

УДК 551.435:528.88:004.9

DOI: 10.46698/VNC.2026.61.21.001

Оригинальная статья

Геоинформационное моделирование зон подтопления горных территорий Северного Кавказа на основе спутниковых и метеорологических данных

О.С. Ермолаева¹, С.О. Курашкин^{2,1}, О.С. Пучкова¹,
А.В. Бабкина¹, О.В. Иванов³

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА
им. К.А. Тимирязева, Россия, 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49,
e-mail: ol_ermolaeva@rgau-msha.ru, puchkova@rgau-msha.ru,
babkina@rgau-msha.ru;

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия,
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, e-mail: kurashkin@emtc.ru;

³ Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, Россия, 353918,
г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: ivanovab@list.ru

Статья поступила: 03.03.2026, доработана: 29.05.2026, принята к публикации: 03.06.2026

Резюме: Актуальность работы. Рост частоты экстремальных осадков и паводковых явлений в горных районах Северного Кавказа повышает необходимость разработки современных методов выявления и прогнозирования зон подтопления на основе данных дистанционного зондирования Земли и геоинформационных технологий. **Цель исследования.** Разработка геоинформационной модели выявления зон подтопления горных территорий Северного Кавказа с использованием спутниковых и метеорологических данных, а также цифровых моделей рельефа. **Методы исследования.** Использованы радиолокационные данные Sentinel-1, мультиспектральные данные Sentinel-2 и Landsat-8, цифровые модели рельефа SRTM DEM и ALOS PALSAR DEM, а также метеорологические данные ERA5 и GPM IMERG. Обработка и анализ данных выполнены средствами QGIS, ArcGIS Pro, Google Earth Engine и Python. Для классификации зон подтопления применен алгоритм Random Forest. **Результаты.** Установлено, что наиболее подвержены подтоплению пойменные территории, межгорные котловины и участки с малыми уклонами поверхности. Определены пороговые значения осадков, способствующие формированию опасных гидрологических ситуаций. Показана высокая эффективность совместного использования радиолокационных и оптических спутниковых данных. Разработанная модель обеспечила общую точность классификации 91–93 % и может использоваться для мониторинга, оценки гидрологических рисков и поддержки систем раннего предупреждения чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: геоинформационное моделирование, подтопление, Северный Кавказ, дистанционное зондирование Земли, Sentinel-1, Sentinel-2, цифровая модель рельефа, гидрологический анализ, ГИС, метеорологические данные, опасные природные процессы, паводки.

Для цитирования: Ермолаева О.С., Курашкин С.О., Пучкова О.С., Бабкина А.В., Иванов О.В. Геоинформационное моделирование зон подтопления горных территорий Северного Кавказа на основе спутниковых и метеорологических данных. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 244–255. DOI: 10.46698/VNC.2026.61.21.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.61.21.001

Original paper

Geoinformation modeling of flood zones in mountainous areas of the North Caucasus based on satellite and meteorological data

O.S. Ermolaeva¹, S.O. Kurashkin^{2,1}, O.S. Puchkova¹,
A.V. Babkina¹, O.V. Ivanov³

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
49 Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation,
e-mail: ol_ermolaeva@rgau-msha.ru, puchkova@rgau-msha.ru,
babkina@rgau-msha.ru;

² Bauman Moscow State Technical University 5, 2nd Baumanskaya Str.,
Moscow 105005, Russian Federation, e-mail: kurashkin@emtc.ru;

³ Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk 353918,
Russian Federation, e-mail: ivanovab@list.ru

Received: 03.03.2026, revised: 29.05.2026, accepted: 03.06.2026

Abstract: Relevance. Extreme precipitation and flood events are becoming increasingly frequent in the mountainous regions of the North Caucasus. This underscores the need for the accurate identification and forecasting of inundation zones. Addressing this challenge requires the development of advanced methods based on Earth remote sensing data and geoinformation technologies. **Aim.** This study aims to develop a geoinformation model for identifying flood-prone areas in the mountainous territories of the North Caucasus based on satellite, meteorological, and terrain data. **Methods.** Sentinel-1 radar imagery, Sentinel-2 and Landsat-8 multispectral data, SRTM DEM and ALOS PALSAR DEM elevation models, as well as ERA5 and GPM IMERG meteorological datasets were used. Data processing and spatial analysis were performed using QGIS, ArcGIS Pro, Google Earth Engine, and Python. Flood-zone classification was carried out using the Random Forest algorithm. **Results.** Flood-prone areas were primarily associated with floodplains, intermountain depressions, and low-slope terrain. Critical precipitation thresholds contributing to hazardous hydrological conditions were identified. The integration of radar and optical satellite data demonstrated high effectiveness for flood monitoring under complex terrain conditions. The developed model achieved an overall classification accuracy of 91–93 % and can be applied for flood monitoring, hydrological risk assessment, and early warning system support.

Keywords: geoinformation modeling, flooding; North Caucasus, remote sensing, Sentinel-1, Sentinel-2, digital elevation model, hydrological analysis, GIS, meteorological data, natural hazards, floods.

