

## REVIEW OF MODERN GIS-TECHNOLOGIES FOR WATERLOGGING RISK MANAGEMENT, DEVELOPMENT PROSPECTS

A.T. Mukhamejanova<sup>1,2</sup> , D. Kazhimkanuly<sup>1,2\*</sup> , Ye.B. Utegov<sup>1,2</sup> ,  
A.S. Tulebekova<sup>1,2</sup> , S.A. Karaulov<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Solid Research Group, LLP, 010000, Astana, Kazakhstan

<sup>2</sup>L.N. Gumilyov Eurasian National University, 010008, Astana, Kazakhstan

---

**Abstract.** *Waterlogging, a consequence of rising groundwater levels exacerbated by climate change and urbanization, poses a mounting challenge. This review provides an in-depth exploration of contemporary waterlogging risk management strategies, spotlighting the pivotal role of geographic information systems (GIS) and associated technologies. The introduction underscores the problem's gravity, citing its intricate nature and adverse effects on urban settings. The article covers diverse risk mitigation approaches like vertical and horizontal drainage, automated monitoring, and artificial surface elevation. The focal point is on GIS's transformative impact, delving into recent research demonstrating its efficacy in hazard mapping, exposure assessment, vulnerability analysis, and crafting risk management plans. Noteworthy is the use of Landsat 8-9 and Sentinel 1 satellite imagery for monitoring and modeling waterlogging effects. Conclusions stress the integration of multi-criteria analysis and GIS for precise risk mapping. The article advocates innovative techniques like three-dimensional visualization in GIS and enhanced forecasting methods. It underscores the importance of technological advancements for bolstering urban resilience against waterlogging in various scenarios. Future directions involve refining forecasting techniques in a changing climate, integrating artificial intelligence and machine learning for more accurate predictions, and leveraging 3D visualization in GIS for detailed representations. The piece also highlights the potential of IoT-based automated monitoring systems in providing real-time information for proactive responses to potential waterlogging threats.*

**Keywords:** *waterlogging, GIS, risk management, hydrodynamic modeling, spatial analysis.*

---

**\*Corresponding author**

**Dias Kazhimkanuly**, e-mail: [dias27049795@gmail.com](mailto:dias27049795@gmail.com)

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2025.1-10>

Received 27 December 2024; Revised 17 January 2025; Accepted 24 February 2025

## СУ БАСУ ҚАУПІН БАСҚАРУҒА АРНАЛҒАН ЗАМАНАУИ ГАЖ-ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫНА ШОЛУ, ДАМУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

А.Т. Мухамеджанова<sup>1,2</sup> , Д. Қажимқанұлы<sup>1,2\*</sup> , Е.Б. Утепов<sup>1,2</sup> ,  
А.С. Тулебекова<sup>1,2</sup> , С.А. Караулов<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>«Solid Research Group» ЖШС, 010000, Astana, Kazakhstan

<sup>2</sup>Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, 010008, Astana, Kazakhstan

**Аңдатпа.** Климаттың өзгеруі мен урбанизациядан туындаған жер асты суларының деңгейінің жоғарылауының салдары болып табылатын су тасқыны барған сайын күрделі мәселе болып табылады. Бұл шолуда су басу қаупін басқарудың заманауи стратегиялары егжей-тегжейлі қарастырылады, географиялық ақпараттық жүйелердің (ГАЖ) және олармен байланысты технологиялардың негізгі рөлі көрсетілген. Кіріспе мәселенің ауырлығына баса назар аударады, оның күрделі сипаты мен қалалық ортаға теріс әсерін көрсетеді. Мақалада тік және көлденең дренаж, автоматтандырылған бақылау және жасанды бетті көтеру сияқты тәуекелді азайтудың әртүрлі тәсілдері қарастырылады. ГАЖ-ның трансформациялық әсеріне назар аударылады, қауіптерді картаға түсіру, әсерді бағалау, осалдықты талдау және тәуекелдерді басқару жоспарларын әзірлеу кезінде олардың тиімділігін көрсететін соңғы зерттеулер қарастырылады. Су тасқынының әсерін бақылау және модельдеу үшін Landsat 8-9 және Sentinel 1 спутниктік суреттерін пайдалану назар аударарлық. Нәтижелер тәуекелдерді дәл картаға түсіру үшін көп өлшемді талдау мен ГАЖ біріктіру қажеттілігін көрсетеді. Мақала ГАЖ-да үш өлшемді бейнелеу және жетілдірілген болжау әдістері сияқты инновациялық әдістерді қолдануды қолдайды. Ол әртүрлі сценарийлерде қалалардың су тасқынына төзімділігін арттыру үшін технологиялық жетістіктердің маңыздылығын көрсетеді. Болашақ бағыттарға өзгермелі Климаттық болжау әдістерін жетілдіру, дәлірек болжау үшін жасанды интеллект пен машиналық оқытуды біріктіру және егжей-тегжейлі көріністер алу үшін ГАЖ-да 3D бейнелеуді пайдалану кіреді. Сондай-ақ, мақалада су тасқынының ықтимал қауіптеріне алдын-ала әрекет ету үшін нақты уақыт режимінде ақпарат беруде IoT негізіндегі автоматтандырылған бақылау жүйелерінің әлеуеті көрсетілген.

**Түйін сөздер:** су басу, ГАЖ, тәуекелдерді басқару, гидродинамикалық модельдеу, кеңістіктік талдау.

\*Автор-корреспондент

Диас Қажимқанұлы, e-mail: [dias27049795@gmail.com](mailto:dias27049795@gmail.com)

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2025.1-10>

Алынды 27 желтоқсан 2024; Қайта қаралды 17 қаңтар 2025; Қабылданды 24 ақпан 2025

## ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ПОДТОПЛЕНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

А.Т. Мухамеджанова<sup>1,2</sup> , Д. Қажимқанұлы<sup>1,2\*</sup> , Е.Б. Утепов<sup>1,2</sup> ,  
А.С. Тулебекова<sup>1,2</sup> , С.А. Караулов<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>ТОО «Solid Research Group», 010000, Astana, Kazakhstan

<sup>2</sup>Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, 010008, Astana, Kazakhstan

