



РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РАННЕГО ОПОВЕЩЕНИЯ О НАВОДНЕНИЯХ НА ОСНОВЕ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Козлова Дарья Евгеньевна

Научный сотрудник Кафедры гидротехнического строительства и гидравлики,
Московский государственный строительный университет (МГСУ) г. Москва,
Российская Федерация

Аннотация

В статье представлены ключевые принципы и этапы разработки **интегрированной системы раннего оповещения о наводнениях (СРОН)**, базирующейся на современных достижениях в области **сенсорных сетей и вычислительной гидродинамики**. Наводнения являются наиболее частым и разрушительным природным бедствием, что обуславливает критическую потребность в инструментах, способных обеспечить заблаговременный и точный прогноз опасных гидрологических ситуаций. Мы описываем **трехуровневую архитектуру** системы, включающую подсистемы сбора данных, их аналитической обработки и генерации оповещений. Детально рассмотрена роль **телеметрических датчиков уровня воды, расхода и осадков**, а также их интеграция с **радиолокационными данными** и прогнозами численных метеорологических моделей. Основной акцент сделан на использовании **двумерных (2D) и одномерных (1D) гидравлических моделей** для **прогнозирования зоны затопления** и времени прихода пика паводка. Утверждается, что только синергия полевых измерений, дистанционного зондирования и верифицированного численного моделирования позволяет достичь необходимой точности и надежности прогноза, минимизируя как ложные срабатывания, так и пропуски критических событий, что является фундаментом для повышения устойчивости урбанизированных территорий.

Ключевые слова: система раннего оповещения, наводнения, гидрологическое моделирование, сенсорная сеть, телеметрия, 2D гидравлическая модель, прогнозирование паводков, геоинформационные системы, критический уровень.

Введение

Наводнения, вызванные интенсивными ливневыми осадками, резким снеготаянием или прорывами гидротехнических сооружений, регулярно наносят значительный ущерб экономике и представляют прямую угрозу жизни населения.

В условиях глобального изменения климата и урбанизации водосборных бассейнов, наблюдается рост частоты и интенсивности экстремальных гидрологических явлений, что многократно повышает актуальность разработки и внедрения **высоконадежных систем раннего оповещения о наводнениях (СРОН)**. Эффективная СРОН должна не просто фиксировать уже наступившее превышение уровня воды, но и предоставлять точный прогноз развития ситуации с достаточным **временным лагом** (предупреждением), позволяющим провести эвакуационные и защитные мероприятия. Традиционные методы, основанные на рутинных гидрологических постах и эмпирических зависимостях, демонстрируют недостаточную оперативность и точность для современных требований. Таким образом, требуется создание комплексного инструмента, который сочетает современные достижения в области **сенсорных технологий, телекоммуникации и вычислительной гидродинамики**. Подобный интегрированный подход позволяет перейти от **статистического анализа** к **физически обоснованному моделированию** процессов стока и затопления, обеспечивая тем самым научную базу для принятия решений в кризисных ситуациях.

Архитектура Интегрированной Системы Мониторинга

Разрабатываемая СРОН представляет собой сложную **распределенную архитектуру**, которую целесообразно разделить на три функциональных уровня для обеспечения модульности, масштабируемости и надежности. **Первый уровень** — это **Подсистема Сбора Данных**, которая включает сеть полевых измерительных станций. Эти станции оснащены различными типами датчиков: **ультразвуковыми и радарными уровнемерами** для непрерывного измерения высоты водного столба, **доплеровскими расходомерами** для определения скорости и объема потока, а также **автоматическими метеорологическими станциями** для фиксации интенсивности и накопленного количества осадков. Все датчики должны быть интегрированы в единый **телеметрический комплекс**, способный передавать данные с высокой частотой (интервал 5–15 минут) по защищенным каналам связи, таким как GPRS/3G/4G или спутниковые модемы, для обеспечения работы в удаленных или обесточенных районах.