For citation: Ermolaeva O.S., Kurashkin S.O., Puchkova O.S., Babkina A.V., Ivanov O.V. Geoinformation modeling of flood zones in mountainous areas of the North Caucasus based on satellite and meteorological data. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 244–255. DOI: 10.46698/VNC.2026.61.21.001

Введение

В последние годы проблема подтопления территорий становится одной из наиболее актуальных для горных регионов Северного Кавказа. Данное обстоятельство связано как с изменением климатических условий, так и с возрастающей антропогенной нагрузкой на природные ландшафты [Yaitskaya, Magaeva, 2022a]. Особенно остро данная проблема проявляется в районах со сложным рельефом, где даже от-

носителем небольшое увеличение количества осадков может приводить к развитию опасных гидрологических процессов, включая селевые потоки, локальные паводки и затопления пойменных территорий [Yaitskaya, Magaeva, 2022b]. Для республик Северного Кавказа подобные процессы представляют существенную угрозу как для населенных пунктов, так и для объектов транспортной и инженерной инфраструктуры [Pradhan, Buchroithner, 2012].

На современном этапе развития геоинформационных технологий большое внимание уделяется вопросам оперативного мониторинга природных процессов на основе данных дистанционного зондирования Земли [Pradhan, 2015]. Использование спутниковых снимков позволяет получать информацию о состоянии территорий в реальном времени, что особенно важно для труднодоступных горных районов [Neposhyvailenko et al., 2024]. При этом применение спутниковых данных совместно с метеорологической информацией дает возможность существенно повысить точность оценки зон потенциального подтопления [Swain et al., 2020]. Следует отметить, что традиционные методы гидрологических наблюдений зачастую требуют значительных материальных и временных затрат, а также наличия развитой сети наземных постов наблюдения, которая в горных районах развита недостаточно [Struchkova et al., 2019].

Северный Кавказ характеризуется сложным сочетанием природных факторов, влияющих на формирование опасных гидрологических процессов [Freire et al., 2015]. Существенную роль здесь играют крутые склоны, значительные перепады высот, высокая расчлененность рельефа и интенсивные атмосферные осадки [Gharagozlou, Diarjan, 2010]. Дополнительное влияние оказывают процессы деградации растительного покрова, хозяйственное освоение склоновых территорий и изменение русловых систем рек [Stefano et al., 2024]. В результате даже кратковременные ливневые осадки способны вызывать резкое увеличение поверхностного стока и формирование зон подтопления [Ismailov et al., 2023].

В настоящее время для решения задач прогнозирования и анализа подтоплений активно используются геоинформационные системы и методы пространственного моделирования [Krill et al., 2023]. Применение цифровых моделей рельефа позволяет проводить анализ направления стока, определять водосборные бассейны и выявлять потенциально опасные участки накопления воды [Lukyanchuk, Pidkova, 2021]. Особую эффективность показывают радиолокационные спутниковые данные Sentinel-1, которые позволяют фиксировать переувлажненные территории независимо от облачности и времени суток [Seyoum et al., 2019]. В сочетании с оптическими спутниковыми системами Sentinel-2 и Landsat становится возможным проведение комплексного анализа состояния исследуемых территорий [Lemenkova, 2024].

Следует отметить, что в научной литературе имеется достаточно большое количество исследований, посвященных анализу паводковых процессов и моделированию подтоплений [Nikiforov et al., 2019]. Однако значительная часть существующих методик ориентирована преимущественно на равнинные территории и не учитывает специфику горных регионов [Denissova et al., 2025]. Для Северного Кавказа данная проблема имеет особую актуальность, поскольку здесь наблюдается сочетание высокой плотности населения с повышенной природной опасностью [Kasiyanchuk, Davybida, 2025]. Кроме того, в последние годы отмечается рост числа экстремальных погодных явлений, что дополнительно увеличивает вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций гидрологического характера [Detera et al., 2023].

В связи с этим разработка методов геоинформационного моделирования зон подтопления на основе интеграции спутниковых и метеорологических данных представляет значительный научный и практический интерес. Использование современных методов пространственного анализа позволяет не только выявлять уже существую-

щие зоны подтопления, но и прогнозировать потенциально опасные участки при различных сценариях выпадения осадков. Это особенно важно для систем мониторинга и предупреждения чрезвычайных ситуаций, а также для принятия управленческих решений в области территориального планирования и природопользования [Melesse et al., 2023].

Целью настоящего исследования является разработка геоинформационной модели выявления зон подтопления горных территорий Северного Кавказа на основе комплексного использования спутниковых и метеорологических данных. В рамках исследования рассматриваются возможности применения цифровых моделей рельефа, радиолокационных и мультиспектральных спутниковых данных, а также методов пространственного анализа для повышения эффективности мониторинга опасных гидрологических процессов в условиях сложного горного рельефа.