**Аннотация.** Подтопление, являющееся следствием повышения уровня грунтовых вод, усугубляемого изменением климата и урбанизацией, представляет собой все более серьезную проблему. В данном обзоре подробно рассматриваются современные стратегии управления рисками подтопления, подчеркивается ключевая роль географических информационных систем (ГИС) и связанных с ними технологий. Во введении подчеркивается серьезность проблемы, указывается на ее сложный характер и негативное влияние на городскую среду. В статье рассматриваются различные подходы к снижению риска, такие как вертикальный и горизонтальный дренаж, автоматизированный мониторинг и искусственное возвышение поверхности. Основное внимание уделяется преобразующему воздействию ГИС, рассматриваются последние исследования, демонстрирующие их эффективность при составлении карт опасностей, оценке воздействия, анализе уязвимости и разработке планов управления рисками. Заслуживает внимания использование спутниковых снимков Landsat 8-9 и Sentinel 1 для мониторинга и моделирования последствий подтопления. В выводах подчеркивается необходимость интеграции многокритериального анализа и ГИС для точного картирования рисков. Статья выступает за использование инновационных методов, таких как трехмерная визуализация в ГИС и усовершенствованные методы прогнозирования. В ней подчеркивается важность технологических достижений для повышения устойчивости городов к подтоплению в различных сценариях. Будущие направления включают совершенствование методов прогнозирования в условиях меняющегося климата, интеграцию искусственного интеллекта и машинного обучения для более точных прогнозов, а также использование 3D-визуализации в ГИС для получения детальных представлений. В статье также подчеркивается потенциал автоматизированных систем мониторинга на базе IoT в предоставлении информации в режиме реального времени для упреждающего реагирования на потенциальные угрозы подтопления.

**Ключевые слова:** подтопление, ГИС, управление рисками, гидродинамическое моделирование, пространственный анализ.

\*Автор-корреспондент

Диас Қажимқанұлы, e-mail: [dias27049795@gmail.com](mailto:dias27049795@gmail.com)

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2025.1-10>

Поступило 27 декабря 2024; Пересмотрено 17 января 2025.; Принято 24 февраля 2025

### **SOURCE OF FUNDING**

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP22785869).

### **CONFLICT OF INTEREST**

The authors state that there is no conflict of interest.

---

### **ҚАРЖЫЛАНДЫРУ КӨЗІ**

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (грант № AP22785869).

### **МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ**

Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

---

### **ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ**

Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP22785869).

### **КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ**

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

## 1 ВВЕДЕНИЕ

Подтопление – это следствие повышения уровня подземных вод, что может привести к различным негативным последствиям для городских территорий. Это явление может вызвать аварийно-катастрофические, антисанитарно-дискомфортные и экономически убыточные состояния зданий, сооружений, коммуникаций и других элементов инфраструктуры города (Hammond et al., 2013).

Под термином «подтопление городских территорий» понимается явление скопления поверхностных вод, обусловленное недостаточной дренажной способностью городских территорий. Это происходит в случае, когда сток не может быть своевременно ликвидирован из-за продолжительных осадков (Zhang et al., 2020; Tang et al., 2018; Zhang et al., 2018). Подтопление, являясь одним из причин городских наводнений (Hammond et al., 2013), представляет собой ситуацию, при которой интенсивные дожди или кратковременные периоды сильных осадков превышают возможности городской системы водоотведения. В результате возникают катастрофические последствия, связанные с поднятием уровня подземных вод (Xue et al., 2016).

Ввиду глобального изменения климата и быстрого процесса урбанизации, проблема подтопления городских территорий приобретает значительный характер в различных городских регионах мира (Akter et al., 2017; Li, 2012). Этот являющийся следствием сочетания факторов процесс порождает серьезные социально-экологические проблемы, такие как разрушение имущества, ограничение мобильности, загрязнение водных ресурсов и экономические убытки (Quan et al., 2010; Salvadore et al., 2015; Zhang et al., 2016), особенно в стремительно развивающихся странах (Xue et al., 2016).

Причины и источники подтопления на **Рисунке 1** подразделяются на естественные и техногенные (антропогенные), которые могут проявляться по отдельности или комплексно, влияя на застройку по-разному (Sologayev, 2020).

Следовательно, разработка эффективных стратегий по преодолению проблемы подтопления городов становится насущной задачей для правительств и управляющих ливневыми водами городов агентств.

Среди существующих решений для защиты территорий от подтопления можно выделить следующие:

- с использованием вертикального дренажного элемента и горизонтального дренажа гравитационного типа с малонаклонным и ненаклонным дренажом (Romashchenko et al., 2022);

- автоматизированное решение (датчик с автоматической системой мониторинга воды WE, который проверяет и фиксирует уровень воды с помощью камеры) (Laxmi et al., 2022);

- метод прогнозирования территорий, которые могут быть подвержены подтоплению в будущем (может помочь в планировании городов и предотвращении риска подтопления) (Lin et al., 2022);

- искусственное повышение поверхности территории до незатопляемых планировочных отметок (например, создание насыпи под защищаемыми сооружениями) (Makarov et al., 2015; Brown et al., 2019);

- обвалование территории (создание дамб, насыпей или других ограждающих конструкций, которые препятствуют распространению воды) (Romashchenko et al., 2022);

- устройство руслорегулирующих сооружений и сооружений по регулированию и отводу поверхностного стока (Shaad, 2018);

- устройство систематических дренажных систем и локальных дренажей для отвода воды (включая мероприятия по водопонижению) (Gormley et al., 2021);

- устройство противодиффузионных завес и экранов (Kalybekova et al., 2023; Razuvaev et al., 2022);

- защита водонесущих инженерных коммуникаций (при техногенных рисках) (Bremer et al., 2021).

