

ПРОБЛЕМЫ
ЭКОЛОГИИ

МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕЧНЫХ НАВОДНЕНИЙ

© 2019 г. В.А. Зеленцов^{1,*}, А.М. Алабян^{1,2,3,**}, И.Н. Крыленко^{1,2,3,***},
И.Ю. Пиманов^{1,****}, М.Р. Пономаренко^{1,*****}, С.А. Потрясаев^{1,*****},
А.Е. Семёнов^{1,*****}, В.А. Соболевский^{1,*****},
Б.В. Соколов^{1,*****}, Р.М. Юсупов^{1,*****}

¹Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

*E-mail: v.a.zelentsov@gmail.com; **E-mail: andrei_alabyan@mail.ru; ***E-mail: krylenko_i@mail.ru;
****E-mail: pimen@list.ru; *****E-mail: pnmry@yandex.ru; *****E-mail: spotryasaev@gmail.com;
*****E-mail: sasfeat@mail.ru; *****E-mail: arguzd@yandex.ru; *****E-mail: sokol@iias.spb.su;
*****E-mail: yusupov@iias.spb.su

Поступила в редакцию 22.08.2018 г.

Поступила после доработки 20.11.2018 г.

Принята к публикации 17.02.2019 г.

В статье представлены результаты разработки и тестирования системы оперативного прогнозирования речных наводнений, которая базируется на использовании комплекса гидрологических и гидродинамических моделей, а также наземных и спутниковых данных, и реализована на основе сервис-ориентированной архитектуры. Отличительная особенность системы – полная автоматизация всего цикла моделирования – от загрузки исходных данных до интерпретации результатов, визуализации и оповещения заинтересованных лиц. Теоретической основой обеспечения согласованного функционирования всех компонентов системы является разрабатываемая авторами статьи квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. Практическая реализация выполнена с помощью открытых кодов и свободно распространяемого программного обеспечения. Результаты тестирования свидетельствуют о возможности широкого внедрения подобных систем в деятельность территориальных органов власти и служб по чрезвычайным ситуациям.

Ключевые слова: наводнения, комплексное моделирование, оперативное прогнозирование, сервис-ориентированная архитектура, искусственные нейронные сети, гидродинамические модели, геоинформационные системы.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5873898831-843>

В 2016 г. авторы данной статьи опубликовали в журнале "Вестник РАН" [1] описание подхода к созданию интеллектуальных информационных систем оперативного прогнозирования речных на-

воднений, основанного на применении комплекса гидрологических и гидродинамических моделей. Принципиальными особенностями предложенного подхода являются включение в создаваемую си-

ЗЕЛЕНЦОВ Вячеслав Алексеевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник СПИИРАН. АЛАБЯН Андрей Михайлович – кандидат географических наук, доцент кафедры гидрологии суши Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. КРЫЛЕНКО Инна Николаевна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник кафедры гидрологии суши Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. ПИМАНОВ Илья Юрьевич – младший научный сотрудник СПИИРАН. ПОНОМАРЕНКО Мария Руслановна – младший научный сотрудник СПИИРАН. ПОТРЯСАЕВ Семён Алексеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник СПИИРАН. СЕМЁНОВ Александр Евгеньевич – младший научный сотрудник СПИИРАН. СОБОЛЕВСКИЙ Владислав Алексеевич – младший научный сотрудник СПИИРАН. СОКОЛОВ Борис Владимирович – доктор технических наук, руководитель лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании СПИИРАН. ЮСУПОВ Рафаэль Мидхатович – член-корреспондент РАН, научный руководитель СПИИРАН.

стему апробированных математических моделей, описывающих водосбор и движение воды по руслу реки, комплексное использование наземных и аэрокосмических данных при моделировании, а также максимальная автоматизация всех этапов моделирования — от сбора и загрузки исходных данных до анализа потенциального ущерба и оповещения заинтересованных лиц.

Именно модельно-ориентированный подход, обеспечивающий высокоточную оценку границ затоплений и уровней подъёма воды с учётом конкретных условий распространения водного потока, принципиально отличает рассматриваемые задачи построения системы *прогнозирования* от задач *мониторинга* наводнений, фиксирующих границы зон уже состоявшихся затоплений, и задач *геоинформационного моделирования*, позволяющих оценивать возможные границы зон разлива воды при тех или иных потенциально возможных уровнях её подъёма. При этом под термином "оперативный" подразумевается краткосрочный, на 12–48 ч вперёд, прогноз зон и глубин затоплений на конкретных участках речных долин.

К настоящему времени выполнены полнофункциональная реализация прототипа системы и её тестирование в период весеннего половодья 2018 г. на р. Северная Двина. Мы опишем наиболее важные аспекты применения предложенной технологии и решения теоретических и прикладных проблем.

Проведение исследований по созданию систем оперативного прогнозирования наводнений не теряет актуальности. Частота возникновения и тяжесть последствий данного вида чрезвычайных ситуаций остаётся высокой. В России ежегодно происходит 40–70 крупных наводнений. По данным Росгидромета, этим стихийным бедствиям подвержены около 500 тыс. км², наводнениям с катастрофическими последствиями — 150 тыс. км², а это порядка 300 городов, десятки тысяч населённых пунктов, большое количество хозяйственных объектов, более 7 млн га сельхозугодий. Среднегодовой ущерб от наводнений оценивается примерно в 40 млрд руб. [2]. Согласно исследованию ФГБУ "ВНИИ гидрометеорологической информации — Мировой центр данных", суммарно число опасных гидрологических явлений (наводнений, паводков и селей) за первое десятилетие XXI в. в России выросло в 1,5 раза по сравнению с 1990-ми годами [2]. В то же время по-прежнему наблюдается дефицит разработок и прикладных систем, позволяющих оперативно, просто и наглядно предоставлять лицам, принимающим решения, максимально достоверную информацию о будущем развитии опасных ситуаций.

Характеризуя состояние разработки технологий и систем оперативного прогнозирования наводнений, необходимо отметить следующие три фактора.

Во-первых, международное сообщество активно разрабатывает информационные системы и сервисы для мониторинга и прогнозирования наводнений, развивает функциональность гидродинамических моделей Mike 11, Mike 21 Датского гидрологического института [3], Delft 3D Института Deltares (г. Дельфт, Нидерланды) [4], HEC-RAS Американского корпуса военных инженеров [5], LISFLOOD [6] и др. К наиболее известным зарубежным информационным системам, предполагающим использование математических моделей, относятся: Система предупреждения о наводнениях (Flood Early Warning Systems — FFWS) [7], североамериканская National Water Model (NWM) [8], Европейская система предупреждения о наводнениях (European Flood Awareness System — EFAS), базирующаяся на модели LISFLOOD [9], и некоторые другие. Эти системы ориентированы на территории североамериканских и европейских стран и имеют достаточно развитую сеть станций и постов наблюдения — источников гидрологических и метеорологических данных. Для прогнозирования ситуаций на российских реках требуется более полный учёт ряда особенностей, а именно, разрежённости сети гидрометеорологических наблюдений, возникновения ледовых заторов, отсутствия высокодетальных цифровых моделей рельефа для потенциально опасных речных долин.

В последнее время проведена разработка ряда новых сервисов, основанных на данных дистанционного зондирования Земли, в частности:

- Copernicus Emergency Management Service, включающий модули Copernicus EMS — Mapping и Global Flood Awareness Systems (GloFAS);
- Thematic Exploitation Platform — Hydrology (TEP Hydrology), включающий сервис мониторинга наводнений Flood Monitoring Service.