Методы и материалы

Объектом исследования являлись горные территории Северного Кавказа, подверженные подтоплениям и локальным паводкам. Для анализа использовались спутниковые, метеорологические и геоинформационные данные. Основными источниками спутниковой информации стали данные Sentinel-1 и Sentinel-2 программы Copernicus. Радиолокационные данные Sentinel-1 (режим IW, разрешение 10 м, поляризации VV и VH) использовались за период 2021–2025 гг. с интервалом съемки 6–12 суток. Для оптического анализа применялись данные Sentinel-2 MSI Level-2A с разрешением 10, 20 и 60 м, а также архивные изображения Landsat-8 OLI/TIRS. В качестве цифровых моделей рельефа использовались SRTM DEM (30 м) и ALOS PALSAR DEM. Рассчитывались уклоны, экспозиции склонов, параметры водосборов, а также индексы TWI и SPI. Метеорологические данные включали сведения архивов ERA5, GPM IMERG и метеостанций Росгидромета. Анализировались осадки, температура, влажность и снеготаяние. Общий объем обработанных данных превысил 250 Гб, временной шаг составлял 1 и 24 часа. Обработка данных выполнялась на рабочей станции под управлением Windows 11 Pro с процессором Intel Core i9-13900K, оперативной памятью 128 Гб DDR5 и видеокартой NVIDIA RTX 4090 (24 Гб). Дополнительно использовались серверы на базе AMD EPYC и системы хранения Synology RackStation. Предварительная обработка данных проводилась в SNAP 10.0 с применением радиометрической калибровки, геометрической коррекции и фильтрации Lee Sigma (окно 5×5). Геоинформационный анализ выполнялся в QGIS 3.34, ArcGIS Pro 3.2 и Google Earth Engine. Для автоматизации расчетов использовался Python 3.11 с библиотеками GDAL, Rasterio, NumPy, SciPy, GeoPandas, Pandas и xarray. Классификация зон переувлажнения осуществлялась методом Random Forest с числом деревьев 100–300 и глубиной до 20 уровней. Средняя точность классификации составила 89–93 %. Итоговые карты подтопления формировались путем интеграции спутниковых, метеорологических и геоинформационных данных и верифицировались по архивным материалам МЧС и сведениям о фактических паводковых событиях на территории Северного Кавказа.

Результаты

В ходе проведенного исследования было установлено, что применение комплексного геоинформационного подхода с использованием спутниковых и метеорологических данных позволяет достаточно эффективно выявлять зоны потенциального подтопления в пределах горных территорий Северного Кавказа. Анализ спутниковых изображений Sentinel-1 и Sentinel-2 показал высокую пространственную неоднородность распределения переувлажненных участков, что в первую очередь связано со сложным рельефом исследуемой территории, различной экспозицией склонов и неравномерным выпадением атмосферных осадков. Особенно хорошо подобные раз-

личия проявлялись в районах речных долин и межгорных котловин, где наблюдалось накопление поверхностного стока и локальное повышение влажности почвенного покрова.

В результате обработки радиолокационных данных Sentinel-1 было выявлено, что наибольшая чувствительность к изменению влажности поверхности наблюдается в диапазоне обратного рассеяния от -18 до -10 dB для поляризации VV. При этом для переувлажненных и подтопленных территорий фиксировалось устойчивое снижение коэффициента обратного рассеяния, что связано с изменением структуры поверхности и увеличением содержания влаги. Следует отметить, что в условиях горного рельефа на результаты радиолокационной съемки значительное влияние оказывают эффекты геометрических искажений, прежде всего layover и shadowing. Однако применение цифровых моделей рельефа позволило в значительной степени компенсировать указанные искажения и повысить точность дешифрирования зон подтопления.

Анализ мультиспектральных данных Sentinel-2 показал, что использование индексов NDWI и MNDWI позволяет достаточно уверенно выделять территории с избыточным увлажнением. Для отдельных участков долин рек Терек, Кубань и Сунжа значения NDWI в периоды интенсивных осадков возрастали до $0,42$ – $0,57$, тогда как для сухих склоновых участков они обычно не превышали $0,05$ – $0,12$. Было установлено, что наиболее информативными являются комбинации каналов B3, B8 и B11, обеспечивающие устойчивое выделение переувлажненных поверхностей даже при частичной облачности. В ряде случаев дополнительно использовались тепловые каналы Landsat-8, что позволило выявлять участки повышенного испарения и длительного удержания влаги. При анализе цифровой модели рельефа SRTM DEM было установлено, что зоны подтопления преимущественно формируются на участках с уклонами менее 8 – 10° . При увеличении крутизны склонов вероятность длительного удержания воды существенно снижалась, однако возрастала вероятность формирования интенсивного поверхностного стока и селевых процессов. Наиболее опасными оказались участки в пределах конусов выноса и пойменных равнин малых горных рек. Для данных территорий наблюдалось сочетание высоких значений индекса накопления стока flow accumulation и низких углов наклона поверхности (табл. 1). Анализ параметров рельефа показал, что значения terrain wetness index в пределах наиболее опасных зон достигали 14 – 18 единиц, что существенно превышало средние показатели для окружающих склоновых территорий.