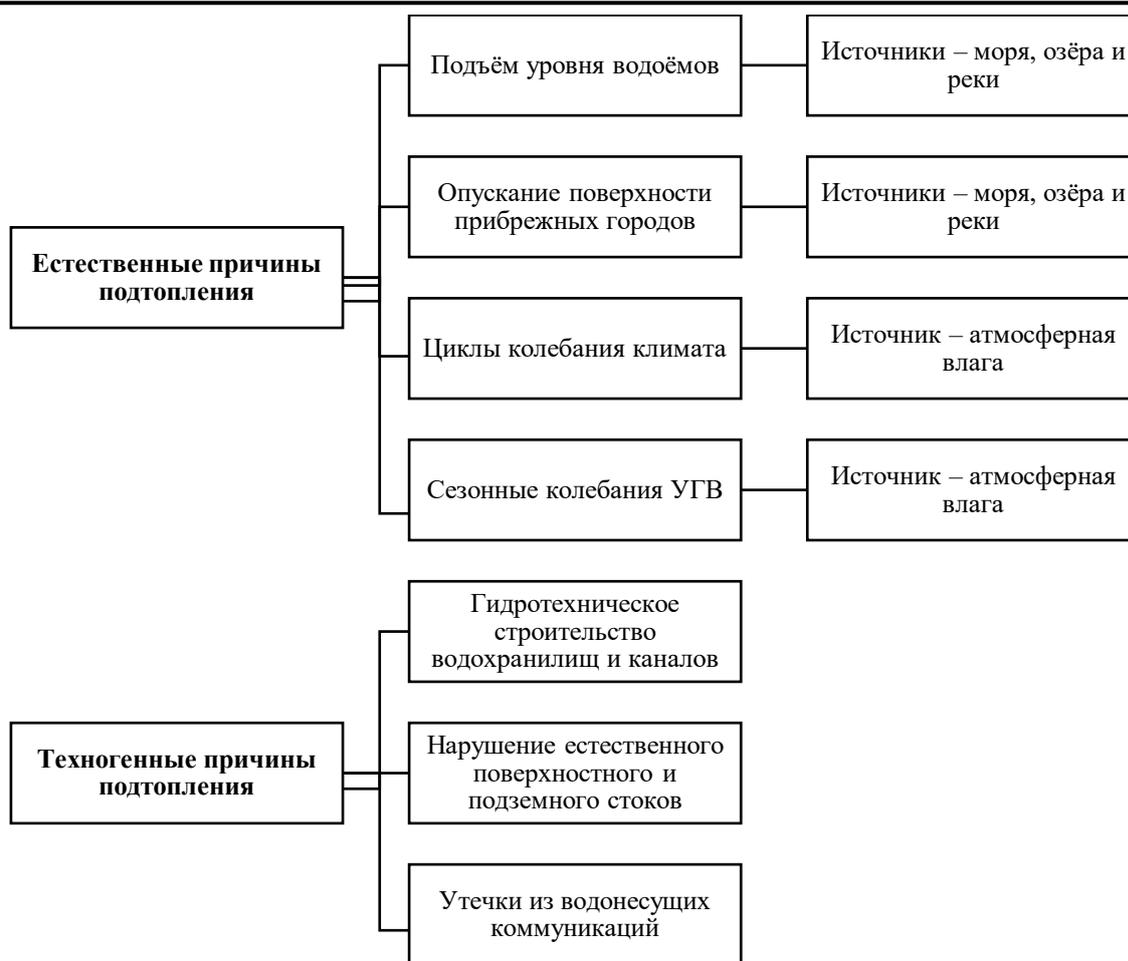


Рисунок 1 – Причины и источники подтопления (Sologayev, 2020)

В последние декады все большее применение обрели Геоинформационные системы (ГИС), способствующие решению различных проблем, имеющих пространственный характер, к которым в том числе относится подтопление. ГИС представляет собой быстрый и эффективный подход к анализу проблем, связанных с подтоплением, а также обеспечивает автоматизацию процедур прогнозирования (Andreev, 2019). Один из способов применения ГИС для предотвращения подтоплений – это использование космических снимков для мониторинга и моделирования уровня паводков вблизи рек, озер, морей, океанов, отслеживание осадков в регионе при помощи специализированных ГИС программ. Основными источниками используемыми спутниковыми снимками для оценки и предотвращения паводковой ситуации могут являться Landsat 8-9 и Sentinel 1, с разрешением от 15 до 30 м/пиксель (Dao & Liou, 2015). Моделирование в специализированной программе дает понимание поведения воды в той или иной местности, также примерного подсчета нанесенного ущерба (Andreev, 2019).

Целью данной работы является раскрытие потенциала применения ГИС в решении проблемы подтопления путем обзора недавних исследований мировой науки и практики. Для обзора подбирались научные статьи экспериментального характера, опубликованные за последние 5 лет в рейтинговых международных журналах.

## 2 ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ГИС ТЕХНОЛОГИИ

В работе (Oumaima et al., 2019) проведено сравнение двух цифровых моделей рельефа (ЦМР): ЦМР ASTER с пространственным разрешением 30 м и ЦМР, полученной на основе стереоскопических снимков Pleiades с разрешением 4 м. С использованием гидравлической

модели (HEC-RAS) и обеих ЦМР были созданы модели и проанализированы зоны затопления для различных периодов возврата. Для оценки обеих ЦМР выбраны различные районы с разными характеристиками: туристические районы с высокой посещаемостью вблизи региональной дороги и сельскохозяйственные районы на аллювиальных террасах, где подвержены воздействию возделываемые поля и инфраструктура. Результаты показывают, что ЦМР с высоким разрешением Pleiades обеспечивает точное картографирование поймы в сложных рельефных условиях, так как она реалистично отображает топографию и позволяет корректно моделировать наблюдаемые уровни воды. Эта работа подчеркивает дополнительную ценность дистанционного зондирования высокого разрешения при моделировании наводнений в регионах с ограниченным объемом данных.

В исследовании ([Affi et al., 2023](#)) применялись методы аналитического иерархического процесса (АИП) и список существенных факторов, влияющих на городские наводнения. Для каждого фактора использовались данные, полученные методами дистанционного зондирования. Количественный анализ с использованием метода АИП был проведен для определения окончательных весов каждого фактора. Пространственный анализ данных при помощи ГИС использовался для выявления различных факторов на карте уязвимости. Результаты показали, что фактор количества осадков имеет наивысшую вероятность наводнения с приоритетным весом 38%, за которым следуют расстояние до ручья (26,3%) и уклон местности (13,4%). Растительный покров-землепользование и высота над уровнем моря оказались менее значимыми с весами 11,5% и 10,8%, соответственно. Разработанная карта уязвимости классифицирует зоны на три уровня риска городских наводнений: высокий, умеренный и низкий. Эта классификация направлена на поддержку принятия решений и подготовку к смягчению последствий наводнений.

