

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени «доктора философии» (PhD)
по образовательной программе
8D06101 – «Информационные системы (по отраслям)»

ЧЕТТЫКБАЕВ РУСЛАН КАЙРАТОВИЧ

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАТОПЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ ПРИ СЕЗОННЫХ ПАВОДКАХ

Общая характеристика работы: диссертация посвящена разработке интеллектуальной информационно-аналитической системы прогнозирования затопления территорий в условиях сезонных паводков. В работе предложена научно обоснованная архитектура интеграции гидрологических, метеорологических и спутниковых данных в единую цифровую среду, обеспечивающую автоматизированный сбор, моделирование, визуализацию и прогнозирование зон затопления. Разработанные математические модели и алгоритмы позволяют воспроизводить динамику паводкового процесса, повышая точность определения потенциальных зон риска и оперативность предупреждения чрезвычайных ситуаций. Система апробирована на реках Восточного Казахстана и показала высокую сходимость расчётов с фактическими зонами затопления.

Ключевые слова: паводки, прогнозирование затоплений, дистанционное зондирование, гидродинамические модели, MIKE, HEC-RAS, уравнения Сен-Венана, ГИС-моделирование, цифровые модели рельефа, машинное обучение, мониторинг ЧС, гидрологические данные, визуализация зон затопления, информационно-аналитическая система.

Актуальность исследования.

Паводки относятся к числу наиболее разрушительных природных явлений, ежегодно приводящих к экономическому ущербу, деградации инфраструктуры и угрозе жизни населения. Восточный Казахстан относится к зоне повышенного гидрологического риска из-за сложного рельефа, неустойчивого снежно-дождевого режима и высокой плотности речной сети. Существующие системы прогнозирования, как правило, основаны на разрозненных данных и не обеспечивают достаточную оперативность при принятии решений.

Актуальность работы определяется необходимостью создания интегрированной системы, способной объединять спутниковые, гидрометеорологические и рельефные данные, моделировать паводковый процесс и выдавать прогноз зон затопления с высокой точностью. Диссертация содержит первый комплексный подход к построению интеллектуальной ИАС, адаптированной к речным системам Восточного Казахстана

Кроме этого, часть диссертационного исследования выполнена в рамках ПЦФ BR21882022 «Исследование лавинной активности в Восточно-

Казахстанской области для разработки систем мониторинга и научного обоснования их размещения» на 2023–2025 годы, в ходе которого была изучена предметная область, включающая природно-климатические факторы, механизмы формирования снежных масс, характеристики склоновых процессов и методы прогнозирования опасных явлений.

Объектом исследования является паводковые процессы в речных системах Восточного Казахстана.

Предметом исследования являются методы интеграции, математического моделирования и анализа пространственно-временных данных для построения интеллектуальной системы прогнозирования затоплений.

Цель исследования: повышение контроля и управления паводковой обстановкой в Восточно-Казахстанской области путем разработки научно обоснованной интеллектуальной информационно-аналитической системы, обеспечивающей комплексный мониторинг, многофакторный анализ и высокоточное прогнозирование зон затопления в условиях чрезвычайных ситуаций.

Задачи исследования:

1. Проанализировать природно-географические и социально-экономические предпосылки паводковой опасности в Восточном Казахстане.
2. Изучить современные методы и программные средства гидрологического и гидродинамического моделирования, определить их возможности и ограничения.
3. Разработать методологию интеграции данных дистанционного зондирования Земли, гидрологических наблюдений и цифровых моделей рельефа в единую информационную базу.
4. Создать физико-математическую модель течения в речных системах на основе уравнений Сен-Венана и численных алгоритмов расчёта неустановившегося потока.
5. Разработать архитектуру и функциональную структуру информационно-аналитической системы, включающей модули сбора данных, моделирования, прогнозирования и визуализации.
6. Провести апробацию системы на пилотных территориях Восточного Казахстана и оценить эффективность прогнозов в сравнении с фактическими данными.

Основные методы исследования: в работе использованы методы гидродинамического и гидрологического моделирования (уравнения Сен-Венана, законы сохранения массы и импульса, формулы Шези и Маннинга), численные методы решения систем дифференциальных уравнений (метод конечных разностей, схема Ранге–Кутты, неявные методы), методы машинного обучения (Decision Tree, Random Forest, LSTM-сети) для прогнозирования уровней воды при неполных наблюдениях, геоинформационные технологии и инструменты анализа пространственных данных (NextGIS, QGIS, Leaflet, Copernicus DEM), программный комплекс MIKE 11 для моделирования гидравлических режимов и построения карт затопления.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель паводкового процесса, основанная на уравнениях Сен-Венана и современных численных алгоритмах моделирования неустановившихся течений, обеспечивающая воспроизведение динамики водного потока и повышение точности прогноза паводковых явлений.

2. Алгоритмы комплексной оценки влияния ключевых гидрометеорологических факторов — суммы осадков, средней температуры, высоты снежного покрова, температурного градиента и глубины промерзания почвы — на качество прогнозной модели паводков, обеспечивающие количественное определение их вклада в точность и устойчивость прогноза.