Однако, как и прежде, существующие сервисы не предполагают использования математических моделей, наиболее адекватно учитывающих особенности российских рек, и ориентированы в основном на мониторинг и прогнозирование стока, а не на оперативное прогнозирование речных наводнений.

Для расчёта зон затопления и движения водного потока по затопленной пойме в России наибольшее распространение получили гидродинамические модели класса STREAM 2D (ранее известные как Flood и River), разработанные под руководством А.Н. Милитеева и В.В. Беликова [10]. Они оснащены всеми необходимыми компонентами для учёта особенностей российских рек и, несмотря на хорошие результаты апробации на ряде ключевых участков российских территорий, сейчас могут использоваться в основном специалистами-гидрологами и для решения частных задач моделирования из-за недостаточ-

ной проработки вопросов автоматизации получения и обработки исходных данных, локальности исполнения и других информационно-технологических ограничений. Существуют примеры реализации отдельных проектов, внедряющих математические прогнозные модели гидрологического режима рек в период паводка или половодья, отдельные случаи применения автоматизированных и автоматических систем сбора гидрологической информации [11]. Однако зачастую разработчики программно-инструментальных средств ориентировались на проприетарное достаточно сложное программное обеспечение (ПО) – ArcGIS и др. – или определённые стандарты обмена информацией [12], что обуславливает сильные ограничения по масштабированию полученных решений.

Свободно распространяемые программные средства моделирования наводнений представлены лишь серией приложений Американского корпуса военных инженеров (HEC-RAS, HEC-GeoRAS, HEC-HMS, HEC-GeoHMS). Бесплатные решения с закрытым исходным кодом (например, Flood Modeller [13]) имеют строгие ограничения по функциональности и размерности обрабатываемых данных.

Во-вторых, данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) как один из основных источников информации о фактических границах русел рек и зон затоплений становятся всё более доступными и удобными. Практические шаги к широкому использованию этого типа данных предпринимает, в частности, Европейское космическое агентство, развивая технологии оперативного применения данных группировки оптических и радарных спутников семейства Sentinel. Качество данных с отечественных группировок космических аппаратов "Канопус-В" и "Ресурс-П", которыми активно пользуются службы МЧС России, также повышается, и они всё чаще задействуются для мониторинга наводнений. В рамках международных соглашений, в частности, Международной хартии по космосу и крупным катастрофам, существует возможность использования ресурса оперативной спутниковой съёмки для всех участников хартии (15 организаций, включая национальные и международные космические агентства) при возникновении чрезвычайных ситуаций. Кроме того, бурное развитие беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), соответствующей аппаратуры съёмки и программно-инструментальных средств обработки снимков с БПЛА также приводит к расширению потенциального состава данных, которые могут привлекаться для повышения точности моделирования и прогнозирования границ зон затоплений.

Существует ряд отечественных и зарубежных работ [14, 15] по автоматизации построения границ зон затоплений на основе обработки материалов ДЗЗ и наземных данных, однако вопросы применения полученных результатов в комплексных системах моделирования наводнений остаются в целом открытыми.

В-третьих, практически повсеместно в Российской Федерации и за рубежом разрабатываются информационные технологии и соответствующие программные средства с целью интеграции разнородных информационных ресурсов, основанные на использовании свободно распространяемого программного обеспечения и открытых программных кодов, включая геоинформационные системы – неотъемлемый компонент систем прогнозирования наводнений (CARTO, NextGIS, MapBox, Urbica). Современные технологии в этой области позволяют создавать упрощённые средства взаимодействия пользователей со сложными системами [16], но пока недостаточно примеров применения современных информационных технологий и программных продуктов для полной автоматизации всего цикла моделирования наводнений – от сбора и обработки наземно-аэрокосмических данных до публикации результатов и оповещения заинтересованных лиц и организаций.

В целом анализ разработок систем оперативного прогнозирования наводнений показал, что пока не преодолен разрыв между разработчиками гидрологических и гидродинамических моделей, специалистами в области разработки информационных технологий и программно-инструментальных средств обработки разнородных данных, а также специалистами-практиками, которые ещё не могут оперативно использовать результаты математического моделирования в силу недостаточной автоматизации систем прогнозирования и отсутствия удобных и простых средств взаимодействия с моделирующими комплексами. Предлагаемые в настоящей статье технология и соответствующая система оперативного прогнозирования направлены на устранение данного разрыва.

Общая структура и технологический состав модельно-ориентированной системы оперативного прогнозирования наводнений на базе сервис-ориентированной архитектуры. В основу предлагаемой технологии автоматизированного оперативного прогнозирования наводнений положена концепция многомодельного описания сложных природных объектов с реализацией механизма выбора и адаптации (структурной и параметрической) параметров наиболее адекватной модели для каждой конкретной ситуации [1, 17]. Концепция развивается в рамках нового научного направления – квалитетрии моделей и полимодельных комплексов.

В данной концепции применительно к речным наводнениям первоочередное значение имеет тот факт, что, как правило, нет универсальной модели, пригодной для описания процессов развития наводнений на различных по протяжённости и конфигурации участках рек. При выборе гидродинамических моделей для прогнозирования наводнений целесообразна реализация много-модельного подхода: в зависимости от протяжённости участка мониторинга и наличия исходной информации возможен выбор между одномерными гидродинамическими моделями для протяжённых (100–1000 км) участков и двумерными – для участков речных долин длиной менее 100 км при большой ширине русел и пойм, их сложной конфигурации, наличии различных сооружений в руслах и поймах [1]. Опыт показывает, что существенной экономии сил и средств при исследовании и мониторинге протяжённых речных объектов можно достичь путём совместного (гибридного, комплексного, многомасштабного) расчёта по одномерной и двумерной моделям.

Общая архитектура модельно-ориентированной системы оперативного прогнозирования наводнений приведена на рисунке 1. В качестве базового подхода при построении системы использована сервис-ориентированная архитектура (СОА) [16, 18], которая обеспечивает гибкое взаимодействие программных модулей, реализующих гидродинамические и гидрологические модели, модулей сбора и обработки разнородных данных, в том числе получаемых с гидропостов и космиче-

ских аппаратов ДЗЗ, управляющих модулей и т. д. При этом все компоненты системы реализуются как веб-сервисы, они могут быть территориально распределены и локализованы в различных учреждениях, городах и странах.

Наиболее принципиальные вопросы при реализации СОА – способ подключения разнородных модулей и организация их взаимодействия при функционировании системы. По первому вопросу необходимо отметить, что СОА не предписывает никакого способа организации информационного потока между множеством сервисов, кроме соединения приложений по принципу "точка–точка". Такое взаимодействие приводит к стремительному росту сложности системы при добавлении новых участников. Вместо этого целесообразно так выстроить инфраструктуру информационного обмена, чтобы сторонние программные комплексы подключались в виде модулей к универсальному управляющему приложению, осуществляющему вычислительные процессы решения прикладных задач потребителей, а сам информационный обмен строился на принципах событийно-ориентированной архитектуры.

Событийно-ориентированный подход в распределённых информационных системах может быть реализован в виде сервисной шины предприятия (ESB) [19]. Она организует централизованный и унифицированный событийно-ориентированный обмен сообщениями между различными компонентами информационной системы. Обмен происходит через единую точ-



Рис. 1. Обобщённая схема информационной системы оперативного прогнозирования наводнений

ку, обеспечивающую транзакционный контроль, преобразование данных, аудит сообщений. Принципиальным, с точки зрения построения системы и обеспечения независимого функционирования разнородных модулей, является тот факт, что при изменении какого-либо компонента системы, подключённого к сервисной шине, нет необходимости в перенастройке остальных подсистем.