В работе ([Natsuaki & Nagai, 2020](#)) применение космического радара с синтезированной апертурой (SAR) для обнаружения наводнений оказалось эффективным инструментом в управлении ликвидацией последствий стихийных бедствий. Точность обнаружения повышается при накоплении наблюдений перед наступлением события, однако использование нескольких режимов наблюдения может привести к недостаточному охвату данных в одном режиме с одной и той же орбиты. Последние исследования в области обнаружения наводнений сосредотачиваются на преимуществах обширного набора наблюдений, выполненных с использованием одной орбиты и в одном и том же режиме перед событием. Однако в этих исследованиях не учитывается потенциальное использование нескольких орбит и режимов. Исследование направлено на анализ влияния изменения орбиты или режима наблюдения перед событием на результаты. Экспериментальные данные показали, что в таких неидеальных условиях существует вероятность упущения зон затопления. Однако точность обнаружения может быть восстановлена путем объединения результатов анализа различных наборов данных, что делает ее сопоставимой с идеальными сценариями.

В рамках исследования ([Alawadi et al., 2023](#)) для анализа изменений на затопленных территориях и в водохранилищах использовались методы дистанционного зондирования, основанные на спектральных индексах. Для этих целей были применены два спектральных индекса: нормализованный разностный индекс воды (NDWI) и нормализованный разностный индекс влажности (NDMI). Связанные с наводнениями неизмеренные потоки в болото были также оценены с использованием водного баланса. Проверка точности определения площади водной поверхности, полученной с использованием индексов дистанционного зондирования, продемонстрировала приемлемый уровень точности, что положительно сказалось на расчетах притока воды. Результаты водного баланса показали, что в течение 5 месяцев после наводнения приток воды в болото составил приблизительно 41,2% от общего объема поступившей воды в данное болото.

В исследовании ([Yang et al., 2023](#)) проведен комплексный анализ опасностей от внезапных обрушений ледниковых озер (GLOF) с использованием многоисточниковых данных дистанционного зондирования. Разработана модель наводнений, учитывающая различные глубины прорыва и объемы выбросов. С использованием оптических изображений

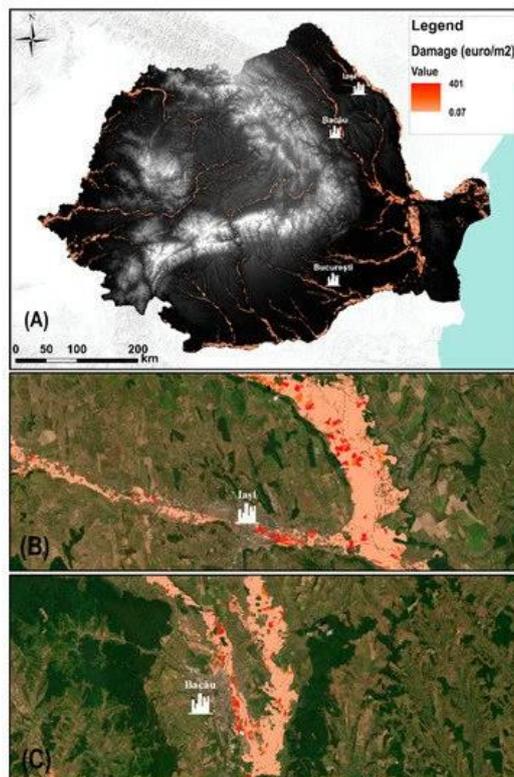
высокого разрешения была определена площадь и объем расширяющихся ледниковых озер. Используя интерферометрический радар с синтезированной апертурой (SBAS-InSAR), отслеживалась скорость деформации и долгосрочные временные ряды деформации в районе плотины озера. Тенденция истончения ледника была выявлена по разнице в ЦМР. Путем объединения топографического уклона и измеряемой деформации были выделены потенциальные источники лавин. Затем было проведено моделирование наводнений для трех различных сценариев с использованием гидродинамической модели HEC-RAS. Полученные результаты свидетельствуют о том, что во всех сценариях река подвергается высокоинтенсивному воздействию GLOF. Увеличение глубины потока и пикового расхода наблюдается при большей глубине прорыва и объеме сброса. В общем, различные методы дистанционного зондирования могут быть применены к другим ледниковым озерам, а моделирование может служить основой для смягчения последствий GLOF.

В исследовательской работе (Annis et al., 2020) выбрали ЦМР LiDAR в качестве эталона для сравнения характеристик беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с национальной ЦМР высокого разрешения (TINITALY) при моделировании топографии водосборной площади для анализа потенциальных наводнений. Различные ЦМР были обработаны для получения исходных данных, используемых в цепочке гидролого-гидравлического моделирования. Эта цепочка включает в себя систему гидрологического моделирования EVA4SUB (Event-Based Approach for Small and Ungauged Basins), основанную на ЦМР, для оценки расчетного гидрографа в неградуированных водосборах, а также двумерную гидравлическую модель FLO-2D для моделирования маршрута паводковых волн и создания карт опасности. В результате проведенного исследования был выполнен количественный анализ, который подтвердил устойчивые характеристики ЦМР, полученных с использованием БПЛА, и поддержал возможность эффективного дистрибутивного моделирования распространения и глубины наводнений.

В исследовании (Muthusamy et al., 2019) предложен комплексный концептуальный подход, основанный на дистанционном зондировании, для усовершенствования текущей оценки масштабов и ущерба от наводнений. В работе использовали ЦМР с высоким разрешением, созданную на основе цифровой модели поверхности и цифровой модели ландшафта. С этой моделью была разработана 2D модель наводнения в программе HEC-RAS (v5) для изучаемой области, учитывая как речные, так и пювиальные наводнения. Откалиброванные модели затем применялись для сравнения ущерба от речных и комбинированных наводнений на различных типах землепользования. Также были сопоставлены количество пострадавших жилых объектов с использованием результатов моделирования и данные, полученные с помощью БПЛА. Авторы утверждают, что это первый случай, когда объединены данные дистанционного зондирования, гидрологического моделирования и информация об ущербе от наводнений на уровне объекта для анализа масштабов и последствий речных и пювиальных наводнений в одном событии. Результаты подчеркивают важность учета пювиальных наводнений, даже если речные паводки являются основной причиной ущерба. Результаты исследований показали, что пювиальные паводки увеличивают количество пострадавших объектов на 25%, а также углубляют затопленные территории, подчеркивая необходимость учета флювиальных наводнений в стратегиях управления рисками. Большая часть данных для этого исследования была получена с использованием методов дистанционного зондирования, включая БПЛА, что подчеркивает важность развития таких систем для улучшения практик оценки масштабов и ущерба от наводнений.

