

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра геоморфологии и геоэкологии

**Оценка риска затопления урбанизированных территорий методами
геоинформационного и гидрологического моделирования (на примере
реки Аткара в г. Аткарске)**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 431 группы

направления 05.03.03 Картография и геоинформатика

географического факультета

Моисеева Дениса Сергеевича

Научный руководитель
старший преподаватель

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

В.А. Морозова

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

к.с-х.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

В.А. Гусев

инициалы, фамилия

Саратов 2025

Введение. Наводнения остаются одним из наиболее разрушительных природных явлений. Они наносят серьёзный ущерб инфраструктуре, жилому фонду, сельскому хозяйству и представляют угрозу жизни населения. По данным МЧС России, ежегодно в стране затопливаются десятки населённых пунктов, в том числе и в пределах Саратовской области.

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью разработки современных и достоверных инструментов мониторинга затоплений, особенно на урбанизированных территориях.

Несмотря на наличие наблюдательных данных и теоретических основ, информация о рисках затопления в пределах Саратовской области, как правило, разрознена, представлена в различных форматах и не охватывает всей совокупности пространственных факторов. Это затрудняет принятие решений в сфере планирования, проектирования и реагирования на чрезвычайные ситуации.

Целью выпускной квалификационной работы является оценка риска затопления территории города Аткарска при половодье обеспеченностью 1% и 25% с использованием геоинформационных технологий.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- Изучить гидрологические особенности территории Саратовской области и города Аткарска;
- Собрать и систематизировать пространственные данные, включая цифровые модели рельефа и данные наблюдений по гидропостам;
- Построить цифровую модель рельефа и водосборного бассейна для гидропоста города Аткарска;
- Смоделировать зоны затопления с использованием различных программных комплексов и технологий.
- Провести оценку риска и потенциального материального ущерба в пределах застроенной территории и его окрестностей.

Основное содержание работы.

1 Речные объекты и их режим

Гидрологический режим рек представляет собой совокупность закономерных изменений стока, уровня воды, скорости течения и уклона русла, происходящих во времени и пространстве. Основным показателем водного режима служит водность — объём воды, переносимый рекой, в отличие от водоносности, характеризующей среднегодовой сток и определяющей водный потенциал бассейна [1]. Колебания водности могут быть многолетними, сезонными и кратковременными, формируясь под влиянием климатических, атмосферных и геоморфологических факторов. Существенное влияние на гидрологический режим оказывают паводки, обусловленные дождевыми ливнями, и половодья — продолжительные периоды весеннего подъёма воды вследствие таяния снега.

Ключевыми параметрами режима являются уровень воды и расход. Между ними существует устойчивая, хотя и нелинейная зависимость, фиксируемая на гидропостах. Расход воды определяется как произведение площади живого сечения и средней скорости потока. Измерения проводятся объёмным, гидравлическим, индикаторным или гидрометрическим методами, последний из которых наиболее широко используется в натурных условиях.

Формирование стока связано с типом питания реки. Поверхностное питание может быть дождевым, снеговым или ледниковым; подземное осуществляется за счёт выхода грунтовых вод. На практике питание чаще всего смешанное: весной преобладает снеговое, летом — дождевое, зимой — подземное. Тип питания определяет устойчивость водного режима, динамику стока и вероятность экстремальных ситуаций [2].

Наводнения — наиболее опасные проявления неустойчивости водного режима. Они возникают в результате интенсивного таяния снега, проливных дождей, зажоров и заторов, прорыва плотин, ветровых нагонов или селевых потоков. Классификация наводнений учитывает их частотность (от малых до катастрофических) и происхождение (половодье, паводок, ледовые и ветровые явления) [3]. Степень затопления зависит от рельефа, высоты паводка, времени

года и плотности застройки. Последствия включают разрушение инфраструктуры, угрозу жизни и ущерб экосистемам [4].