Таблица 1 / Table 1

**Основные параметры выявленных зон подтопления
на исследуемых территориях Северного Кавказа /
Main parameters of identified flood zones in the studied areas
of the North Caucasus**

Район исследования / Study Area	Средний уклон поверхности, $^\circ$ / Average Surface Slope, $^\circ$	Максимальное количество осадков за 24 ч, мм / Maximum 24-Hour Precipitation, mm	Значение NDWI / NDWI Value	Terrain Wetness Index	Площадь под- топления, км ² / Flooded Area, km ²
Пригородная зона Владикавказа / Vladikavkaz Suburban Area	6,8	58	0,54	16,2	12,4
Долина р. Терек / Terek River Valley	4,1	72	0,57	18,1	18,7

Межгорные участки КБР / Intermontane Areas of the Kabardino- Balkarian Republic	9,3	49	0,46	14,8	9,6
Предгорья Карачаево- Черкесии / Foothills of Karachay-Cherkessia	7,5	64	0,51	15,9	11,2
Восточная часть Чеченской Республики / Eastern Part of the Chechen Republic	5,4	53	0,48	15,1	10,3

В ходе исследования было установлено, что существенное влияние на формирование зон подтопления оказывает экспозиция склонов. Северные и северо-западные склоны характеризовались более длительным удержанием влаги вследствие меньшей интенсивности солнечной радиации и более медленного испарения. В ряде районов Карачаево-Черкесской Республики и Кабардино-Балкарии переувлажненные участки сохранялись в течение 12–18 суток после окончания интенсивных осадков (рис. 1). Южные склоны, напротив, высыхали значительно быстрее, что приводило к уменьшению площади потенциального подтопления. Подобная зависимость достаточно хорошо прослеживалась на спутниковых данных весеннего и осеннего периодов.

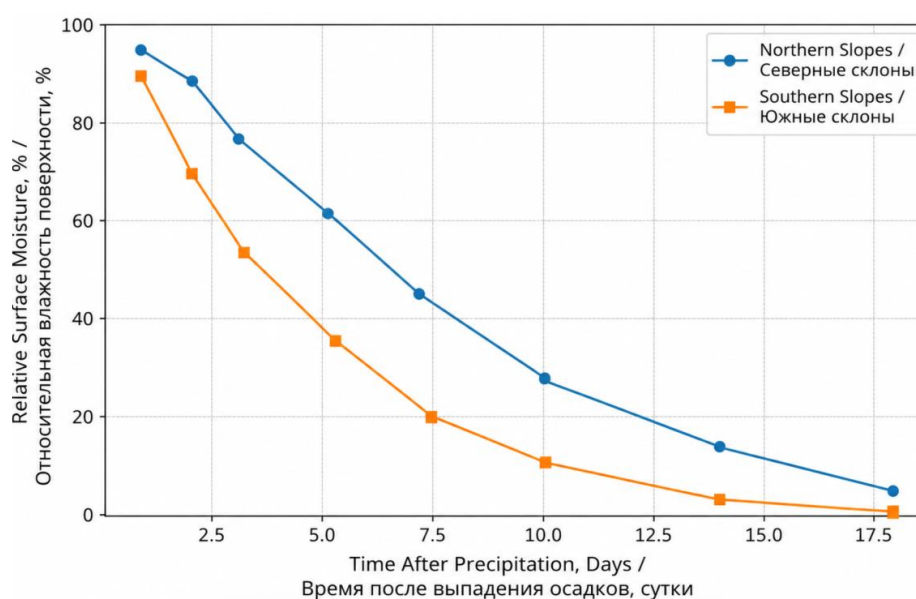


Рис. 1. Динамика изменения влажности склонов различной экспозиции после интенсивных атмосферных осадков /

Fig. 1. Dynamics of changes in moisture content of slopes of different exposures after intense precipitation

Анализ данных ERA5 и GPM IMERG показал, что наиболее опасные гидрологические ситуации формировались при осадках свыше 25–30 мм за 12 часов, а при выпадении более 50 мм за сутки резко возрастала площадь зон переувлажнения и вероятность выхода малых рек из берегов. Наиболее экстремальные условия наблюдались в июле–августе 2023 г., когда количество осадков превышало среднемесячную норму в 2,1–2,8 раза. Анализ временных рядов выявил тенденцию к увеличению

частоты кратковременных интенсивных ливней. Сопоставление результатов моделирования с архивными данными МЧС показало совпадение контуров подтопления для крупных паводков 2021–2025 гг. на уровне 82–89 %. Наиболее высокая точность была получена для пойм крупных рек, тогда как в узких горных ущельях она снижалась из-за ограниченного пространственного разрешения данных и теневых зон. Использование радиолокационной съемки позволило существенно повысить качество дешифрирования. Установлено, что максимальная площадь переувлажнения обычно формируется через 18–30 часов после окончания интенсивных осадков вследствие накопления и перераспределения поверхностного стока. В районах с развитой инфраструктурой и застройкой скорость формирования зон подтопления была выше, особенно в пригородах Владикавказа и Нальчика.

В результате пространственного анализа выделены три основных типа зон подтопления: пойменные территории крупных рек, локальные депрессии рельефа межгорных котловин и склоновых террас, а также зоны временного накопления стока на крутых склонах и в руслах временных водотоков. Для каждого типа определены характерные значения индексов влажности, уклонов поверхности и интенсивности осадков.

При проведении классификации зон подтопления с использованием алгоритма Random Forest было установлено, что наибольший вклад в итоговую модель вносят параметры рельефа и интенсивность осадков. Несколько меньшую, но также значительную роль играют значения радиолокационного коэффициента обратного рассеяния и мультиспектральные индексы влажности. Среднее значение общей точности классификации составило около 91 %, при этом коэффициент Карра находился в диапазоне 0,83–0,88 (табл. 2). Следует отметить, что ошибки классификации чаще всего наблюдались на участках густой древесной растительности, где наличие лесного полога затрудняет прямое определение степени переувлажнения поверхности.