В исследовании (Albano et al., 2020) предлагается бюджетный метод обширного картографирования непосредственного экономического ущерба от наводнений в условиях ограниченности данных. Методика включает три основных этапа: создание карты глубины воды с применением геоморфологического метода, основанного на контролируемой линейной бинарной классификации; формирование карты землепользования на основе многоспектральных спутниковых изображений Landsat 8 с использованием алгоритма

классификации, основанного на машинном обучении; и проведение оценки ущерба от наводнений с использованием ГИС-инструмента, основанного на методе кривых уязвимости (глубина-ущерб). Предложенный комплексный подход был применен на всей территории Румынии за период 100 лет с разрешением 30 метров на [Рисунке 2](#). Результаты показали, что предложенная экономичная модель может эффективно выполнять обширный анализ в условиях ограниченности данных, что особенно важно для оценки риска наводнений. Такой подход может быть полезен при проведении и обновлении оценок риска и управлении им, учитывая временные и пространственные изменения в опасности, подверженности и уязвимости.



**Рисунок 2** – Карта ущерба для (A) Румынии с разрешением 30 м для события со 100-летним периодом возврата и для (B) и (C) двух крупных городов Румынии, пострадавших от прошлых наводнений ([Albano et al., 2020](#))

В исследовании ([Dao & Liou, 2015](#)) представлен объектно-ориентированный подход к картографированию зон наводнений и оценке ущерба. В рамках этого подхода производилась обработка сегментации изображений с оптимальной оценкой масштабных параметров на основе изменений локальных вариаций объектов. Выявление затопленных территорий осуществлялось на основе анализа снимков Landsat 8 с общей точностью более 95% по сравнению с данными, полученными с использованием снимков с более высоким пространственным разрешением. Продукты вегетационного индекса спектрометра MODIS использовались для выделения полей на основе сезонных колебаний между вегетацией и водным индексом в период пересадки. Полученные результаты картографирования наводнений и оценки ущерба рисовым полям представили ценную информацию для местных властей, облегчая управление последствиями наводнений, а также обеспечивая основу для компенсаций и восстановительных мероприятий.

В работе ([Muhammad Amin & Othman, 2018](#)) применялось программное обеспечение InfoWorks RS для проведения моделирования. Собранные данные были переданы в соответствующие процедуры моделирования. Полученные результаты свидетельствуют о способности модели с высокой достоверностью имитировать глубину наводнения и создавать карту паводков. Сформированная карта наводнений может быть полезным инструментом для

местных властей и населения при планировании и проектировании, направленных на минимизацию последствий и ущерба от наводнений.

В результате обзора исследований, посвященных моделированию и оценке риска и масштабов наводнений, выявлены ключевые тенденции, подчеркивающие важность интеграции современных технологий. Выявлено, что использование БПЛА и ЦМР с высоким разрешением улучшает точность оценки риска, а комбинированный подход, включающий данные дистанционного зондирования, гидрологического моделирования и информацию об ущербе, позволяет более полно оценить масштабы наводнений. Геоморфологические и методы машинного обучения демонстрируют потенциал для бюджетного картографирования ущерба. В целом, эти исследования подчеркивают необходимость интеграции новейших ГИС технологий в оценку и управлении рисками наводнений, что способствует эффективному планированию и принятию решений для минимизации последствий.

### 3 СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ

В работе (Luchnikov et al., 2023) был проведен комплекс полевых изысканий с использованием современного геодезического оборудования, включая БПЛА, который применен для создания подробных ЦМР и ортофотопланов населенных пунктов. Полученные данные были использованы в гидродинамическом моделировании процесса половодий с различной степенью обеспеченности. Комбинированные натурные исследования, включая использование БПЛА, обеспечили высококачественные входные данные для разработки и верификации гидродинамической модели участка, а затем для расчета границ зон затопления населенных пунктов. С использованием подробных ортофотопланов были составлены списки жилых объектов, объектов коммунального хозяйства и инфраструктуры, подпадающих под воздействие зон затопления.

(Shugulova et al., 2022) проведено исследование по методике геоинформационного моделирования территорий, подвергающихся периодическим затоплениям в речной долине. Разработана анимационная ГИС-модель затопления объекта исследования, который ежегодно подвергается интенсивным затоплениям. Моделирование сценария проводилось на основе гидрологических данных, информации о поднятии уровня воды в определенный период, а также рельефных данных с использованием инструментов ArcGIS ArcScene на [Рисунке 3](#). Примененные методы включают сравнительно-географический анализ, картографические методы, полевые исследования, и другие ГИС технологии. Исследование включает несколько этапов, в том числе сбор и обобщение аналитических данных о гидрологическом режиме, весеннем половодье, паводковых явлениях, создание ЦМР на основе данных SRTM и разработку прогнозной модели затопления. Полученные результаты могут быть использованы при планировании и реализации мероприятий по предотвращению чрезвычайных ситуаций, связанных с паводковыми явлениями на данной реке.