В Саратовской области, расположенной в Среднем Поволжье, половодья и паводки являются регулярными сезонными явлениями. Наиболее подвержены затоплению бассейны рек Хопёр, Медведица, Иргиз и их притоки — в том числе Аткара, Идолга, Карамыш, Терса и Баланда. Затопляемые территории относятся к зонам с особыми условиями использования и подлежат обязательному учёту в градостроительном планировании [5].

Помимо поверхностных разливов, регион испытывает угрозу подтоплений, вызванных подъёмом уровня грунтовых вод. Это ведёт к переувлажнению почв, разрушению фундаментов, ухудшению санитарных условий. Степень подтопления зависит от глубины вод и дренажных условий территории [6]. Особенно уязвимыми являются бассейны рек Малый и Большой Узень, где паводки могут вызывать быстрый выход воды из берегов, разрушение берегов и транспортных связей. В связи с этим важно развивать системы мониторинга, оповещения и инженерной защиты.

2 Геоинформационные методы для гидрологического моделирования

Гидрологическое моделирование представляет собой совокупность методов, направленных на количественное описание водных процессов в природных системах. В его основе лежит водный баланс, включающий приток, отток и изменение запасов воды в рассматриваемом участке. Такие модели позволяют анализировать формирование и распределение стока, испарение, инфильтрацию, а также влияние природных и антропогенных факторов. Особенно актуально моделирование в задачах прогнозирования паводков, оценки затоплений и управления водными ресурсами. В данном исследовании моделирование реализовано на основе цифровой модели рельефа (ЦМР), что позволяет точно определить границы водосборных бассейнов, направления поверхностного стока и зоны аккумуляции, а также построить сценарии затоплений с учётом метеорологических и почвенных характеристик [7].

Существуют разные подходы к классификации гидрологических моделей. По методу построения они делятся на эмпирические (основанные на статистических зависимостях), физические (используют уравнения движения жидкости) и концептуальные (упрощённо описывают основные процессы). По способу описания — на детерминистские (устойчиво повторяющиеся при одних и тех же условиях), стохастические (учитывающие случайность) и гибридные. Пространственно модели бывают цельными (для всего бассейна) или распределёнными, как, например, SWAT и MIKE SHE, где территория делится на ячейки. Также различают непрерывные модели, описывающие длительные процессы, и одномоментные — для анализа конкретных событий. По масштабу они делятся на глобальные (например, WaterGAP) и локальные, используемые для анализа отдельных городов или водотоков [8, 9].

Совмещение моделирования с геоинформационными системами (ГИС) значительно повышает точность и эффективность анализа. С помощью ГИС можно учитывать рельеф, почвенно-растительный покров, плотность застройки, формировать цифровые модели высот и визуализировать результаты в виде тематических карт. Это особенно важно при оценке риска затопления урбанизированных территорий, где ошибки в высоте и уклоне могут существенно изменить зоны потенциального воздействия [8].

Для решения поставленных задач применён комплекс программных средств. QGIS, как открытая ГИС-платформа, использовалась для создания и обработки ЦМР, выделения водосборных бассейнов и построения направлений стока. В ArcGIS были использованы модули ArcHydro и HEC GeoRAS для моделирования гидрографической сети и русловых процессов. В Global Mapper выполнена визуализация сценариев затопления с помощью инструмента имитации подъёма уровня воды. Программный пакет HEC RAS применялся для расчёта гидравлических характеристик потоков, определения глубин и скоростей затопления [10–13].

Процесс моделирования включал сбор и предобработку входных данных (осадки, рельеф, свойства почв и покрытий), построение направлений стока,

выделение бассейнов, выбор подходящей модели, симуляцию паводковых процессов и калибровку результатов. Финальным этапом стало визуальное представление данных в виде цифровых карт зон затопления, градиентов стока, профилей уклона и потенциальных рисков. Интеграция ГИС и моделирования обеспечивает наглядное отображение угроз и позволяет применять результаты в градостроительном планировании, защите от наводнений и страховании [14].

