная карта вероятностей, полученная путем комбинирования данных Sentinel-1 и Sentinel-2 и временных признаков (рис. 2); итоговая бинарная маска при заданных порогах и минимальной площади; векторизованные полигоны и таблица с характеристиками найденных очагов (площадь, координаты, уровень доверия и др.); PNG-изображения для быстрого просмотра; директория с промежуточными TIFF-файлами перепроекций Sentinel-1 и опорная сетка (чтобы при повторных запусках не тратить время и ресурсы машины на перепроекции).

ISIL2A_20210620T083559_R064_T36TYR_20210623T101912_t55_a500

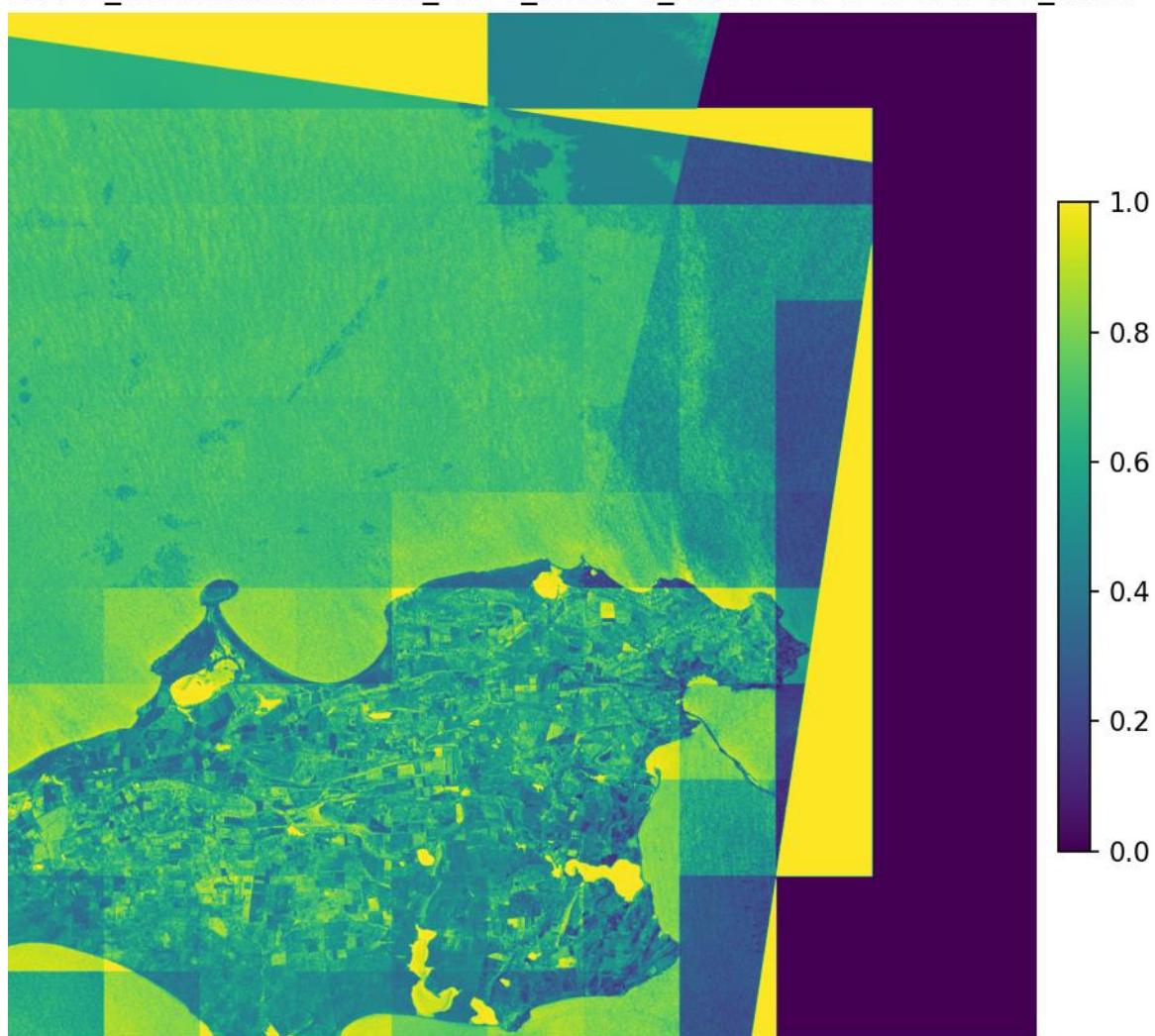


Рис. 2. Пример объединенной вероятностной карты наводнений для Керченского полуострова, построенной на основе синтеза данных Sentinel-1 и Sentinel-2.

Для оценки устойчивости результатов использовались три уровня вероятностного отбора (0.45, 0.55 и 0.65) в комбинации с тремя значениями минимальной площади объекта (100, 500 и 1000 пикселей), что позволило проанализировать чувствительность метода к масштабу и интенсивности проявлений затопления. Цветовая шкала отображает вероятностный уровень наводнения (значение в пределах от 0 до 1).

Для иллюстрации процесса обработки и вклада радиолокационной информации на рис. 3 приведен локальный фрагмент сцены, для которого показаны оптические данные Sentinel-2, радиолокационное изображение Sentinel-1, а также соответствующие бинарные маски и итоговый объединенный результат. Представлены оптические данные Sentinel-2 в естественных цветах (a), а также радиолокационные изображения Sentinel-1 в поляризациях VV (b) и VH (c), перепроектированные на опорную сетку оптики. По оптическим (d) и радиолокационным данным (e) независимо сформированы бинарные маски затопления с последующей фильтрацией шумов. Итоговая интеграция представлена вероятностной картой затопления (f), отражающей оценку наличия водного покрова для каждого пикселя. Для визуальной проверки результата показаны итоговая бинарная маска (g) и векторные контуры зон затопления (h), наложенные на оптическое изображение Sentinel-2.