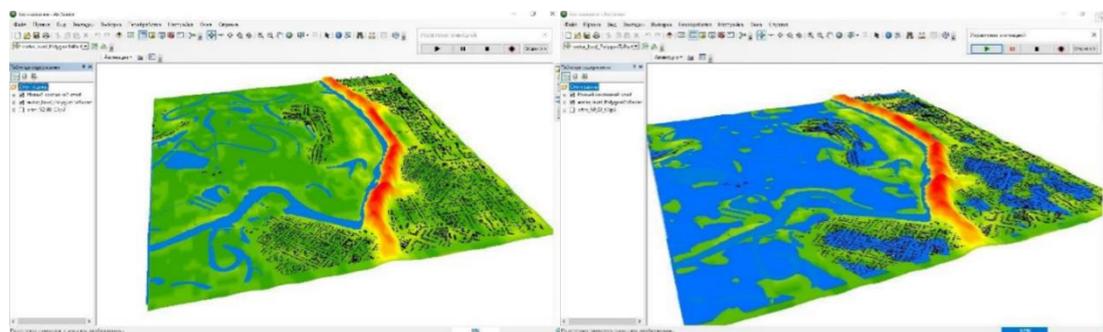


Рисунок 3 – Модель подтопления до и после в ArcScene (Shugulova et al., 2022)

В исследовании (Xie et al., 2022) для определения весов индекса был применен метод взвешенной комплексной оценки (АНР), а диапазон затопления дождевого стока при

различных сценариях ливня был определен с использованием модели формирования стока от Службы охраны почв (SCS) и моделирования пассивного затопления в локальной системе ГИС с равным объемом. Результаты свидетельствуют о том, что при количестве осадков менее 100 мм за 2 часа площадь затопления увеличивается на 3,4 км<sup>2</sup> за каждые 10 мм, а при количестве осадков, превышающем 100 мм за 2 часа, площадь затопления увеличивается на 18 км<sup>2</sup> за каждые 10 мм осадков. Общая площадь зон среднего и высокого риска затопления составляет 441,3 км<sup>2</sup>.

В работе (Andreev, 2019) освещается текущее положение и перспективы применения геоинформационных технологий (ГИС-технологии, ГИС-пакеты) с использованием картографического подхода для прогнозирования и моделирования одной из наиболее актуальных проблем в области экологии и чрезвычайных ситуаций. Анализируются текущие масштабы использования ГИС-технологий и этапы разработки единой корпоративной информационной системы для водных объектов и водного хозяйства. Подробно описываются компоненты ГИС-пакета, используемой для прогнозирования наводнений, а также инструменты ГИС-технологий, предназначенные для решения прогностических задач, таких как аппаратно-программные комплексы, обеспечивающие сбор, обработку, отображение и распространение пространственно-координированных данных. Выделены преимущества ГИС-технологий при создании моделей затопленных областей, включая их простоту использования и возможность моделирования движения воды и его последствий в конкретных сценариях (например, в зависимости от погодных условий). Также обсуждается текущий недостаток большинства ГИС-пакетов, такой как ограниченная информативность картографических данных моделирования, представленных в двумерном пространстве. В связи с этим авторами предлагается использование 3D визуализации с применением программных средств ArcGIS для получения более точного и детального представления о затопленных территориях.

Из проведенного обзора исследований в области моделирования с использованием геоинформационных технологий выделяются несколько общих тенденций. Во-первых, использование современных геодезических методов, включая беспилотные летательные аппараты (БПЛА), и создание подробных цифровых моделей рельефа позволяют более точно оценивать гидродинамические процессы и разрабатывать эффективные стратегии управления рисками в зонах затопления. Во-вторых, применение геоинформационного моделирования и анализа данных в сочетании с гидрологическими моделями способствует более точному выявлению уязвимых территорий и предоставляет ценные инструменты для принятия решений в области предотвращения чрезвычайных ситуаций. Наконец, перспективы использования трехмерной визуализации, особенно в контексте программных средств ArcGIS, предоставляют возможность получения более детального представления о затопленных областях. В целом, эти подходы и инструменты могут значительно улучшить эффективность и точность прогнозирования и управления рисками наводнений в различных сценариях.

В работе (Duan et al., 2022) предлагается метод оценки риска подтопления городов, который объединяет многокритериальный анализ решений (МКАР) и ГИС. Система оценки риска подтопления городов включает четыре основных компонента: опасность, подверженность, уязвимость и возможность экстренного реагирования и восстановления. Аналитический процесс иерархии (АНР) представляет собой широко используемый метод МКАР, применяемый для вычисления весов и создания карт результатов опасности, подверженности, уязвимости, а также способности к чрезвычайному реагированию и восстановлению. В соответствии с принципами оценки риска при стихийных бедствиях, в данном исследовании было учтено 18 параметров, включая пространственные и атрибутивные данные. Результаты моделирования были сопоставлены с зарегистрированными точками подтопления, и они указывают на более высокую надежность данной модели.

В работе (Jun, 2019) была разработана модель оценки индекса риска подтопления в городах с использованием пространственного анализа в ArcGIS. При комплексной оценке риска и проведении региональных исследований вес каждого индекса риска определяется с

применением АНР, а нечеткая оценка применяется к растровыми данным индекса риска в ГИС. Это позволило эффективно управлять данными индекса риска, объединяя пространственный анализ с визуальным представлением. Полученные результаты классификации и регионализации оценки риска предоставляют техническую поддержку и информацию для принятия решений в предотвращении риска подтопления городов, а также в разработке планов снижения риска стихийных бедствий.

В исследовании (Roy et al., 2021) проведено первоначальное полевое исследование с целью создания инвентаризационной карты зон подтопления. В процессе использовались семнадцать дополнительных параметров, включая пространственные и атрибутивные данные из вторичных источников. Целью было определение уровня опасности подтопления, уязвимости к данному явлению и составление карты рисков с применением интегрированного АНР и методов, представленных ГИС. Результаты тестирования решения выявили, что приблизительно 46% территории исследуемого объекта подпадают под высокий и очень высокий риск подтопления, а 38% территории является очень уязвимым к данному явлению. Составленная карта рисков показывает, что примерно 35% исследуемой территории подвержена угрозе подтопления, преимущественно в центральной части объекта. Достигнутая точность составила 78,2%. Общая стратегия данного исследования может быть применена в планировании и смягчении последствий с целью уменьшения числа случаев подтоплений в будущем в различных регионах мира.

Из представленных исследований в области оценки риска подтопления городов с использованием геоинформационных технологий выделяется тенденция к комбинированию МКАР и ГИС. Применение АНР для расчета весов и создания карт результатов опасности, подверженности, уязвимости, а также способности к чрезвычайному реагированию и восстановлению демонстрирует эффективное использование технологий для оценки рисков стихийных бедствий. Исследования также подчеркивают значимость интеграции пространственного анализа и визуализации данных с целью предоставления более точной и наглядной информации для принятия решений в области управления рисками подтопления городов. Подходы, основанные на интегрированных методах оценки, могут эффективно служить основой для разработки планов снижения рисков и предотвращения чрезвычайных ситуаций в различных городских регионах мира.