Второй уровень — **Подсистема Обработки и Моделирования**, которая является аналитическим ядром всей системы. Ее основой является высокопроизводительный серверный комплекс, на котором развернута **Геоинформационная Система (ГИС)**, обеспечивающая пространственное хранение и визуализацию всех данных, включая цифровые модели рельефа и карты опасных зон. На этом же уровне функционируют **численные гидрологические и гидравлические модели**, которые используют входящие данные мониторинга и прогнозы осадков в качестве граничных условий. Критически важной частью этого уровня является **алгоритм верификации** и очистки данных, который должен оперативно выявлять и отсекал ложные показания датчиков, вызванные техническими сбоями или внешними факторами, обеспечивая тем самым достоверность исходной информации для моделей.

Третий уровень — Подсистема Генерации и Распространения Оповещений, которая отвечает за преобразование модельных результатов в понятные и своевременные уведомления. Она должна включать механизмы классификации степени угрозы (например, по цветовому коду) и использовать различные протоколы связи — от автоматических SMS-рассылок и голосовых сообщений до интеграции с официальными веб-порталами и мобильными приложениями, обеспечивая тем самым максимальный охват целевой аудитории.

Методы Сбора и Предварительной Обработки Гидрометеорологических Данных

Надежность всей системы раннего оповещения прямо пропорциональна качеству и своевременности исходных данных. Помимо локальных телеметрических датчиков, СРОН должна интегрировать более широкие источники информации. Важным компонентом является использование **данных метеорологических радиолокаторов**, которые предоставляют информацию о пространственном распределении и интенсивности осадков в реальном времени, что критически важно для прогнозирования **кратковременных, но интенсивных ливневых паводков** в малых водосборах. Эти радиолокационные данные должны подвергаться **алгоритмам коррекции**, чтобы минимизировать ошибки, связанные с затуханием сигнала и влиянием рельефа.

Предварительная обработка данных является обязательным этапом и включает не только очистку от шумов и выбросов, но и **процедуру ассимиляции данных**. В гидрологическом моделировании ассимиляция данных позволяет скорректировать состояние модели (например, влажность почвы, начальный уровень воды) в процессе ее работы, используя фактические измерения. Это делает прогноз более реалистичным, особенно в краткосрочной перспективе (от 1 до 6 часов). Для анализа долгосрочных тенденций и оценки потенциала насыщения водосбора используются данные **спутникового мониторинга влажности почвы и запасов снежного покрова**. Эти пространственно распределенные данные интегрируются в **гидрологические модели стока** (например, типа HSPF или SWAT), которые рассчитывают объем воды, поступающий в русловую сеть, основываясь на физике процессов инфильтрации, испарения и поверхностного стока, что позволяет определить потенциальную угрозу наводнения за несколько суток до его наступления.

Численное Гидравлическое Моделирование и Алгоритмы Прогнозирования

Центральным элементом СРОН является комплекс **численного гидравлического моделирования**, задачей которого является расчет **волны паводка** по руслу реки и определение **границ зоны затопления**. В зависимости от масштаба задачи и доступной вычислительной мощности используются различные типы моделей. Для длинных, относительно прямолинейных участков рек, а также для получения быстрого первого прогноза времени прихода пика паводка, эффективным инструментом выступают **одномерные (1D)** гидравлические модели, основанные

на **уравнениях Сен-Венана**. Эти модели рассчитывают скорость и высоту волны, учитывая трение о дно и изменения поперечного сечения русла.

Однако для точного определения **зоны затопления** в поймах с плотной застройкой и сложным рельефом необходимо применение **двумерных (2D)** гидравлических моделей. Эти модели используют **полные уравнения Навье-Стокса** или их упрощенные формы (например, **уравнения мелкой воды**), работая с высокодетализированными цифровыми моделями рельефа, полученными с помощью **лазерного сканирования (LiDAR)**. Двумерное моделирование позволяет точно учесть перераспределение потока при выходе воды из основного русла, прорыв дамб и влияние городской инфраструктуры (например, дорог и зданий) на скорость и направление потока. Алгоритмы прогнозирования в СРОН работают циклически: на основе текущих данных мониторинга и метеопрогноза модель запускается с заданным **временным шагом прогноза** (например, 1, 3, 6 часов), рассчитывая гидрограф в контрольных точках. Сравнение прогнозируемых уровней с **критическими отметками**, заранее определенными для каждого населенного пункта, инициирует процедуру генерации оповещения, а расчет **зоны затопления** позволяет визуализировать потенциальный ущерб в ГИС-среде для служб спасения.