По второму вопросу заметим, что концепция сервисной шины предоставляет возможность организации синтеза вычислительных процессов, но напрямую не декларирует путь её реализации. Для описания автоматического управления набором сервисов в зарубежной литературе используется термин "оркестровка веб-служб" [20]. Оркестровка описывает, как сервисы должны взаимодействовать друг с другом, обмениваясь сообщениями, включая бизнес-логику и последовательность действий. В сервис-ориентированной архитектуре оркестровка сервисов реализуется согласно стандарту Business Process Execution Language (WS-BPEL) [21]. За последнее десятилетие WS-BPEL зарекомендовал себя как эффективный язык для описания логики работы приложений, основанных на распределённых веб-сервисах. Его применение позволяет организовать логику взаимодействия модулей и веб-сервисов при решении каждой конкретной прикладной задачи, используя в том числе визуальный редактор. Тем самым обеспечивается визуальное конструирование алгоритмов работы с данными при задействовании различных источников и сервисов.

В целом в составе предлагаемой и уже реализованной системы можно выделить следующие оригинальные архитектурные и программные решения, которые позволяют применять заявленную технологию максимально полной автоматизации оперативного прогнозирования наводнений:

- сервисная шина, представленная программным продуктом OpenESB;
- интерпретатор сценария на языке BPEL, встроенный в сервисную шину OpenESB;
- программное обеспечение для отображения данных по стандартам веб-картографии GeoServer;
- система управления базой пространственных данных PostgreSQL с дополнением PostGIS;
- сервер администрирования на базе Python;
- сервис сбора данных с гидрологических датчиков;
- сервис получения, обработки и загрузки данных ДЗЗ;
- сервис прогнозирования значений параметров гидродинамических процессов;
- сервис, управляющий работой расчётной гидродинамической модели;

- сервис прогнозирования уровня и расхода воды на гидропостях;
- сервис обработки и интерпретации результатов расчётов;
- пользовательский веб-интерфейс в виде прогрессивного веб-приложения, адаптированного для работы на стационарных и мобильных пользовательских терминалах, и обеспечивающий выполнение принципиального требования минимизации специальных знаний потребителя для работы с информационными системами.

Вся информация, с которой работает система, хранится в битемпоральной базе данных. В её основе лежит темпоральная модель данных (ТМД), позволяющая хранить сведения об их жизненном цикле. ТМД применяется для хранения как исходных данных (гидрометеорологических), так и результатов моделирования. Битемпоральность означает хранение как времени актуальности определённых данных, так и транзакционного времени (момент записи в хранилище).

Использование битемпоральной базы данных обеспечивает работу системы мониторинга наводнений в оперативном режиме, а также в режиме моделирования "по прошлому" и в режиме сценарного моделирования. Доступ пользователя к темпоральным данным реализован в виде временной шкалы в веб-интерфейсе. Используя этот механизм, пользователь может просматривать различные материалы (исходные, исторические и прогнозируемые) без специальных знаний (например, формального языка запросов), просто перемещая ползунок шкалы (рис. 2).

Созданный вариант системы оперативного прогнозирования наводнений выполняет полный цикл моделирования *в автоматическом режиме*: от сбора исходных данных с гидрологических датчиков до обновления результатов прогнозирования в пользовательском интерфейсе. В базе пространственных данных формируются записи, которые преобразуются геосервером в формат WMS и поставляются в пользовательский интерфейс. Сам интерфейс предоставляет конечному пользователю необходимый минимум инструментов для работы с результатами прогнозирования: строку поиска пространственных данных, перечень отображаемых в настоящий момент данных, временную шкалу для работы с темпоральными данными. Таким образом, вся сложность, связанная с использованием разнородных территориально распределённых модулей системы, скрыта от пользователя за счёт полной автоматизации вычислительного процесса. Это позволяет применять систему не только специалистам с высоким уровнем знаний в области ГИС и информационных технологий, но и специалистам в предметной области (гидрологии), а также другим пользова-

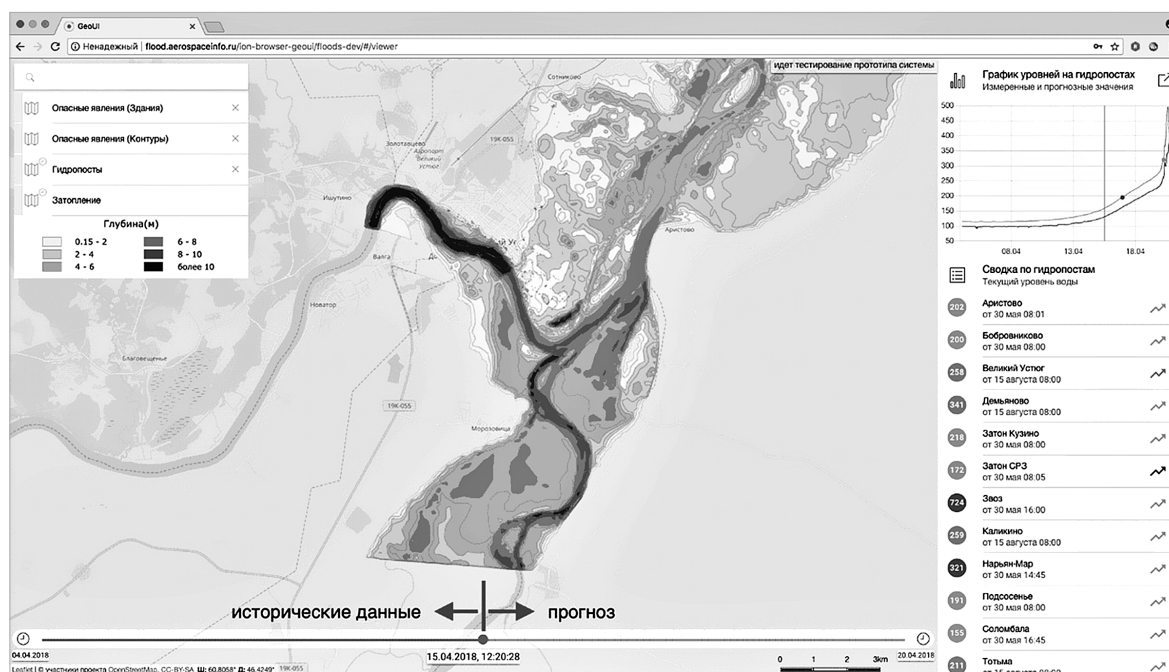


Рис. 2. Вид экрана веб-интерфейса системы с временной шкалой

телям, заинтересованным в результатах прогноза наводнений (службы по чрезвычайным ситуациям, органы исполнительной власти, коммерческие организации и граждане).

Подходы к созданию большей части рассмотренных информационно-технологических решений базируются на результатах, представленных в статье [1]. Отметим дополнительно два принципиальных момента, определяющих возможности автоматизации полного цикла моделирования, а именно – способ автоматического определения уровней воды "на входе" в модели движения воды по руслу и обработку данных ДЗЗ для их использования при последующей корректировке (при необходимости) параметров моделей.