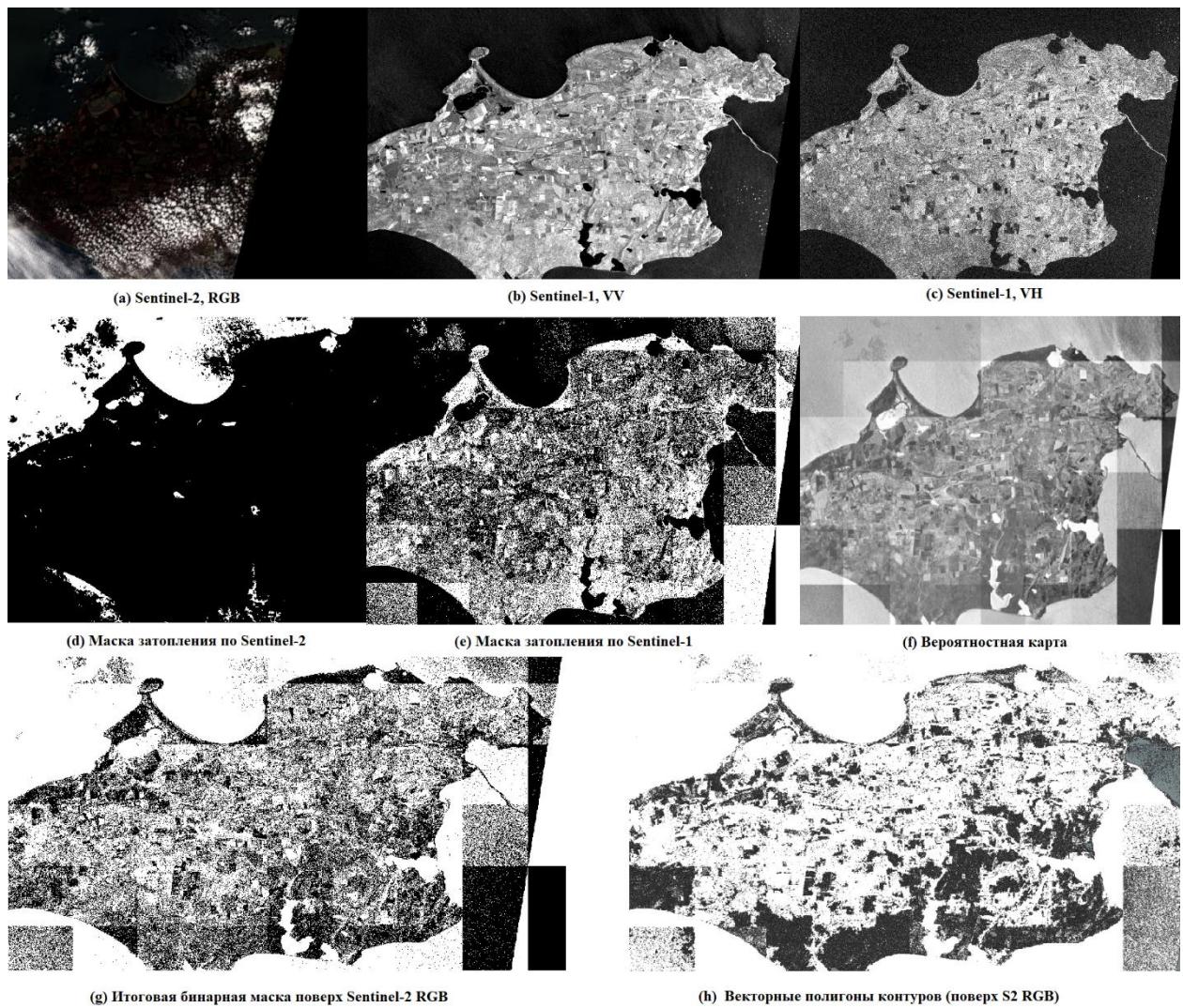


Рис. 3. Локальная демонстрация вклада радиолокационных данных и итоговой интеграции: (а–с) – исходные растровые данные (оптика и радар), (д–е) – независимые бинарные карты по каждому типу данных, (ф) – объединенная вероятностная карта затопления, (г–х) – итоговая маска и векторные контуры, наложенные на оптическое изображение для проверки пространственного соответствия.

Видно, что в условиях пониженной информативности оптических данных радиолокационный канал обеспечивает устойчивое выявление водных поверхностей и существенно улучшает целостность итоговой карты затопления.

Реализованная в Python цепочка доказала практическую применимость подхода: объединение многоспектральной оптики, радарных каналов и временной информации повышает стабильность детекции в условиях сложного фона и облачности. Сопоставление с данными наземной верификации подтвердило высокую степень локального совпадения очагов затопления:

большинство ключевых событий, отмеченных МЧС и региональными метеорологическими службами, было корректно идентифицировано и ранжировано системой. При этом отмечалась необходимость дополнительной фильтрации по мелким объектам и локальным стоячим водам, возникающим вне гидрографической сети, что потребовало внедрения более строгих морфологических и контекстных правил на постобработке.

Полученные результаты являются демонстрацией применимости предлагаемого подхода на примере конкретного события. Но при их оценке следует учитывать следующие ограничения: объем размеченной выборки ограничен (несколько сотен кадров), что уменьшает статистическую устойчивость оценок для редких сценариев. Для повышения надежности и расширения применимости необходимо последующее расширение обучающего массива за счет включения дополнительных событий и регионов, систематическое пополнение набора подтвержденными событиями и организация непрерывного цикла дообучения моделей в продуктивной среде.

Заключение

Предложенная методология задает практическую основу для гибридной платформы оперативного спутникового мониторинга, объединяющей геостационарные изображения SEVIRI, оптические снимки Sentinel-2, радиолокационные сцены Sentinel-1, продукты осадков (MPE) и наземную верификацию. Организация цепочки «прием – предобработка – индексный анализ – интеллектуальная интерпретация – интеграция результатов» обеспечивает сочетание оперативности и достаточной пространственной детализации аналитических продуктов.