## 5 ВЫВОДЫ

Интеграция передовых геоинформационных технологий, включая беспилотные летательные аппараты и гидродинамические модели, существенно повышает эффективность оценки и управления рисками подтоплений, обеспечивая точные данные для разработки стратегий предотвращения и смягчения их последствий.

Многокритериальный анализ решений (МКАР) в сочетании с геоинформационными системами (ГИС) успешно применяются при оценке риска подтопления городов, позволяя проводить комплексные оценки опасности, подверженности, уязвимости и возможности экстренного реагирования, что повышает точность и достоверность моделей.

Применение методов анализа и оценки риска подтоплений с использованием ГИС-технологий требует интеграции данных о гидродинамике, геодезии и метеорологии, что подчеркивает важность развития комплексных методологий для улучшения стратегий управления и минимизации воздействия стихийных бедствий.

В свете динамичных климатических изменений и увеличивающейся угрозы подтоплений, будущее развитие методов оценки и управления рисками должно активно включать в себя прогностические модели, использующие современные технологии и искусственный интеллект, чтобы эффективно предсказывать и минимизировать последствия наводнений в различных экосистемах и населенных территориях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hammond, M. J., Chen, A. S., Djordjević, S., Butler, D., & Mark, O.** (2013). Urban flood impact assessment: A state-of-the-art review. *Urban Water Journal*, 12(1), 14–29. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.857421>
2. **Zhang, Q., Wu, Z., Zhang, H., Dalla Fontana, G., & Tarolli, P.** (2020). Identifying dominant factors of waterlogging events in metropolitan coastal cities: The case study of Guangzhou, China. *Journal of Environmental Management*, 271, 110951. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110951>
3. **Tang, X., Shu, Y., Lian, Y., Zhao, Y., & Fu, Y.** (2018). A spatial assessment of urban waterlogging risk based on a Weighted Naïve Bayes classifier. *Science of The Total Environment*, 630, 264–274. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.172>
4. **Zhang, H., Cheng, J., Wu, Z., Li, C., Qin, J., & Liu, T.** (2018). Effects of Impervious Surface on the Spatial Distribution of Urban Waterlogging Risk Spots at Multiple Scales in Guangzhou, South China. *Sustainability*, 10(5), 1589. <https://doi.org/10.3390/su10051589>
5. **Xue, F., Huang, M., Wang, W., & Zou, L.** (2016). Numerical Simulation of Urban Waterlogging Based on FloodArea Model. *Advances in Meteorology*, 2016, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2016/3940707>
6. **Akter, A., Mohit, S. A., & Chowdhury, M. A. H.** (2017). Predicting urban storm water-logging for Chittagong city in Bangladesh. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(1), 238–249. <https://doi.org/10.1016/j.ijse.2017.01.005>
7. **Li, C.** (2012). Ecohydrology and good urban design for urban storm water-logging in Beijing, China. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 12(4), 287–300. <https://doi.org/10.2478/v10104-012-0029-8>
8. **Quan, R.-S., Liu, M., Lu, M., Zhang, L.-J., Wang, J.-J., & Xu, S.-Y.** (2010). Waterlogging risk assessment based on land use/cover change: a case study in Pudong New Area, Shanghai. *Environmental Earth Sciences*, 61(6), 1113–1121. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0431-8>
9. **Salvadore, E., Bronders, J., & Batelaan, O.** (2015). Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. *Journal of Hydrology*, 529, 62–81. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.028>
10. **Zhang, L., Yang, Z., Voinov, A., & Gao, S.** (2016). Nature-inspired stormwater management practice: The ecological wisdom underlying the Tuanchen drainage system in Beijing, China and its contemporary relevance. *Landscape and Urban Planning*, 155, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.06.015>
11. **Sologayev, V.** (2020). Protection against waterlogging in urban construction. Training manual. OMSK: SibADI
12. **Romashchenko, M., Savchuk, D., Shevchenko, A., Babitska, O., Kharlamov, O., & Kotykovych, I.** (2022). Protection of territories from waterlogging in the zone of the North Crimean Canal of Kherson region and ways to improve it. *Land Reclamation and Water Management*, (2), 65 - 74. <https://doi.org/10.31073/mivg202202-342>
13. **Laxmi, B. P., Jasmine, R. R., Vignesh, S., Rohith, K., & Bharath, V.** (2022). Automated solution for waterlogging problem. *International Journal of Health Sciences*, 6(S4), 4147–4154. <https://doi.org/10.53730/ijhs.v6nS4.9057>
14. **Lin, J., He, P., Yang, L., He, X., Lu, S., & Liu, D.** (2022). Predicting future urban waterlogging-prone areas by coupling the maximum entropy and FLUS model. *Sustainable Cities and Society*, 80, 103812. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103812>
15. **Makarov, A., Mihailova, A., Arefiev, N., Pavlov, S., Chashchina, T., Terleev, V., & Badenko, V.** (2015). Country Area Territory Protection from Flooding; Construction Conditions, Problem Definition and Solution. *Procedia Engineering*, 117, 225–231. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.153>
16. **Brown, S., Wadey, M. P., Nicholls, R. J., Shareef, A., Khaleel, Z., Hinkel, J., & McCabe, M. V.** (2019). Land raising as a solution to sea-level rise: An analysis of coastal flooding on an artificial island in the Maldives. *Journal of Flood Risk Management*, 13(S1), e12567.