Модели прогноза уровней и расходов воды. Одни из ключевых компонентов системы, потребовавшие особого внимания при её создании и тестировании, – сервисы подготовки исходных данных для загрузки непосредственно в гидродинамические модели, осуществляющие расчёт зон и глубин затоплений. Такими исходными данными являются прогнозируемые уровни и расходы воды в заранее определённых сечениях русла реки.

При функционировании данного сервиса реализуются многомодельный подход и концепция выбора для конкретного интервала времени той математической модели, которая в наибольшей степени адекватно описывает и прогнозирует гидрологическую обстановку. В качестве альтернативных вариантов моделей расчёта расходов воды рассматриваются аналитико-имитационные гидрологические модели формирования стока (в данном

случае этот подход иллюстрируется отечественной моделью ЕСОМАГ, разработанной под руководством Ю.Г. Мотовилова [22]), максимально полно учитывающей особенности водосборных бассейнов на российских территориях, а также моделями непосредственного расчёта с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС).

Сейчас опыт создания ИНС для прогнозирования уровня воды на российских реках крайне ограничен. Существующие прототипы ИНС, как правило, "обучались" для рек, которые либо не замерзают, либо уровень их промерзания незначителен [23, 24]. При реализации этого метода в рамках рассматриваемого подхода разработан алгоритм автоматического подбора (адаптации) конфигурационных параметров предложенных моделей ИНС. Непосредственно алгоритм обучения построен на базе генетического алгоритма [25], где в качестве "особей" выступали простые перцептроны Румельхарта¹. Обладая тривиальной структурой, данный перцептрон прост в разработке, настройке и последующем использовании, а универсальность позволяет применять его для решения широкого спектра задач динамического распознавания ситуаций.

¹ Перцептрон Румельхарта – искусственная нейронная сеть, содержащая входной и выходной слои, а также один или более скрытых слоёв. Данная архитектура сети была разработана Дэвидом Румельхартом в 1986 г. Особенностью архитектуры является то, что в процессе обучения алгоритмом обратного распространения ошибки обучаются все слои, а не один выходной.

В процессе работы генетического алгоритма подстраивались следующие параметры предложенных ИНС:

- количество скрытых слоёв;
- количество нейронов в скрытом слое;
- функция активации нейронов скрытого слоя;
- количество эпох обучения.

В результате работы алгоритма формируется ИНС с адаптированными параметрами, обеспечивающая требуемую точность и достоверность оперативного прогнозирования наводнения.

Выбор конкретной модели (ИНС или ECOMAG) для расчёта расходов воды "на входе" в гидродинамические модели определяется индивидуальными условиями конкретного паводка и будет проиллюстрирован ниже при описании экспериментальной части исследований.

Особенности обработки данных дистанционного зондирования Земли. Важная отличительная черта рассматриваемой системы, определяющая новизну подхода к моделированию и верификации результатов прогноза, — активное использование, наряду со съёмкой в оптическом диапазоне, материалов радарной спутниковой съёмки. В условиях сильной облачности, что зачастую имеет место при развитии опасных гидрологических явлений, применение радарных данных существенно расширяет возможности систем прогнозирования наводнений с точки зрения оперативности получения информации о ледовых явлениях и оценивания текущих контуров водных поверхностей на территории для выполнения коррекции параметров прогнозных гидродинамических моделей. Однако использование радарных данных имеет ограничения, связанные с тем, что ввиду особенностей геометрии съёмки затопления на урбанизированных территориях могут оказаться перекрыты объектами городской застройки и попасть в зону радиолокационной тени. Эффективным решением проблемы является совместный анализ материалов оптической и радиолокационной съёмки.

Оптические данные — ценный источник информации при детектировании затоплений благодаря тому, что водные поверхности, как правило, характеризуются более низкими значениями спектральной яркости в сравнении с окружающими объектами, и на оптических снимках отображаются как наиболее тёмные области. Действенный способ автоматического выявления водных объектов по оптическим данным — расчёт индексов для оценки интенсивности отражённого излучения в различных спектральных каналах. К числу индексов, чаще всего используемых для детектирования водных поверхностей, относятся водный индекс NDWI (Normalized Difference Water Index) и вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [15].

Выявление водных объектов по радарным данным основано на том, что при взаимодействии с гладкими водными поверхностями отражённый сигнал распространяется в направлении от антенны, в результате чего водная поверхность на радарном снимке обычно представлена пикселями с низким значением интенсивности. Сегодня задача автоматического выделения водных поверхностей по материалам радиолокационной съёмки решается с использованием пороговой обработки, текстурного анализа, обработки интерферометрических данных, поляриметрической обработки [15]. Основной метод — классификация радарного изображения с учётом порогового значения интенсивности отражённого сигнала, когда в процессе обработки всем пикселям снимка, значение которых меньше установленного порога, присваивается класс водных объектов [26].

Точность распознавания объектов зависит от характера водной поверхности и во многом определяется исходными данными, в частности, поляризацией сигнала, при которой были получены снимки. Наиболее предпочтительна для картографирования наводнений горизонтальная поляризация (HH). Перекрёстные поляризации (HV, VH) и их комбинации эффективны при изучении частично затопленных территорий, так как позволяют выделить различные объекты местности по характеру обратного рассеяния [27].

В рассматриваемой системе оперативного прогнозирования наводнений используется оригинальный метод обработки, основанный на сочетании пороговой обработки радарных снимков и вычисления индекса NDWI по данным оптической съёмки с последующим совместным анализом результатов. Применение такого подхода при детектировании зон затоплений позволило избежать неточностей, связанных с облачностью, и при этом получить данные о затопленных участках на урбанизированных территориях.

В целом полученные результаты обеспечивают решение задачи автоматической обработки оптических и радарных космических снимков с целью выявления затопленных территорий и визуального сравнения реальных и смоделированных контуров зон затопления. Кроме того, реализация предложенного подхода в виде отдельного веб-сервиса позволяет перейти к автоматизации процедур корректировки включённых в систему прогнозных моделей.

Результаты тестирования. Рассмотренные технологии и система оперативного прогнозирования наводнений прошли апробацию в РФ в 2014–2018 гг. в ходе проведения исследований в рамках проектов Российского фонда фундаментальных исследований и Российского научного фонда применительно к участку русла р. Северная Двина от Великого Устюга до Котласа (рис. 3).

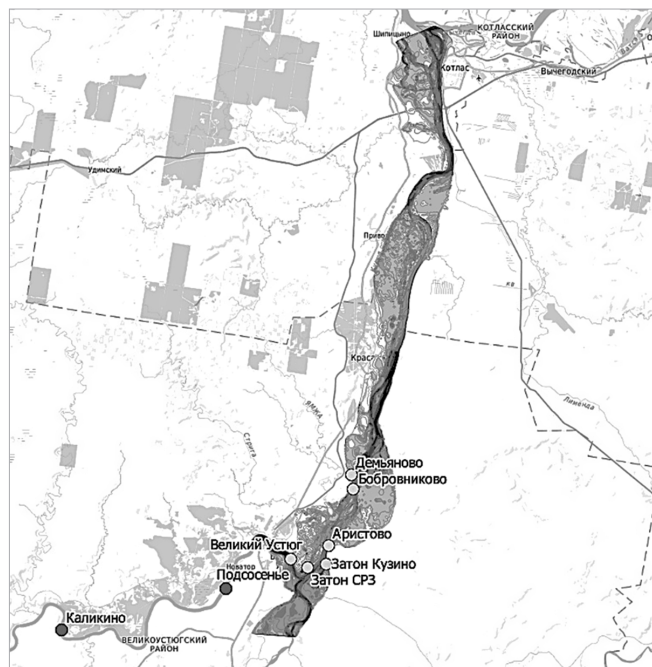


Рис. 3. Участок моделирования затоплений на р. Северная Двина

Экспериментальные исследования проведены с использованием данных 1998–2017 гг., а весной 2018 г. тестирование осуществлялось в режиме реального времени с предоставлением результатов работы специалистам Росгидромета, МЧС и администраций Архангельска, Вологды и Великого Устюга. Выбор территории проведения экспериментов обусловлен высокой частотой возникновения наводнений и большими экономическими потерями от наводнений в этом районе. Кроме того, территория достаточно подробно исследована специалистами-гидрологами и не раз становилась площадкой для отработки гидродинамических моделей [28, 29].