Таблица 2 / Table 2

**Результаты оценки точности геоинформационной модели подтопления /
Results of assessing the accuracy of the geoinformation model of flooding**

Метод анализа / Analysis Method	Пространственное разрешение / Spatial Resolution	Общая точность классификации, % / Overall Classification Accuracy, %	Коэффициент Каппа / Каппа Coefficient	ROC AUC
Sentinel-1 SAR	10 м / 10 m	91,3	0,88	0,93
Sentinel-2 MSI	10–20 м / 10–20 m	87,5	0,83	0,89
Landsat-8 OLI	30 м / 30 m	81,2	0,76	0,82
Комплексная ГИС- модель / Integrated GIS Model	10 м / 10 m	93,1	0,90	0,95

В процессе исследования была также выполнена оценка влияния пространственного разрешения спутниковых данных на качество моделирования зон подтопления. Установлено, что при использовании данных с разрешением 10 м удастся выявлять локальные зоны накопления воды площадью от 0,05–0,1 га. При переходе к разрешению 30 м часть мелких объектов теряется, однако общая структура распределения подтопленных территорий сохраняется. Таким образом, для регионального анализа могут использоваться как данные Sentinel, так и материалы Landsat, тогда как для локального мониторинга предпочтительно применение более детализированных спутниковых изображений.

Интересные результаты были получены при анализе влияния лесного покрова на развитие процессов подтопления. Территории с высокой степенью залесенности характеризовались меньшей скоростью формирования поверхностного стока и более равномерным распределением влаги. В то же время участки с деградированным растительным покровом или интенсивным хозяйственным освоением демонстрировали повышенную склонность к формированию локальных подтоплений. Особенно хорошо данная зависимость проявлялась в районах вырубок и горных дорог, где наблюдалось разрушение естественного дренажа склонов.

В ходе моделирования были построены карты вероятности подтопления для различных сценариев интенсивности осадков. При сценарии выпадения 20 мм осадков за сутки зоны потенциального подтопления ограничивались в основном пойменными территориями и локальными понижениями рельефа (рис. 2). При увеличении количества осадков до 50–70 мм происходило резкое расширение зон переувлажнения, а также формирование многочисленных временных водотоков на крутых склонах. Для экстремального сценария более 100 мм осадков за сутки прогнозировалось возникновение масштабных паводковых процессов с вовлечением значительной части населенных территорий.

Следует отметить, что использование только метеорологических данных без учета особенностей рельефа и спутниковой информации приводило к значительному снижению точности прогноза. В ряде случаев различия между моделями достигали 25–30 %. Это подтверждает необходимость комплексного использования геоинформационных технологий при анализе гидрологических рисков в условиях сложного горного рельефа. Особенно важным является применение радиолокационных спутниковых данных, поскольку именно они позволяют получать оперативную информацию в периоды максимальной облачности и интенсивных осадков.

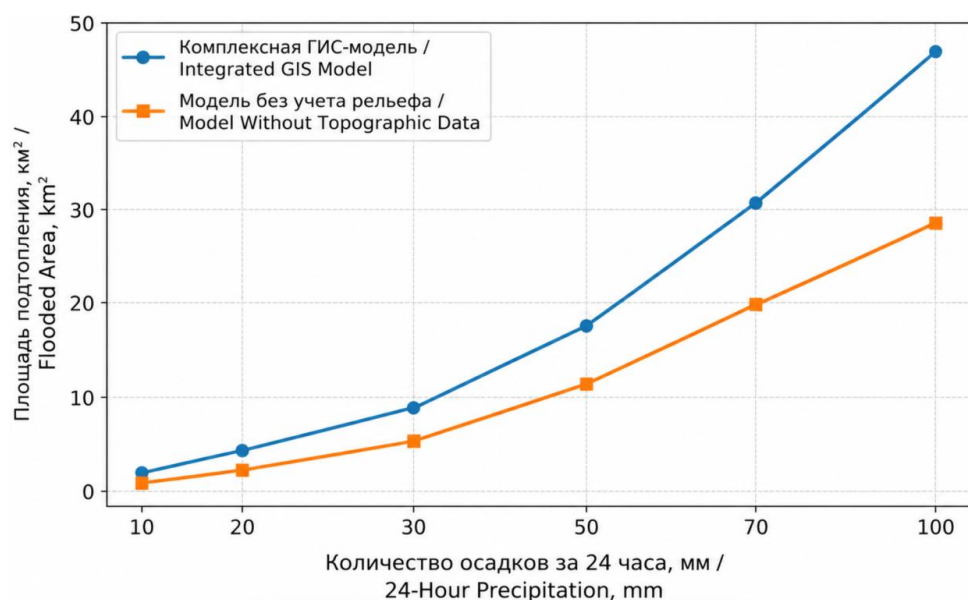


Рис. 2. Зависимость площади зон подтопления от интенсивности атмосферных осадков для различных вариантов геоинформационного моделирования /

Fig. 2. Dependence of the area of flood zones on the intensity of atmospheric precipitation for various options of geoinformation modeling

Полученные результаты показывают, что предложенная методика геоинформационного моделирования может использоваться для оперативного мониторинга опасных гидрологических процессов на территории Северного Кавказа. При этом при-

менение современных спутниковых данных и методов пространственного анализа позволяет существенно сократить время получения информации по сравнению с традиционными наземными наблюдениями. Кроме того, разработанная модель может быть адаптирована для других горных регионов, характеризующихся высокой вероятностью паводков и локальных подтоплений.