- <https://doi.org/10.1111/jfr3.12567>
17. **Shaad, K.** (2018). Evolution of river-routing schemes in macro-scale models and their potential for watershed management. *Hydrological Sciences Journal*, 63(7), 1062–1077. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1473871>
  18. **Gormley, M., Kelly, D., Campbell, D., Xue, Y., & Stewart, C.** (2021). Building Drainage System Design for Tall Buildings: Current Limitations and Public Health Implications. *Buildings*, 11(2), 70. <https://doi.org/10.3390/buildings11020070>
  19. **Kalybekova, Y., Zhu, K., Nurlan, B., Seytassanov, I., Ishangaliyev, T., Yermek, A., Ismailova, G., Kurmanbek, Z., Issakov, Y., & Dávid, L.D.** (2023). Minimizing seepage in irrigation canals in land reclamation systems via an innovative technology. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1223645. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1223645>
  20. **Razuvaev, D.A., Chakhlov, M.G., Soloviova, V.Y., & Karpachevsky, G.V.** (2022). Injection Compositions for Creating Impervious Screen for Roadbed Foundation. *Transportation Research Procedia*, 61, 621-626. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.100>
  21. **Bremer, L. L., DeMaagd, N., Wada, C. A., & Burnett, K. M.** (2021). Priority watershed management areas for groundwater recharge and drinking water protection: A case study from Hawai'i Island. *Journal of Environmental Management*, 286, 111622. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111622>
  22. **Andreev, D.V.** (2019). Application of GIS technologies to determine flooding in the Republic of Sakha (Yakutia). *Advances in Current Natural Sciences*, 11, 43-47. <https://doi.org/10.17513/use.37238> (In Russ.).
  23. **Dao, P., & Liou, Y.-A.** (2015). Object-Based Flood Mapping and Affected Rice Field Estimation with Landsat 8 OLI and MODIS Data. *Remote Sensing*, 7(5), 5077–5097. <https://doi.org/10.3390/rs70505077>
  24. **Oumaima, B., Yves, T., El Mehdi, S. M., Simon, G., & Frederic, L.** (2019). Flood Hazard Mapping Using Two Digital Elevation Models: Application in a Semi-Arid Environment of Morocco. *European Scientific Journal*, ESJ, 15(33), 338. <https://doi.org/10.19044/esj.2019.v15n33p338>
  25. **Affi, M., Wahaab, R.A., Khalifa, A., Moukhtar, I., & Elalfy, E.** (2023). Assessment of Anticipatory Approach Using the Integration of GIS, and Remote Sensing Techniques for Flood Management in Alexandria City, Egypt. *Civil Engineering and Architecture*, 11(3), 1439-1453. <https://doi.org/10.13189/cea.2023.110326>
  26. **Natsuaki, R., Nagai, H.** (2020). Synthetic Aperture Radar Flood Detection under Multiple Modes and Multiple Orbit Conditions: A Case Study in Japan on Typhoon Hagibis, 2019. *Remote Sensing*, 12(6), 903. <https://doi.org/10.3390/rs12060903>
  27. **Alawadi, W., Raheem, Z.A., Yaseen, D.A.** (2023). Use of Remote Sensing Techniques to Assess Water Storage Variations and Flood-Related Inflows for the Hawizeh Wetland. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2748808/v1>
  28. **Yang, L., Lu, Z., Ouyang, C., Zhao, C., Hu, X., & Zhang, Q.** (2023). Glacial Lake Outburst Flood Monitoring and Modeling through Integrating Multiple Remote Sensing Methods and HEC-RAS. *Remote Sensing*, 15(22), 5327. <https://doi.org/10.3390/rs15225327>
  29. **Annis, A., Nardi, F., Petroselli, A., Apollonio, C., Arcangeletti, E., Tauro, F., & Grimaldi, S.** (2020). UAV-DEMs for Small-Scale Flood Hazard Mapping. *Water*, 12(6), 1717. <https://doi.org/10.3390/w12061717>
  30. **Albano, R., Samela, C., Crăciun, I., Manfreda, S., Adamowski, J., Sole, A., & Ozunu, A.** (2020). Large Scale Flood Risk Mapping in Data Scarce Environments: An Application for Romania. *Water*, 12(6), 1834. <https://doi.org/10.3390/w12061834>
  31. **Muthusamy, M., Rivas Casado, M., Salmoral, G., Irvine, T., & Leinster, P.** (2019). A Remote Sensing Based Integrated Approach to Quantify the Impact of Fluvial and Pluvial Flooding in an Urban Catchment. *Remote Sensing*, 11(5), 577. <https://doi.org/10.3390/rs11050577>
  32. **Muhammad Amin, N.F., Othman, F.** (2018). Generation of Flood Map Using Infoworks for Sungai Johor. *International Journal of Integrated Engineering*, 10(2), 142-145.

<https://doi.org/10.30880/ijie.2018.10.02.026>

33. **Luchnikov, A.I., Goldobin, N.A., Lepeshkin, S.A.** (2023). Experience of comprehensive field studies with the use of UAVS in solving tasks for the assessment of flood zones of settlements (on the example of the Pechora River). Water sector of Russia: problems, technologies, management, Water resources, water bodies, 2, 69-89. [https://doi.org/10.35567/19994508\\_2023\\_2\\_4](https://doi.org/10.35567/19994508_2023_2_4) (In Russ.).
34. **Shugulova, D.K., Mazhitova, G.Z., Dzhanelieva, K.M.** (2022). Determination of flooded areas using gis modeling of hydrological processes. Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Chemistry. Geography. Ecology Series, 139(2), 72-79. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2022-139-2-72-79> (In Russ.).
35. **Xie, S., Liu, W., Yuan, Z., Zhang, H., Lin, H., & Wang, Y.** (2022). Integrated Risk Assessment of Waterlogging in Guangzhou Based on Runoff Modeling, AHP, GIS and Scenario Analysis. Water, 14(18), 2899. <https://doi.org/10.3390/w14182899>
36. **Duan, C., Zhang, J., Chen, Y., Lang, Q., Zhang, Y., Wu, C., & Zhang, Z.** (2022). Comprehensive Risk Assessment of Urban Waterlogging Disaster Based on MCDA-GIS Integration: The Case Study of Changchun, China. Remote Sensing, 14(13), 3101. <https://doi.org/10.3390/rs14133101>
37. **Jun, S.** (2019). Risk Assessment of Urban Waterlogging Based on GIS. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 376, 012034. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/376/1/012034>
38. **Roy, S., Bose, A., Singha, N., Basak, D., & Chowdhury, I. R.** (2021). Urban waterlogging risk as an undervalued environmental challenge: An Integrated MCDA-GIS based modeling approach. Environmental Challenges, 4, 100194. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100194>