В экспериментах на участке р. Северная Двина в качестве гидродинамического модуля использовалась отечественная модель STREAM 2D, которая апробирована и показала хорошие результаты на ряде российских рек. Модель ранее применялась для сценарных расчётов на рассматриваемом ключевом участке при оценке различных вариантов противопаводковых мероприятий, включая защитные дамбы (одна из которых в настоящий момент находится на стадии строительства), и показала высокую эффективность при воспроизведении максимальных уровней воды и зон затопления: расхождение максимальных смоделированных и наблюдаемых уровней в пиках половодий за 1975–2013 гг. не превышало 30 см, площади затопления различались не более чем на 10% [28, 30].

Для расчёта расходов воды, поступающей на верхние границы гидродинамической модели,

использовались модели ECOMAG и искусственных нейронных сетей. Модель формирования стока ECOMAG ранее успешно применялась для сценарных расчётов стока при изменении климата в бассейне р. Северная Двина [31]. В режиме оперативных расчётов модели STREAM 2D и ECOMAG начали применяться для узла слияния рек Сухоны и Юга в ходе разработки описываемой системы прогнозирования.

В процессе тестирования в режиме реального времени гидрологические данные поступали в систему с 12 стационарных и 5 временных гидропостов (часть из них, расположенная в рассматриваемом районе моделирования затоплений, показана на рисунке 3). Данные перед поступлением в модель STREAM 2D проходили предобработку в соответствии с описанными выше подходами для расчёта уровней воды.

Для прогнозирования уровня воды использовались данные с трёх постов на притоках р. Северная Двина: посты Тотьма и Каликино на р. Сухона и пост Гаврино при слиянии рек Юг и Луза (поскольку пост Гаврино был закрыт в 1989 г., данные для более поздних периодов рассчитывались в виде суммы расходов с постов Красавино на р. Луза и Подосиновец на р. Юг, для пересчёта расходов воды в уровни и обратно использовались кривые $Q(H)$ для соответствующих постов), а также данные о температуре с метеорологических постов, основным из которых был пост в Великом Устюге. Выбор этих гидропостов обусловлен областью формирования ледовых заторов между Великим Устюгом и Котласом. Участок характеризуется достаточно частым образованием ледовых заторов, что приводит к затоплению Великого Устюга, расположенного на слиянии рек Сухона и Юг.

При разработке и выборе конкретных моделей и методов прогнозирования наводнений на рассматриваемом участке реки необходимо учитывать, что, несмотря на имеющийся внушительный объём исторических статистических данных, полученных ранее с перечисленных гидропостов, большая их часть имеет обрывочный, мозаичный характер. В связи с этим для обучения разрабатываемых прогностических искусственных нейронных сетей был составлен специальный набор данных за несколько лет.

На рисунках 4–6 представлены результаты прогнозирования с помощью ИНС уровня воды в районах трёх гидропостов за период 09.03.2018–29.04.2018. Из графиков видно, что худшая точность прогноза была получена для поста Каликино, в районе которого в ходе ледохода 2018 г. образовалась аномальная ситуация, вызванная ледовым затором. Для постов Гаврино и Тотьма, где ледоход был близким по параметрам к среднестатистическому, точность оказалась выше: разница между реальным и спрогнозированным уровнями не превысила 10%.

На рисунке 7 приведены результаты сравнения прогноза на базе ИНС с расчётом, полученным на основе имитационного моделирования, выполненного с помощью программного комплекса ЕСОМАГ по данным метеорологических станций. Расходы воды, полученные по модели ЕСОМАГ, для сравнения с результатами по ИНС пересчитаны в уровни воды по кривой Q (H) для поста Каликино. Имитационная модель реагировала на изменения паводковой ситуации существенно медленнее, однако корректнее отражала нештатные ситуации и точнее определяла тренды их развития в долгосрочной перспективе, так как в данном типе моделей учитываются процессы формирования стока за весь период, начиная с осеннего промерзания водосбора, снегонакопления, снеготаяния и т. п. на всей водосборной площади выше исследуемых створов.

Можно сделать вывод, что ИНС дают лучший результат в режиме обычного ледохода и способны с высокой точностью прогнозировать длительные по времени и инерционные изменения, влияющие на уровень воды. Это обусловлено большим набором тестовых примеров в период нормального ледохода, что позволило обучить ИНС точно прогнозировать уровень воды в таких условиях. В свою очередь прогнозирование резких изменений ледовой или метеорологической обстановки дало более высокую погрешность. Это объясняется двумя причинами. Во-первых, отсутствовало достаточное количество обучающих данных, которые позволили бы охватить изменения уровня при всех возможных аномальных ситуациях. Во-вторых, возникновение таких ситуаций обусловлено факторами, появляющимися при замерзании реки или в зимний период, а ИНС использует только оперативные данные о текущем состоянии реки и при ограниченных объёмах обучающих выборок не может учитывать долгосрочные причины и оценивать их влияние на уровень воды.

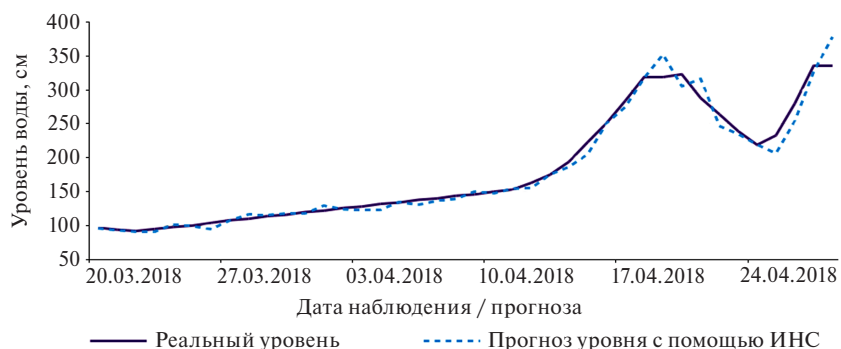


Рис. 4. Результаты прогнозирования уровня воды с использованием ИНС для створа поста Гаврино

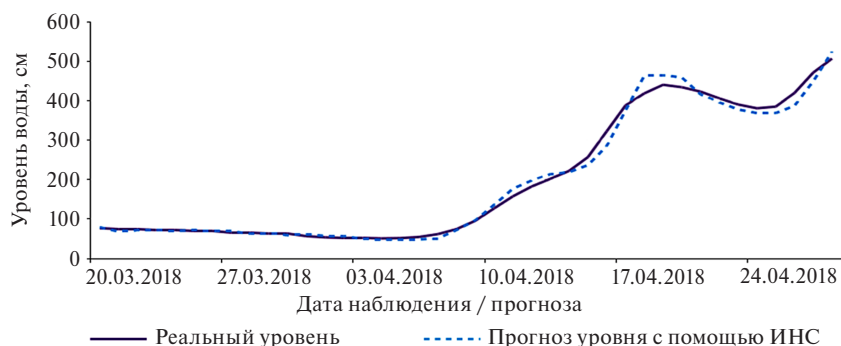


Рис. 5. Результаты прогнозирования уровня воды с использованием ИНС для поста Тотьма