3 Использование геоинформационных технологий для оценки риска затопления г. Аткарск на реке Аткара

Оценка риска затопления территории г. Аткарск выполнена с использованием цифровых и геоинформационных методов, позволивших интегрировать пространственные характеристики рельефа, плотность застройки, гидрологические параметры и экономические данные. Основой моделирования послужила цифровая модель рельефа FabDEM с разрешением 30 м, обладающая высокой точностью в пределах городской территории. Модель была интегрирована в среду QGIS, приведена к единой системе координат и предварительно обработана: устранены локальные депрессии, выровнены артефакты, проведено сглаживание поверхности. Далее в Global Mapper выполнено гидрологическое упрощение и расчёты, связанные с направлением стока, аккумуляцией воды и выделением водосборных контуров [15].

С применением алгоритма D8 построена карта направлений стока, на которой отображены линии наиболее вероятного перемещения поверхностных вод. Установлено, что преобладающее направление стока — с северо-запада на юго-восток, что согласуется с уклоном территории в сторону реки Аткара. Далее построена карта аккумуляции стока (Flow Accumulation), по которой выделены зоны, где происходит наибольшее накопление воды — они совпадают с понижениями в районах улиц Заречной, Набережной и Советской. С помощью инструмента Watershed проведена расчётная генерация локальных водосборных бассейнов — преимущественно в пределах правого берега Аткара.

Параллельно был проведён морфометрический анализ территории, включающий расчёт уклонов, экспозиций склонов и высот. Было установлено,

что более 60% площади городской застройки располагается на участках с уклонами менее 1° , что способствует задержке воды и увеличивает риск подтоплений в случае выхода воды из берегов. Наиболее опасными признаны участки с уклоном менее 0.5° и высотой до 180 м. Эти параметры создают предпосылки для образования застойных зон, где даже при незначительном повышении уровня воды возможны локальные разливы.

Для визуализации вертикальной структуры рельефа дополнительно использовалась программа AutoCAD. Из цифровой модели рельефа были извлечены высотные точки вдоль условного русла реки Аткара, а затем построен продольный профиль. Он позволил наглядно представить, как меняется отметка поверхности от верховьев к устью и где вероятнее всего происходит накопление воды. Профиль отражает плавный перепад с резкими понижениями в районе городской черты, что подтверждает выделенные ранее зоны риска. На основе этого профиля были построены графики градиента и скорости изменения уклонов, дополнительно уточнившие потенциальные зоны опасности.

Использование AutoCAD на этапе построения продольного профиля дало возможность более точно соотнести карту рельефа с объектами на местности. Графики, построенные по профилю, использовались для проверки расчётных данных в QGIS и выявления несоответствий. В частности, сопоставление профиля с картой аккумуляции подтвердило, что основные перепады и впадины совпадают с зонами повышенного накопления воды, особенно в пределах городской территории.

На основе построенной цифровой модели рельефа FabDEM в программе Global Mapper было выполнено моделирование зон затопления территории города Аткарск. Использован инструмент симуляции подъёма уровня воды (Simulate Water Level Rise/Flooding), позволяющий визуализировать распространение паводковых вод с учётом микрорельефа. Для оценки риска были заданы два сценария: редкое наводнение с обеспеченностью 1% и более частое — с обеспеченностью 25%. Эти значения выбраны в соответствии с гидрологической статистикой как типовые для инженерных расчётов: 1%

соответствует экстремальным условиям, применяемым при проектировании защитных сооружений, а 25% — отражает наиболее вероятные паводки.

При сценарии с обеспеченностью 1% смоделированная площадь затопления составила около 7,3 км². Зона охватывает левобережные и правобережные пойменные участки, включая жилую застройку, элементы улично-дорожной сети, участки с индивидуальными жилыми домами и прилегающую территорию хозяйственного назначения. При 25% обеспеченности площадь затопления составила 4,2 км², в основном сосредоточенная в непосредственной близости от русла Аткары. Таким образом, даже при относительно частых паводках значительная часть жилой зоны оказывается в пределах угрозы подтопления.