3. Архитектура и функциональная структура информационно-аналитической системы прогнозирования паводков, обеспечивающей автоматизированный сбор, обработку, анализ и визуализацию гидрологических, метеорологических и спутниковых данных.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые для условий Восточного Казахстана создана интегрированная архитектура ИАС прогнозирования паводков, включающая модуль сбора данных, гидродинамическое моделирование, прогнозирование и ГИС-визуализацию. Предложены алгоритмы комплексной оценки влияния осадков, температуры, снежного покрова, температурного градиента и промерзания на формирование паводков. Разработанная методика позволяет формировать прогнозные карты затопления с высокой детализацией и использовать их для оперативных решений.

Публикации. Полученные в диссертации результаты опубликованы в 5 работах, в том числе 3 статьи в журнале, рецензируемый в базе данных Scopus (показатель процентиля по CiteScore более 60%), 2 статей в изданиях, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК.

Результаты исследований, представленные в опубликованных статьях:

1 Natalya Denissova, Ruslan Chettykbayev, Irina Dyomina, Olga Petrova, Nurbek Saparkhojayev. Integration of Space and Hydrological Data into System of Monitoring Natural Emergencies (Flood Hazards) // Appl. Sci. 2025, 15(14), 8050; DOI: <https://doi.org/10.3390/app15148050>. Impact factor 2.5. Citescore 5.5. Q2. Процентиль: 69.

2 Yevgeniy Fedkin, Natalya Denissova, Gulzhan Daumova, Ruslan Chettykbayev, Saule Rakhmetullina. Avalanche Hazard Prediction in East Kazakhstan Using Ensemble Machine Learning Algorithms // Algorithms 2025, 18(8), 505; DOI: <https://doi.org/10.3390/a18080505>. Impact factor 2.1. Citescore 4.5. Q2. Процентиль: 72.

3 Natalya Denissova, Nurakynov Serik, Petrova Olga, Daumova Gulzhan, Daniker Chepashev, Marua Alpysbay, Ruslan Chettykbayev. Dependence of Avalanche Risk on Slope Insolation Level and Albedo. // Atmosphere 2025, 16, no. 5: 556; DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos16050556>. Impact factor 2.3. Citescore 4.9. Q2. Процентиль: 60.

4 Четтыкбаев Р.К., Денисова Н.Ф. Разработка информационно-аналитической системы мониторинга паводковой обстановки на реках ВКО. //

Вестник ВКТУ им. Д. Серикбаева. – Т.4. – Усть-Каменогорск, 2020. - с. 54-59.
https://www.ektu.kz/files/vestnik/Vestnik_4-2020.pdf.

5 R.K. Chettykbayev, N.F. Denissova. Information-analytical system for forecasting the flooding of territories during seasonal flood (статья) // Вестник ВКТУ им. Д. Серикбаева. – Т.4. – Усть-Каменогорск, 2022. - с. 243-254. DOI: https://doi.org/10.51885/1561-4212_2022_4_243.

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на международных конференциях:

- Международная конференция v.Int.Exchange, Западно-Саксонский Университет Прикладных Наук Цвиккау, Германия, 05.01.2021 г.

- IX международный форум молодых ученых (28 марта – 4 апреля 2019 года). – Усть-Каменогорск, 2019.

- Международная научно-практическая конференция - г. Хабаровск, РФ, декабрь 2022г.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа изложена на 123 страницах компьютерного набора, состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованных источников из 122 наименований и приложений. Текст иллюстрирован 30 таблицами, 36 рисунками и 108 формулами.

Первая глава посвящена анализу природно-географических и социально-экономических факторов паводковой опасности, а также современным подходам к прогнозированию и моделированию паводков. Рассматриваются существующие системы мониторинга, методы интеграции данных дистанционного зондирования и гидрологических наблюдений. Сформулирована концепция информационно-аналитической системы и определены требования к её архитектуре и функциональным модулям.

Во второй главе изложены основы математического моделирования гидрологических процессов, приведена физическая и математическая постановка задачи на основе уравнений Сен-Венана. Рассмотрены методы численного решения, алгоритмы реализации моделей и адаптация программных комплексов HEC-RAS и MIKE 11. Выполнено моделирование паводков на примере речных систем Восточного Казахстана, проведена верификация и анализ точности расчётов.

В третьей главе представлена структура и архитектура системы, включающая модули сбора данных, моделирования, прогнозирования и визуализации. Описаны принципы функционирования, взаимодействие модулей, применяемые технологии (Python, PostgreSQL/NextGIS, FastAPI, QGIS). Рассмотрены вопросы информационной безопасности, надёжности и интерфейса пользователя.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных расчётов и апробации системы на пилотных территориях (реки Курчум, Бухтарма, Иртыш). Выполнено сравнение расчётных и фактических зон затопления, проведена оценка точности и эффективности системы. Показана возможность интеграции разработанного решения в региональные системы мониторинга ЧС и перспективы масштабирования для других бассейнов Казахстана.

В заключении подведены итоги проведённого исследования, сформулированы основные научные и практические результаты, подтверждающие достижение цели диссертационной работы. Определены направления дальнейших исследований, включая развитие алгоритмов прогнозирования на основе нейронных сетей и расширение применения системы в других климатических и гидрологических условиях.

Содержание диссертации завершается списком использованных источников и приложениями.