Рис. 6. Результаты прогнозирования уровня воды с использованием ИНС для поста Каликино

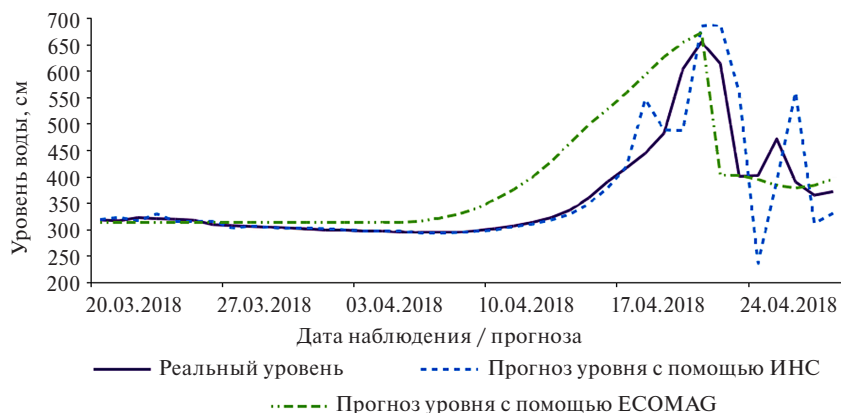


Рис. 7. Сравнение результатов прогнозирования для поста Каликино

Модель ECOMAG способна конструктивно учитывать все данные и на этой основе обеспечивать прогнозирование возможных долгосрочных аномальных ситуаций. Однако для уточнения результатов, получаемых по модели ECOMAG в оперативном режиме, необходима дальнейшая разработка блока корректировки прогноза, базирующаяся на сопоставлении рассчитанных и наблюдаемых расходов воды в день выпуска прогноза.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили важность комплексного использования различных моделей для повышения точности прогнозирования значений уровня воды, необходимых для последующих расчётов зон и глубин затоплений. Поэтому в процессе работы предлагаемой системы во время нормального ледохода прогнозирование осуществлялось с помощью ИНС. При возникновении аномальной ситуации, вызванной ледяными заторами, когда данные об уровне воды с гидрологических постов не отражали реальное количество воды в реке, происходило переключение на имитационную модель, которая позволяла точнее спрогнозировать характер развития изменений уровня воды на гидропостах.

После загрузки данных в гидродинамическую модель расчёт контуров и глубин затоплений выполнялся каждый час на 24 часа вперёд. Затем сервисы интерпретации результатов моделирования выполняли визуализацию контуров и глубин затоплений. На экран интерфейса системы одновременно с моделируемыми контурами зон распространения воды выводилась информация о составе гидропостов, с которых идёт автоматическая загрузка данных, а также графики изменения уровней воды на гидропостах (в произвольной комбинации гидропостов в течение выбранных временных интервалов) с результатами прогнозов изменения

уровней (см. рис. 2). Кроме того, система позволяет выводить на экран интерфейса пользователя обработанные данные ДЗЗ. При тестировании в качестве данных ДЗЗ использовались материалы съёмки российских КА ДЗЗ "Ресурс-П" и "Канопус-В", а также семейства Sentinel (Европейское космическое агентство) и RADARSAT-2 (Канада).

В рамках исследования выполнена автоматическая обработка оптических и радарных данных с целью выявления территорий, затопленных паводковым наводнением. В частности, в период весеннего половодья с 1 апреля по 16 мая 2018 г. в системе было размещено более 20 космических снимков. Использование материалов космической съёмки позволило не только оценить качество моделирования, но и дать дополнительную информацию специалистам Росгидромета о ледовой обстановке и уникальные данные о специфических явлениях, вызванных местными условиями. Например, на рисунке 8 показано распространение по реке так называемой Коряжемской полыньи. Она образуется в результате сброса тёплой воды Котласским ЦБК в г. Коряжме. Её наличие выступает существенным фактором, который учитывается при анализе гидрологических явлений в расположенной ниже по течению части русла Северной Двины.

Кроме оперативного режима, в ходе экспериментальной отработки системы тестировался сценарный режим работы. Проведено моделирование максимального контура зоны затоплений, достигнутого во время катастрофического наводнения 2016 г. В качестве радарных спутниковых данных для 2016 г. использован снимок RADARSAT-2 (пространственное разрешение – 6 м, поляризация – НН, дата съёмки – 20.04.2016 г.). Обработка в соответствии с предложенным подходом выполнена при поддержке открытого программного обеспечения SNAP и QGIS. Предварительная обработка включала радиометрическую калибровку и фильтрацию спекл-шума. На этапе тематической обработки выполнен расчёт пороговых значений интенсивности с целью выявления водных объектов с построением маски открытой водной поверхности и затопленных территорий. Для уверенного определения требуется, чтобы открытая площадь затопления составляла не менее 24 м². Постобработка включала автоматическую векторизацию растровых данных, а также размещение и визуализацию полученного векторного слоя, содержащего информацию о зоне затопления территории на момент выполнения радарной съёмки, в интерфейсе системы.

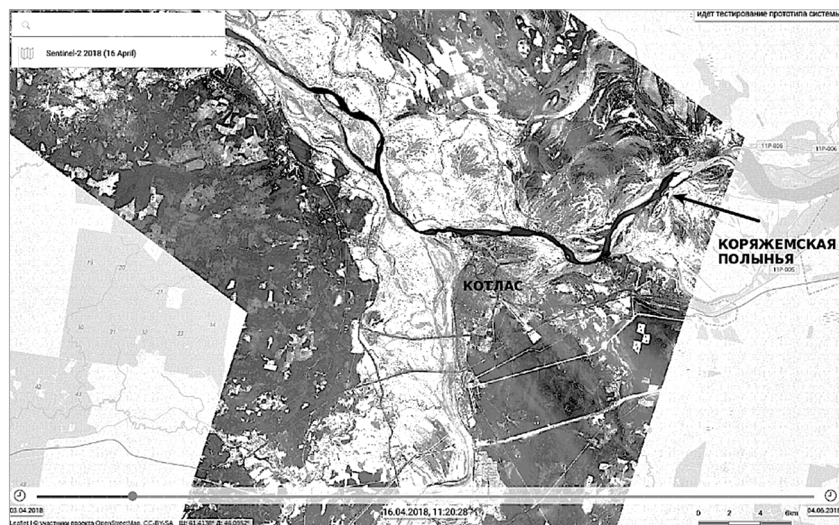


Рис. 8. Распространение Коряжемской полыньи на снимках Sentinel-2 от 16.04.2018 г.

Результат обработки данных RADAR-SAT-2 сопоставлен с расчётом контуров затопления территории (рис. 9). С учётом разрешающей способности исходных данных и возможных погрешностей, возникающих при выбранной технологии обработки, удаётся достичь высокого совпадения контуров затопления на открытых территориях с низким уровнем урбанизации. Расхождение между площадями затопления, полученными по данным гидродинамической модели, с одной стороны, и по результатам обработки космического снимка по области моделирования, с другой, составило 7%. Наибольшее расхождение смоделированных и наблюдаемых максимальных уровней воды по гидропосту Великий Устюг составило 15 см. Точность прогноза, оценённая по составу объектов инфраструктуры, попадающих в зону затопления в ходе половодья, — не менее 90%.