Протоколы Распространения Оповещений и Пользовательский Интерфейс

Эффективность СРОН оценивается не только точностью прогноза, но и скоростью и надежностью **доставки информации** до конечных пользователей — как специалистов (спасателей, гидрологов), так и широкой общественности. **Протоколы распространения оповещений** должны быть многоканальными и резервированными, чтобы гарантировать передачу сигнала даже при частичном разрушении инфраструктуры связи. Для специалистов критически важен доступ к **оперативному интерфейсу СРОН**, который должен представлять собой ГИС-портал. Этот портал должен содержать интерактивные карты с отображением текущих уровней воды, прогнозируемых зон затопления, траекторий движения паводковой волны, а также **прогнозные гидрографы** для ключевых створов. Интерфейс должен быть интуитивно понятным и обеспечивать возможность быстрого сравнения различных сценариев развития событий.

Для населения используются протоколы, обеспечивающие максимально широкий охват, включая автоматизированные системы оповещения через громкоговорители, рассылки по мобильной связи, а также специальные мобильные приложения, которые используют **геолокацию** для доставки персонализированных предупреждений. Важно отметить, что процедура оповещения должна быть строго регламентирована и включать **тренировочные сигналы** для повышения осведомленности населения и предотвращения паники. Разработка интерфейса требует учета **человеческого фактора**, а именно, предоставления информации в форме, которая однозначно интерпретируется и не допускает разночтений, что достигается четким указанием **степени опасности, времени наступления критической ситуации и рекомендованных действий**.

Заключение

Разработка и внедрение интегрированной системы раннего оповещения о наводнениях является междисциплинарной инженерно-научной задачей, требующей объединения гидрологии, информационных технологий и строительной инженерии. Ключевые выводы исследования подтверждают, что **высокая надежность СРОН** достигается за счет **резервирования сенсорных данных** и использования **физически обоснованных численных моделей** (2D гидравлических моделей), которые обеспечивают точный расчет пространственных границ затопления. Перспективные направления для дальнейшей оптимизации системы включают: **Интеграцию технологий машинного обучения (ML)** для ускорения процессов **ассимиляции данных** и автоматической калибровки параметров гидрологических моделей в реальном времени, что позволит повысить точность краткосрочного прогноза. **Развитие сети недорогих, беспроводных сенсоров** (например, на базе технологий IoT), работающих по принципу краудсорсинга, для увеличения пространственного разрешения мониторинга в малых и слабоизученных водосборах. **Создание мульти-рисковых систем**, способных одновременно прогнозировать не только наводнения, но и связанные с ними угрозы, такие как **оползни** и **сели**, что существенно повысит общую защищенность территории. Внедрение таких передовых систем является инвестицией в **устойчивость** и **безопасность** общества, позволяя эффективно управлять рисками в условиях растущей непредсказуемости климатических явлений.

Литература

1. Григорьев В.Я., Кучмент Л.С. Гидрологическое моделирование и прогнозирование паводков. — М.: Научный мир, 2014.
2. Смирнов А.А. Инженерная защита территорий от наводнений. — СПб.: Политехника, 2019.
3. Bales J. D., Pappenberger F., Wood A. W. et al. Hydrologic-hydraulic flood inundation modeling: A state-of-the-art review. // *Water Resources Research*, 2007, Vol. 43, No. 9, W09403.
4. Hunter N. M., Bates P. D., Neelz S. et al. Benchmarking 2D hydraulic models for flood simulation. // *Engineering Hydrology*, 2015, Vol. 515, pp. 222–234.
5. Vernieuwe E., De Pauw A., Van De Steene K. Real-time flood forecasting and warning systems: An integrated approach. // *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2015, Vol. 15, pp. 165–178.