Для оценки точности расчётов и проверки надёжности результатов проведён сравнительный анализ на основе трёх разных цифровых моделей рельефа: FabDEM, SRTM 30 м и данных НСПД. Модель SRTM, несмотря на сходное разрешение, показала завышенные значения площадей затопления. Это объясняется сглаженным характером рельефа и отсутствием локальных впадин, что приводит к более свободному распространению воды в расчётах. Напротив, данные НСПД, сформированные по усреднённым значениям и историческим наблюдениям, показали заниженные площади. Они не учитывают современные особенности застройки, локальный уклон, искусственные сооружения и выровненные участки [16, 17].

Наиболее достоверную и устойчивую картину дало моделирование на основе FabDEM, так как оно более точно отражает микрорельеф, учитывая даже небольшие уклонные колебания. Особенно это проявилось в пределах городской черты, где перепады высот составляют 2–4 м и напрямую влияют на направление движения паводковых вод. Именно на основе FabDEM были построены итоговые границы затопления, легшие в основу последующей оценки ущерба и уязвимости.

Совмещение результатов моделирования с данными кадастровых планов, плотности застройки и функционального назначения объектов позволило

выделить районы наибольшего риска. К ним отнесены прибрежные кварталы, в том числе улицы Заречная, Набережная, Советская, Гагарина и Чапаева. Здесь наблюдается высокая плотность малоэтажной застройки и близость к урезу воды, что делает эти районы критически уязвимыми при даже незначительном повышении уровня воды. Моделирование подтвердило, что именно в этих районах скопление воды происходит в первую очередь.

Таким образом, расчётные сценарии позволяют оценить не только степень угрозы, но и потенциальную глубину распространения паводковых вод, варьирующуюся от 0,5 до 1,8 м в зависимости от участка. Модели FabDEM и визуализация в Global Mapper позволили детализировать картину распределения зон затопления по территории города и стали основой для дальнейшей оценки ущерба.

На основе полученных контуров затопления проведена оценка потенциального экономического ущерба. Для расчёта использовались кадастровые данные, сведения о плотности застройки и нормативные коэффициенты повреждаемости объектов. При сценарии 1% обеспеченности (по модели FabDEM) суммарный прогнозируемый ущерб составил 1928,1 млн рублей. Основную часть убытков составили повреждения жилого фонда — около 57% от общей суммы. Далее следуют транспортная инфраструктура (19%), объекты социальной сферы и управления (14%), а также зелёные зоны и общественные пространства (10%). При 25% обеспеченности ущерб снизился до 1723,3 млн рублей, но структура распределения потерь осталась схожей. Высокие значения даже при менее экстремальном сценарии объясняются тем, что уязвимые кварталы попадают в зоны риска при любом значимом повышении уровня воды [18].

Для пространственной интерпретации результатов была построена карта риска затопления, интегрирующая уровень воды, плотность объектов, их кадастровую стоимость и тип застройки [19]. На ней выделены районы, где совмещаются высокая вероятность подтопления и значительная материальная ценность построек. К числу наиболее уязвимых территорий отнесены

центральные и прибрежные районы города: улицы Заречная, Советская, Набережная, Чапаева, Комсомольская и частично Гагарина. Особую значимость представляет наличие здесь не только жилых домов, но и социально значимых объектов, таких как школы, административные здания и элементы городской инфраструктуры.

Дополнительно была построена карта уязвимости, отражающая не просто вероятность затопления, но и чувствительность территорий к ущербу. В анализ включены параметры этажности, функционального назначения, наличия цокольных помещений, а также плотности улично-дорожной сети. Наибольшую уязвимость продемонстрировали участки индивидуальной жилой застройки с малым числом этажей и плотным размещением построек, что характерно для прибрежных районов.

Таким образом, оценка риска затопления г. Аткарск выполнена на основе интеграции цифровой модели рельефа, геоинформационного анализа, моделирования затоплений и расчёта экономического ущерба. Итогом работы стали тематические карты зон затопления, уязвимости и интегрального риска, которые могут быть использованы при актуализации градостроительной документации, проектировании инженерной защиты, формировании планов эвакуации и разработке страховых схем. В условиях изменения климата и повышения экстремальности гидрологических явлений использование таких подходов позволяет повысить устойчивость городской территории и заранее оценить последствия возможных наводнений.