Для практического применения системы важно, что по результатам прогноза визуализируются объекты инфраструктуры, попадающие в зону затоплений (см. рис. 9, *вверху*), формируются отчёты о потенциальном ущербе, а также обеспечивается автоматическое оповещение граждан и организаций — владельцев этих объектов.

* * *

Проведённый анализ существующих и перспективных технологий интеграции распределённых информационных ресурсов при решении задач мониторинга и оперативного прогнозирования наводнений показал, что в качестве базового подхода к созданию соответствующих информационных систем целесообразно использовать сервис- и событийно-ориентированные архитектуры в сочетании с технологиями платформенезависимого универсального описания, автоматического поиска и интеграции веб-сервисов. Результаты апробации свидетельствуют, что применение такого подхода обеспечивает необходимую функциональность систем оперативного прогнозирования наводнений и выполнение базовых требований к подобным системам. Сложность, связанная с использованием разнородных территориально распределённых информационных ресурсов, скрыта от пользователя за счёт полной автоматизации вычисли-

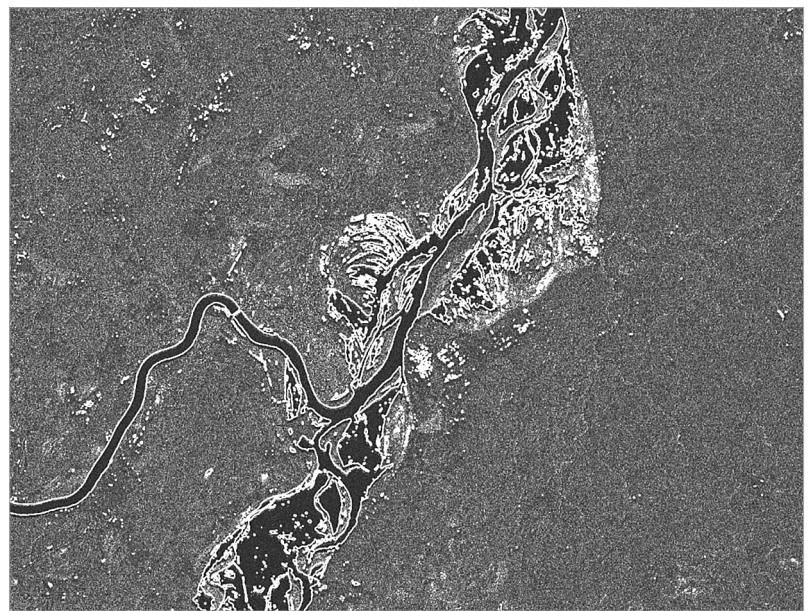
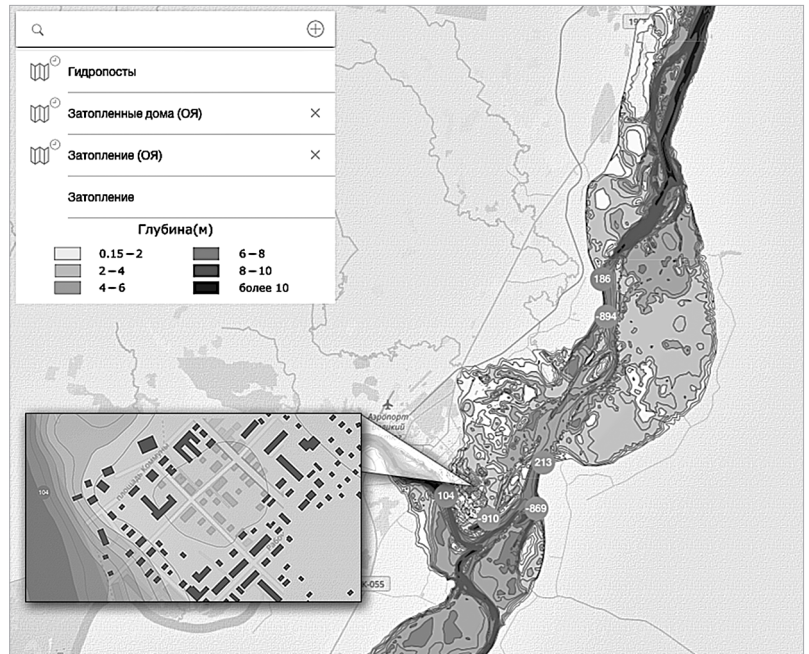


Рис. 9. Сравнение результатов моделирования (*вверху*) с реальными границами зон затоплений (*внизу*) на пике половодья 2016 г.

тельного процесса. Это позволяет использовать систему не только специалистам с высоким уровнем знаний в области ГИС и информационных технологий и специалистам в соответствующей предметной области, но и другим заинтересованным лицам и организациям, в том числе службам по чрезвычайным ситуациям, местным администрациям, страховым компаниям и др.

Результаты тестирования системы в оперативном режиме, а также при сценарном моделировании подтвердили практическую реализуемость предложенного многомодельного подхода и эффектив-

ность программно-технологических решений. При этом продемонстрирована возможность создания высокоуровневых автоматических сервисов прогнозирования наводнений, базирующихся на открытой отечественной программной платформе с максимальным учётом особенностей российских рек и существующего информационного обеспечения задач гидрометеорологического мониторинга.