В целом проведенное исследование подтвердило высокую эффективность комплексного подхода к анализу зон подтопления. Использование спутниковых, метеорологических и геоинформационных данных в рамках единой модели позволило получить достаточно детальную картину пространственного распределения опасных гидрологических процессов и выявить основные закономерности их формирования в условиях сложного горного рельефа Северного Кавказа.

Сравнительный анализ полученных результатов

Проведенное исследование показало, что комплексный геоинформационный подход обеспечивает более точную оценку зон подтопления по сравнению с методами, основанными только на метеорологических наблюдениях. Учет рельефа, спутниковых данных и особенностей перераспределения поверхностного стока особенно важен для горных районов Северного Кавказа со сложным рельефом. Использование радиолокационных данных Sentinel-1 позволило эффективно выявлять переувлажненные участки независимо от облачности, тогда как данные Sentinel-2 обеспечивали более информативный анализ состояния растительности и поверхностных вод. Наилучшие результаты были получены при совместном использовании радиолокационных и оптических данных. Сравнение с результатами других исследований подтвердило, что основными факторами формирования подтоплений являются уклоны поверхности, морфология речных долин и интенсивность осадков. Дополнительный учет пространственной структуры влажности и локального перераспределения стока позволил повысить точность моделирования. Разработанная ГИС-модель обеспечила общую точность 91–93 %, тогда как модели, использующие только метеорологические параметры, обычно демонстрируют точность 65–75 %. Наиболее заметные преимущества были получены при выявлении локальных зон подтопления в межгорных котловинах и склоновых депрессиях.

Сопоставление результатов с архивными данными МЧС показало высокую достоверность модели. В большинстве случаев прогнозируемые зоны подтопления совпадали с территориями ранее зарегистрированных чрезвычайных ситуаций, а также позволили выявить ряд потенциально опасных участков, ранее не рассматривавшихся как зоны риска.

Установлено, что использование данных с пространственным разрешением 10 м обеспечивает более высокую детализацию зон подтопления, однако требует значительных вычислительных ресурсов при анализе крупных территорий. Разработанный подход позволяет не только определять потенциальные зоны риска, но и анализировать динамику увлажнения во времени, что делает его перспективным инструментом для мониторинга и систем раннего предупреждения чрезвычайных ситуаций.

Выводы

В ходе исследования разработана геоинформационная модель выявления зон подтопления горных территорий Северного Кавказа на основе комплексного использования спутниковых, метеорологических данных и цифровых моделей рельефа. Показано, что ключевыми факторами формирования подтоплений являются интенсивность осадков, морфология рельефа, уклоны поверхности и особенности перераспределения поверхностного стока. Установлено, что наиболее уязвимыми являются пойменные территории, межгорные котловины и участки с малыми уклонами по-

верхности. Северные и северо-западные склоны характеризуются более длительным сохранением переувлажнения по сравнению с южными склонами.

Подтверждена высокая эффективность использования радиолокационных данных Sentinel-1 для мониторинга подтоплений независимо от облачности и времени суток. Дополнительную информацию о состоянии поверхности обеспечивают данные Sentinel-2 и Landsat. Наиболее высокие результаты достигнуты при совместном использовании радиолокационных и оптических данных.

Разработанная модель обеспечила общую точность классификации 91–93 % при значениях коэффициента Карра 0,88–0,90. Сопоставление с архивными данными о паводках подтвердило высокую достоверность полученных результатов и показало преимущества комплексного подхода по сравнению с использованием только метеорологических наблюдений. Установлено, что выпадение более 50–70 мм осадков в сутки приводит к существенному расширению зон переувлажнения и повышению риска подтоплений. Полученные результаты подтверждают перспективность применения геоинформационных технологий для мониторинга опасных гидрологических процессов, территориального планирования, оценки природных рисков и совершенствования систем раннего предупреждения чрезвычайных ситуаций. Разработанный подход может быть адаптирован для других горных регионов, подверженных паводкам и подтоплениям.