Список используемых источников

1 Свергузова, С.В. Введение в гидрологию: учеб.пособ. / С.В. Свергузова, Ж.А. Сапронова.: Изд-во БГТУ, 2012.– 118 с.

2 Половинкин, А.А. Основы общего землеведения/ А.А. Половинкин. – М.: Государственное учебно-педагогическое издательство министерства просвещения РСФСР, 1958.- 482 с.

3 Гинко, С.С. Катастрофы на берегах рек / С.С. Гинко; под ред. д-ра техн. наук А. И. Чеботарева: Гидрометеиздат, 1977.- 128 с.

4 Фролов, М.П. Основы безопасности жизнедеятельности: 8 кл. : учеб. для общеобразоват. учреждений / М.П. Фролов, М.В. Юрьева, В.П. Шолох и др.; под ред. Ю.Л. Воробьева. - М.: Астрель, 2012. - 175 с.

5 Морозова, В. А. Анализ гидрологических данных и оценка зоны затопления на участке реки Большой Иргиз в районе г. Пугачев Саратовской области / В. А. Морозова // Современные проблемы территориального развития: электрон.журн. – 2018. - № 2. – С. 25-28.

6 Разиньков, Н.Д. Определение зон затоплений как прикладная задача гидрологии /Н.Д. Разиньков, С.Л. Титова // 104 вестник ВГУ, серия: география. Геоэкология, 2016, № 4. - С. 102-106.

7 Лапшин, Д.Н., Павлов С.А. Математическое моделирование в гидрологии: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 148 с.

8 Некрасов, А.В. Компьютерное моделирование гидродинамических процессов систем водоснабжения: учеб.пособие / А.В. Некрасов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 312 с.

9 Гидрологическое моделирование [Электронный ресурс]: HEC-USACE – URL: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/> (дата обращения: 11.03.2025) – Яз. англ.

10 QGIS - Пространственный без компромиссов [Электронный ресурс]: QGIS – URL: <https://www.qgis.org/> (дата обращения: 02.06.2025) – Яз. англ.

11 ArcGIS - Геопространственная платформа Esri корпоративного уровня [Электронный ресурс]: ESRI – URL: <https://www.esri.com/ru-ru/arcgis/geospatial-platform/overview> (дата обращения: 02.06.2025) – Яз. англ.

12 Global Mapper Simulate Water Level Rise [Электронный ресурс]: BLUEMARBLEGEO – URL: https://www.bluemarblegeo.com/knowledgebase/global-mapper-21-1/Simulate_Water_Level_Rise_Flooding.htm (дата обращения 11.03.2024) Загл. с экрана. – Яз. Рус.

13 HEC-GeoRAS User's Manual, Version 10.1 [Электронный ресурс] – HEC.USACE – URL: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/hec-georas> (дата обращения: 02.06.2025) – Яз. англ.

14 Некрасов, А. В. Компьютерное моделирование гидродинамических процессов систем водоснабжения: учеб. пособие / А. В. Некрасов. – Екатеринбург: Изд-во Урал.ун-та, 2014 – 312 с.

15 Гидрологический режим: понятие, принципы и влияние на окружающую среду [Электронный ресурс]: NAUCHNIESTATI – URL: <https://nauchniestati.ru/spravka/gidrologicheskij-rezhim/> (дата обращения 14.03.2024) Загл. с экрана. – Яз. Рус.

16 Методические рекомендации по оценке риска и ущерба при подтоплении территорий / ФГУП НИИ ВОДГЕО. – М., 2001. – 47 с.

17 Методика оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера : утв. МЧС России 30.12.2003 № 621. – М., 2004. – 102 с.

18 Бобровицкий, И. А. Методика оценки ущерба от паводков в малых городах / И. А. Бобровицкий // Гидротехническое строительство. – 2020. – № 3. – С. 21–28.

19 Молочко, А. В. Геоинформационное моделирование геоэкологических рисков : учебное пособие / А. В. Молочко. – Саратов : Техно-Декор, 2021. – 148 с.