Перспективные направления дальнейших исследований в сфере развития технологий и систем оперативного прогнозирования наводнений связаны с совершенствованием средств автоматизации моделирования при разработке процедур и сервисов определения мест возникновения ледовых заторов и их вскрытия с соответствующей корректировкой параметров моделей распространения воды ниже по течению, а также с расширением состава используемых для расчётов гидрологических и гидродинамических моделей.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают глубокую признательность сотрудникам Северного управления Гидрометеослужбы РФ и его Вологодского филиала, в первую очередь Е. Н. Скрипник и И. И. Риммер, за помощь в выполнении экспериментальных исследований и заинтересованное обсуждение результатов работы. Неоценимую помощь разработчикам системы оказали консультации руководителей разработки программных комплексов ECOMAG и STREAM 2D Ю. Г. Мотовилова и В. В. Беликова (Институт водных проблем РАН).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования по разработке моделей на базе искусственных нейронных сетей, использованию многомодельного подхода, а также экспериментальные исследования по тестированию системы на р. Северная Двина выполнены за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 17-11-01254). Исследования по выбору технологий для создания веб-сервисов выполнены в рамках бюджетной темы № 0073-2019-0004. Обработка данных ДЗЗ выполнена при финансовой поддержке проекта Speeding up Copernicus-based innovation in the Baltic Sea Region (BalticSatApps) программы INTERREG Baltic Sea Region.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Alabyan A.M., Zelentsov V.A., Krylenko I.N. et al.* Development of Intelligent Information Systems for Operational River-Flood Forecasting // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2016. № 1. P. 24-33; *Алабян А.М., Зеленцов В.А., Крыленко И.Н. и др.* Создание интеллектуальных информационных систем оперативного прогнозирования речных наводнений // Вестник РАН. 2016. № 2. С. 127-137.
2. <http://tass.ru/info/4291130> (дата обращения 15.08.2018).
3. *Skotner C., Klinting A., Ammentorp H.* Mike Flood Watch – managing real-time forecasting. http://dhigroup.com/upload/publications/mike11/Skotner_MIKE_FLOOD_watch.pdf (дата обращения 15.08.2018).
4. Delft3D-FLOW Version 3.15 User Manual. WL | Delft hydraulics. <http://oss.deltares.nl/web/delft3d> (дата обращения 15.08.2018).
5. HEC-RAS river analysis system User's Manual. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras> (дата обращения 15.08.2018).
6. LISPFLOOD-FP, University of Bristol, School of Geographical Sciences, Hydrology Group. <http://www.bristol.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood> (дата обращения 15.08.2018).
7. <https://www.deltares.nl/en/software/flood-forecasting-system-delft-fews-2/> (дата обращения 15.08.2018).
8. <http://water.noaa.gov/about/nwm> (дата обращения 15.08.2018).
9. <https://www.efas.eu/> (дата обращения 15.08.2018).
10. Программный комплекс STREAM 2D CUDA для расчёта течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках с использованием технологии CUDA (на графических процессорах NVIDIA) / Алексюк А.И., Беликов В.В. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017660266. Российское агентство по интеллектуальной собственности, 2017.
11. *Бориц С.В., Бураков Д.А., Жабина И.И. и др.* Система прогнозирования и раннего предупреждения об угрозе наводнений на реках бассейна р. Амур // Научное обеспечение реализации "Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г." Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 6-12.
12. *Бугаец А.Н., Мотовилов Ю.Г., Беликов В.В. и др.* Построение интегрированной системы гидрологического моделирования с применением стандарта OpenMI для задач управления риском наводнений (на примере среднего Амура) // Научное обеспечение реализации "Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г." Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 12-20.
13. <https://www.floodmodeller.com> (дата обращения 15.08.2018).
14. *Ponomarenko M.R., Pimanov I.Y.* Implementation of Synthetic Aperture Radar and Geoinformation Technologies in the Complex Monitoring and Managing of the Mining Industry Objects // Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems. CSOC 2017 // Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer, Cham. 2017. V. 574.
15. *Refice A., D'Addabbo A., Capolongo D.* (eds.) Flood Monitoring through Remote Sensing. Springer Remote Sensing // Photogrammetry. Springer, Cham. 2017.
16. *Зеленцов В.А., Потрясаев С.А.* Архитектура и примеры реализации информационной платформы для создания и предоставления тематических сервисов с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Труды СПИИРАН. 2017. Вып. 6 (55). С. 86-113.
17. *Sokolov B.V., Zelentsov V.A., Brovkina O. et al.* Models adaptation of complex objects structure dynamics control – Intelligent Integrated Decision Support Systems for Territory Management // Intelligent Systems in Cybernetics and Automation Theory. Proceedings of the 4th Computer Science On-line Conference 2015 (CSOC2015). V. 2: Intelligent Systems in Cybernetics and Automation

- Theory // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2015. V. 348. P. 21-34.
18. Paik H., Lemos A., Barukh M. et al. *Web Service Implementation and Composition Techniques*. Springer International Publishing, 2017.
 19. He W., Xu L.D. Integration of Distributed Enterprise Applications: A Survey // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2014. V. 10. № 1. P. 35-42.
 20. Wang Y. A formal model of QoS-aware web service orchestration engine // *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2016. V. 13. № 1. P. 113-125.
 21. Ting-Huan K., Chi-Hua C., Hsu-Yang K. Applications of the web service middleware framework based on the BPEL // *Proceedings of the IEEE 5th Global Conference on Consumer Electronics*. 2016. P. 1-5.
 22. Мотовилов Ю.Г. Свидетельство о государственной регистрации в Роспатенте № 2013610703. ЕСОМАГ. Россия, 2013.
 23. Arsene C., Al-Dabass D., Hartley J. Decision Support System for Water Distribution Systems Based on Neural Networks and Graphs // *UKSim 14th International Conference on Computer Modelling and Simulation*. 2012. P. 315-323.
 24. Hollan J.H. *Adaptation in natural and artificial system*. Cambridge, MA: MIT Press Cambridge, 1992.
 25. Lantrip J., Griffin M., Aly A. Results of near-term forecasting of surface water supplies // *World Water Congress 2005: Impacts of Global Climate Change*. Proceedings of the 2005 World Water and Environmental Resources Congress. Anchorage, Alaska, US, 2005. P. 436.
 26. Chini M., Hostache R., Giustarini L., Matgen P. A Hierarchical Split-Based Approach for Parametric Thresholding of SAR Images: Flood Inundation as a Test Case // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. V. 55. № 12. P. 6975-6988.
 27. Martinis S., Rieke C. Backscatter Analysis Using Multi-Temporal and Multi-Frequency SAR Data in the Context of Flood Mapping at River Saale, Germany // *Remote Sens*. 2015. № 7. P. 7732-7752.
 28. Belikov V.V., Krylenko I.N., Alabyan A.M. et al. Two-dimensional hydrodynamic flood modelling for populated valley areas of Russian rivers // *Proc. IAHS*. 2015. V. 370. P. 69-74.
 29. Alabyan A.M., Lebedeva S.V. Flow dynamics in large tidal delta of the Northern Dvina river: 2D simulation // *J. Hydroinformatics*. 2018. V. 20. № 4. P. 798-813.
 30. Agafonova S.A., Frolova N.L., Krylenko I.N. et al. Dangerous ice phenomena on the lowland rivers of European Russia // *Natural Hazards*. 2017. V. 88. № S1. P. 171-188.
 31. Krylenko I., Motovilov Yu., Antokhina E. et al. Physically-based distributed modelling of river runoff under changing climate conditions // *Proc. IAHS*. 2015. V. 368. P. 156-161.

MODEL-DRIVEN SYSTEM FOR OPERATIONAL FORECASTING OF RIVER FLOODING

© 2019 V.A. Zelentsov^{1,*}, A.M. Alabyan^{1,2,3,**}, I.N. Krylenko^{1,2,3,***}, I.Yu. Pimanov^{1,****},
M.R. Ponomarenko^{1,*****}, S.A. Potryasaev^{1,*****}, A.E. Semenov^{1,*****}, V.A. Sobolevsky^{1,*****},
B.V. Sokolov^{1,*****}, R.M. Yusupov^{1,*****}

¹*St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

³*Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*E-mail: v.a.zelentsov@gmail.com; **E-mail: andrei_alabyan@mail.ru; ***E-mail: krylenko_i@mail.ru;

****E-mail: pimen@list.ru; *****E-mail: pnmry@yandex.ru; *****E-mail: spotryasaev@gmail.com;

*****E-mail: sasfeat@mail.ru; *****E-mail: arguzd@yandex.ru; *****E-mail: sokol@iias.spb.su;

*****E-mail: yusupov@iias.spb.su

Received 22.08.2018

Revised version received 20.11.2018

Accepted 17.02.2019

This article presents the results of the development and testing of a system for operational forecasting of river flooding. This system is based on the use of a complex of hydrological and hydrodynamic models and *in-situ* and satellite data. It is implemented on the basis of service-oriented architecture. A distinctive feature of the system is its full automation of the entire modeling cycle, from the initial data loading to the results of interpretation, visualization, and notification of stakeholders. The theoretical background for ensuring the coordinated functioning of system components is provided by the quality metrics of the models and polymodel complexes that have been developed by the authors. The implementation of the system's software was performed using open source and free tools. The results of testing indicate the possibility of the widespread introduction of such systems for authorities and emergency services.

Keywords: flood, complex modeling, operational forecasting, service-oriented architecture, artificial neural network, hydrodynamic model, geoinformation systems.