Литература

1. Denissova N., Chettykbayev R., Dyomina I., Petrova O., Saparkhojayev N. Integration of space and hydrological data into system of monitoring natural emergencies (Flood Hazards) // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2025. – Vol. 15. No. 14. – Art. No. 8050. DOI: 10.3390/app15148050.
2. Detera B.J.M., Kanno T., Onda K., Tsubouchi K., Kodaka A., Nishino A., Kohtake N. Spatio-temporal analysis of mobile phone and social media data across multiple disaster scenarios: an input to population exposure assessment // *ACM International Conference Proceeding Series*. – 2023. – pp. 1–8. DOI: 10.1145/3606180.3606181.
3. Freire S., Florczyk A., Ferri S. Modeling day- and nighttime population exposure at high resolution: Application to volcanic risk assessment in Campi Flegrei // In: 12th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management (ISCRAM 2015): Conference Proceedings. Kristiansand, Norway.
4. Swain K.C., Singha C., Nayak L. Flood Susceptibility Mapping through the GIS-AHP Technique Using the Cloud // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. – 2020. – Vol. 9. – pp. 720. DOI: 10.3390/ijgi9120720.
5. Gharagozlou A., Diarjan M.H. Environmental planning by using GIS/RS for flood management // In: GI4DM 2010 Conference – Geomatics for Crisis Management. Turin, Italy, 2010. – pp. 16–23.
6. Ismailov N., Chymyrov A., Bekturov A., Karagulov A. GIS Based spatial modelling of snow avalanche hazard along the North-South Alternative Road // *International Journal of Geoinformatics*. – 2023. – Vol. 19. No. 11. – pp. 54–61. DOI: 10.52939/ijg.v19i11.2925.
7. Kasiyanchuk D., Davybida L. Geoinformation Modelling for the Siting of industrial solar power plants considering landslide processes in mountainous areas // *Geodynamics*. – 2025. – Vol. 39. No. 2. – pp. 83–98. DOI: 10.23939/jgd2025.02.083.
8. Kril T., Shekhunova S., Cherevko I. Identification of potentially unstable areas by engineering and geological processes monitoring and heritage building deformations // In: Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (Monitoring 2023): Materials XVII International Scientific Conference. Kiev, Ukraine, 2023. DOI: 10.3997/2214-4609.2023520203.
9. Lemenkova P. Deep Learning methods of satellite image processing for monitoring of flood dynamics in the Ganges Delta, Bangladesh // *Water (Switzerland)*. – 2024. – Vol. 16. No. 8. – Art. No. 1141. DOI: 10.3390/w16081141.

10. Lukyanchuk K.A., Pidkova O.M. Geoinformation modeling of erosion processes in the basins of small rivers (on the example of the river Horynka) // In: Theoretical and Applied Aspects: Materials 20th International Conference on Geoinformatics. Kiev, Ukraine, 2021. DOI: 10.3997/2214-4609.20215521141.
11. Melesse A.M., Rahmati O., Khosravi K., Petropoulos G.P. Remote sensing of soil and land surface processes: monitoring, mapping, and modeling. Amsterdam: Elsevier, 2023. – 449 p. DOI: 10.1016/C2022-0-00222-1.
12. Seyoum W.M., Kwon D., Milewski A. M. Downscaling GRACE TWSA Data into High-Resolution Groundwater Level Anomaly Using Machine Learning-Based Models in a Glacial Aquifer System // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11. – No. 7. – Art. No. 824. DOI: 10.3390/rs11070824.
13. Neposhyvailenko N., Gulyaev V., Gritsan Y., Huba O. Geoinformation modeling of radioactive contamination of territories on the example of mines of the “ShidGSK” mining and processing plant // Biosystems Diversity. – 2024. – Vol. 32. No. 1. – pp. 168–173. DOI: 10.15421/012417.
14. Nikiforov D.V., Mezheva L.A., Kulnev V.V., Lugovskoi A.M., Nikanov A.N., Kizeev A.N., Repina E.M. Public health in radon-affected territories // Human Ecology. – 2019. – No. 1. – pp. 40–50.
15. Pradhan B. Geoinformation techniques in natural hazard modeling: Preface // Geoscience Frontiers. – 2015. – Vol. 6. No. 6. – pp. 791–792. DOI: 10.1016/j.gsf.2014.10.001.
16. Pradhan B., Buchroithner M. Terrigenous mass movements: detection, modelling, early warning and mitigation using geoinformation technology. Berlin: Springer, 2012. – 398 p. DOI: 10.1007/978-3-642-25495-6.
17. Stefano F.D., Chiappini S., Sanita M., Pierdicca R., Malinverni E.S. Geomatics-enabled interdisciplinary approach based on geospatial data processing for hydrogeological risk-analysis // Geomatics and Environmental Engineering. – 2024. – Vol. 18. No. 3. – pp. 63–80. DOI: 10.7494/geom.2024.18.3.63.
18. Struchkova G.P., Nogovitsyn D.D., Kapitonova T.A., Kusatov K.I. Flood forecasting on River Lena during spring high water in area of location of potentially dangerous objects // In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 272. No. 2. – Art. No. 022054. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022054.
19. Yaitskaya N.A., Magaeva A.A. Hydrometeorological Phenomena and multi-hazards: mathematical modelling, decision support systems, geoinformation systems (Review) // Physical Oceanography. – 2022a. – Vol. 29. No. 4. – pp. 347–362. DOI: 10.22449/1573-160X-2022-4-347-362.
20. Yaitskaya N.A., Magaeva A.A. Ensembles of hazardous hydrometeorological phenomena: legal and regulatory aspects, terminology and classification (Review) // Physical Oceanography. – 2022b. – Vol. 29. No. 3. – pp. 237–256. DOI: 10.22449/1573-160X-2022-3-237-256.