Предобработка, включающая радиометрическую и атмосферную калибровку, маскирование облачности, геометрическую привязку и приведение изображений к единой пространственной сетке обеспечивает получение сопоставимых входных данных для расчета индексных показателей (NDWI, MNDWI, AWEI, SWI и индексов растительности). Эти показатели используются

совместно с нейросетевой обработкой для построения вероятностных карт затопления и оценки степени достоверности полученных результатов. При этом ключевыми ограничениями остаются объем размеченных данных, региональная специфичность моделей и необходимость точной синхронизации спутниковых и наземных источников для временной валидации.

Проведенный эксперимент на материалах наводнения в Крыму июня 2021 года подтвердил, что комбинированный подход – сочетание индексного анализа, временной агрегации геостационарных наблюдений и использования нейросетевой обработки с дополняющими данными Sentinel и MPE – повышает информативность мониторинга и дает практическую добавочную ценность по сравнению с одноступенчатыми методами. Результаты требуют дальнейшей верификации, а также расширения набора данных до уровня, достаточного для широкомасштабного внедрения.

Предложенный гибридный подход является практически реализуемым, при условии системного расширения данных и адаптации алгоритмов он способен повысить эффективность раннего обнаружения и мониторинга наводнений в оперативных службах.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-00395-25-00.

Литература

1. Митник Л.М., Кулешов В.П., Митник М.Л., Пичугин М.К., Хазанова Е.С. Спутниковый мониторинг наводнения в Приморье в 2017 г. // Сборник тезисов докладов пятнадцатой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Москва, 13–17 ноября 2017 года / Институт космических исследований Российской академии наук. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2017. – С. 102.
2. Notti D. et al. Potential and limitations of open satellite data for flood mapping // Remote sensing. – 2018. – Т. 10. – №. 11. – С. 1673.

3. Schmetz J. et al. An introduction to Meteosat second generation (MSG) // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2002. – Т. 83. – №. 7. – С. 977-992. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2002\)083%3C0977:AITMSG%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2002)083%3C0977:AITMSG%3E2.3.CO;2)
4. Schmetz J. et al. Monitoring weather and climate with the Meteosat and Metop satellites // Revista de Teledetección. – 2007. – Т. 27. – С. 5-16. <http://www.aet.org.es/revistas/revista27/AET27-01.pdf>
5. MSG Meteorological Products Extraction Facility Algorithm Specification Document 23 October 2015, v7B e-signed // Eumetsat.int. URL: <https://www.eumetsat.int/media/38993>
6. Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Ивангородский Р.В. Характеристики поля ветра в верхней тропосфере как индикаторы климатической изменчивости // Исследование Земли из Космоса, 2023, № 4, стр. 92-106. <https://doi.org/10.31857/S0205961423030053>
7. The main instruments carried by the MSG satellites are the Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI) and the Geostationary Earth Radiation Budget (GERB) // Eumetsat.int. URL: <https://www.eumetsat.int/meteosat-second-gen-instruments>
8. Gerardo R., de Lima I.P. Comparing the Capability of Sentinel-2 and Landsat 9 Imagery for Mapping Water and Sandbars in the River Bed of the Lower Tagus River (Portugal) // Remote Sens. 2023, 15, 1927 // <https://doi.org/10.3390/rs15071927>
9. Shen G., Fu W., Guo H., Liao J. Water Body Mapping Using Long Time Series Sentinel-1 SAR Data in Poyang Lake. Water 2022, 14, 1902. // [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.3390/w14121902>
10. Gulácsi A., Kovács F. Sentinel-1-Imagery-Based High-Resolution Water Cover Detection on Wetlands, Aided by Google Earth Engine // Remote Sens. 2020, 12, 1614. <https://doi.org/10.3390/rs12101614>
11. Kumah K.K. Near-real-time rainfall detection and estimation from commercial microwave links and Meteosat Second Generation data // University of Twente, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), 2022. 215 p.