References

1. Denisova N., Chettykbayev R., Dyomina I., Petrova O., Saparkhojayev N. Integration of space and hydrological data into system of monitoring natural emergencies (Flood Hazards). Applied Sciences (Switzerland). 2025. Vol. 15. No. 14. Art. No. 8050. DOI: 10.3390/app15148050.
2. Detera B.J.M., Kanno T., Onda K., Tsubouchi K., Kodaka A., Nishino A., Kohtake N. Spatio-temporal analysis of mobile phone and social media data across multiple disaster scenarios: an input to population exposure assessment. ACM International Conference Proceeding Series. 2023. pp. 1–8. DOI: 10.1145/3606180.3606181.
3. Freire S., Florczyk A., Ferri S. Modeling day- and nighttime population exposure at high resolution: Application to volcanic risk assessment in Campi Flegrei. In: 12th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management (ISCRAM 2015): Conference Proceedings. Kristiansand, Norway.
4. Swain K.C., Singha C., Nayak L. Flood Susceptibility Mapping through the GIS-AHP Technique Using the Cloud. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2020. Vol. 9. pp. 720. DOI: 10.3390/ijgi9120720.

5. Gharagozlou A., Diarjan M.H. Environmental planning by using GIS/RS for flood management. In: GI4DM 2010 Conference – Geomatics for Crisis Management. Turin, Italy. 2010. pp. 16–23.
6. Ismailov N., Chymyrov A., Bekturov A., Karagulov A. GIS Based spatial modelling of snow avalanche hazard along the North-South Alternative Road. International Journal of Geoinformatics. 2023. Vol. 19. No. 11. pp. 54–61. DOI: 10.52939/ijg.v19i11.2925.
7. Kasiyanchuk D., Davybid L. Geoinformation Modelling for the Siting of industrial solar power plants considering landslide processes in mountainous areas. Geodynamics. 2025. Vol. 39. No. 2. pp. 83–98. DOI: 10.23939/jgd2025.02.083.
8. Kril T., Shekhunova S., Cherevko I. Identification of potentially unstable areas by engineering and geological processes monitoring and heritage building deformations. In: Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (Monitoring 2023): Materials XVII International Scientific Conference. Kiev, Ukraine. 2023. DOI: 10.3997/2214-4609.2023520203.
9. Lemenkova P. Deep Learning methods of satellite image processing for monitoring of flood dynamics in the Ganges Delta, Bangladesh. Water. 2024. Vol. 16. No. 8. Art. No. 1141. DOI: 10.3390/w16081141.
10. Lukyanchuk K.A., Pidkova O.M. Geoinformation modeling of erosion processes in the basins of small rivers (on the example of the river Horynka). In: Theoretical and Applied Aspects: Materials 20th International Conference on Geoinformatics. Kiev, Ukraine. 2021. DOI: 10.3997/2214-4609.20215521141.
11. Melesse A.M., Rahmati O., Khosravi K., Petropoulos G.P. Remote sensing of soil and land surface processes: monitoring, mapping, and modeling. Amsterdam. Elsevier. 2023. 449 p. DOI: 10.1016/C2022-0-00222-1.
12. Seyoum W.M., Kwon D., Milewski A. M. Downscaling GRACE TWSA Data into High-Resolution Groundwater Level Anomaly Using Machine Learning-Based Models in a Glacial Aquifer System. Remote Sensing. 2019. Vol. 11. No. 7. Art. No. 824. DOI: 10.3390/rs11070824.
13. Neposhyvailenko N., Gulyaev V., Gritsan Y., Huba O. Geoinformation modeling of radioactive contamination of territories on the example of mines of the “ShidGSK” mining and processing plant. Biosystems Diversity. 2024. Vol. 32. No. 1. pp. 168–173. DOI: 10.15421/012417.
14. Nikiforov D.V., Mezheva L.A., Kulnev V.V., Lugovskoi A.M., Nikanov A.N., Kizeev A.N., Repina E.M. Public health in radon-affected territories. Human Ecology. 2019. No. 1. pp. 40–50.
15. Pradhan B. Geoinformation techniques in natural hazard modeling: Preface. Geoscience Frontiers. 2015. Vol. 6. No. 6. pp. 791–792. DOI: 10.1016/j.gsf.2014.10.001.
16. Pradhan B., Buchroithner M. Terrigenous mass movements: detection, modelling, early warning and mitigation using geoinformation technology. Berlin. Springer. 2012. 398 p. DOI: 10.1007/978-3-642-25495-6.
17. Stefano F.D., Chiappini S., Sanita M., Pierdicca R., Malinverni E.S. Geomatics-enabled interdisciplinary approach based on geospatial data processing for hydrogeological risk-analysis. Geomatics and Environmental Engineering. 2024. Vol. 18. No. 3. pp. 63–80. DOI: 10.7494/geom.2024.18.3.63.
18. Struchkova G.P., Nogovitsyn D.D., Kapitonova T.A., Kusatov K.I. Flood forecasting on River Lena during spring high water in area of location of potentially dangerous objects. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 272. No. 2. Art. No. 022054. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022054.
19. Yaitskaya N.A., Magaeva A.A. Hydrometeorological Phenomena and multi-hazards: mathematical modelling, decision support systems, geoinformation systems (Review). Physical Oceanography. 2022a. Vol. 29. No. 4. pp. 347–362. DOI: 10.22449/1573-160X-2022-4-347-362.
20. Yaitskaya N.A., Magaeva A.A. Ensembles of hazardous hydrometeorological phenomena: legal and regulatory aspects, terminology and classification (Review). Physical Oceanography. 2022b. Vol. 29. No. 3. pp. 237–256. DOI: 10.22449/1573-160X-2022-3-237-256.