12. Meirink J.F., Roebeling R.A., and Stammes P. Inter-calibration of polar imager solar channels using SEVIRI // *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 2495–2508 <https://doi.org/10.5194/amt-6-2495-2013>
13. Doxani G. et al. Atmospheric Correction Inter-comparison eXercise, ACIX-II Land: An assessment of atmospheric correction processors for Landsat 8 and Sentinel-2 over land // *Remote Sensing of Environment*. – 2023. – T. 285. – C. 113412. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113412>
14. McFEETERS S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
15. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
16. Feyisa G.L. et al. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery // *Remote sensing of environment*. – 2014. – T. 140. – C. 23–35.
17. Sharma R.C., Tateishi R., Hara K., Nguyen L.V. Developing Superfine Water Index (SWI) for Global Water Cover Mapping Using MODIS Data // *Remote Sens.* 2015, 7, 13807-13841. <https://doi.org/10.3390/rs71013807>
18. Liu S., Wu Y., Zhang G., Lin N., Liu Z. Comparing Water Indices for Landsat Data for Automated Surface Water Body Extraction under Complex Ground Background: A Case Study in Jilin Province. *Remote Sens*, 2023, 15, 1678.
19. Mastering NDWI: Understanding Water Thresholds and Ranges for Precision Agriculture // [Электронный ресурс]. URL: <https://farmonaut.com/remote-sensing/mastering-ndwi-understanding-water-thresholds-and-ranges-for-precision-agriculture>
20. Anwer Hossam Aldeen & Mohamed Tarig. Prediction of Flood Monitoring for Satellite Image Using Artificial Neural Networks // *ResearchGate*. 2025. https://www.researchgate.net/publication/387599533_Prediction_of_Flood_Monitoring_for_Satellite_Image_Using_Artificial_Neural_Networks

21. Hernandez L., Ali M., Zhang S. Geospatial Artificial Intelligence for Satellite-based Flood Extent Mapping: Concepts, Advances, and Future Perspectives. // ResearchGate. 2025. <https://arxiv.org/html/2504.02214v2>
22. Wu Xuan, Zhang Zhijie, Xiong Shengqing, Zhang Wanchang, Tang Jiakui, Li Zhenghao, An Bangsheng, Li Rui. A Near-Real-Time Flood Detection Method Based on Deep Learning and SAR Images // Remote Sensing, 15(8), 2046, 2023. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/8/2046>
23. Pranath Reddy Kumbam, Kshitij Maruti Vejre. FloodLense: A Framework for ChatGPT-based Real-time Flood Detection // arXiv preprint, arXiv:2401.15501v1, 2024. <https://arxiv.org/html/2401.15501v1>
24. Штормовое предупреждение об опасных гидрометеорологических явлениях по Республике Крым на 16-17 июня 2021 года. // [Электронный ресурс]. URL: https://82.mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/vse_novosti/4489285
25. Штормовое предупреждение об опасных гидрометеорологических явлениях по Республике Крым на 21-22 июня 2021 года. // [Электронный ресурс]. URL: https://82.mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/vse_novosti/4493462
26. Главное управление МЧС России по Республике Крым. Официальный сайт, раздел пресс-центр, оперативная информация // [Электронный ресурс]. URL: <https://82.mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/operativnaya-informaciya>
27. Наблюдательная сеть метеостанций Республики Крым. // Росгидромет. ФГБУ «Крымское УГМС» [Электронный ресурс]. URL: https://meteo.crimea.ru/?page_id=99
28. Diederik P. Kingma, Jimmy Ba. Adam: A Method for Stochastic Optimization // Arxiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980>

Для цитирования:

Савченко Е.В., Маклаков С.М. Гибридная платформа спутникового мониторинга и ИИ для оперативного выявления предпосылок наводнений // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.1.3>