

А.М. АЛАБЯН, В.А. ЗЕЛЕНЦОВ, И.Н. КРЫЛЕНКО, С.А. ПОТРЯСАЕВ,
Б.В. СОКОЛОВ, Р.М. ЮСУПОВ
**ОПЕРАТИВНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАВОДНЕНИЙ НА
ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО УПРЕЖДАЮЩЕГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИНТЕГРАЦИИ РАЗНОРОДНЫХ
ДАННЫХ**

Алабян А.М., Зеленцов В.А., Крыленко И.Н., Потрысаев С.А., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.
Оперативное прогнозирование наводнений на основе комплексного упреждающего моделирования и интеграции разнородных данных.

Аннотация. В статье описаны основы построения и практическая реализация систем оперативного прогнозирования речных наводнений, базирующиеся на интегрированном использовании современных разработок в области информационных технологий и комплексного упреждающего (проактивного) моделирования. Отличительными особенностями предлагаемого междисциплинарного подхода являются: а) широкое использование разнородных данных, получаемых от сети гидропостов и от космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, б) реализация систем прогнозирования на базе сервис-ориентированной архитектуры, в) создание интеллектуального интерфейса для выбора типа и настройки параметров гидрологических моделей, и обеспечение удобного представления и доступности результатов прогноза, в том числе в виде Веб-сервисов. Практическая апробация созданного программного прототипа системы подтвердила возможность получения в автоматическом режиме высокоточного оперативного (от нескольких часов до нескольких суток) прогноза зон и глубин затоплений участков речных долин.

Ключевые слова: системы мониторинга, наземно-космический мониторинг, моделирование наводнений, прогнозирование наводнений, прогнозирование.

Alabyan A.M., Zelentsov V.A., Krylenko I.N., Potrysaev S.A., Sokolov B.V., Yusupov R.M.
Operational Flood Forecasting on the Basis of Complex Proactive Modeling and Integration of Heterogeneous Data.

Abstract. The article describes the basics of creating operational river flood forecasting systems, based on the integrated use of modern information technologies and integrated proactive modeling. Their practical implementation is also shown. The distinctive features of the proposed interdisciplinary approach are: a) the widespread use of heterogeneous data from a network of gauging stations and Earth remote sensing satellites; b) implementation of forecasting systems based on service-oriented architecture; c) creation of an intelligent interface for selecting the type and parameter setting of hydrological models; d) ensuring convenient and accessible presentation of the forecast results using web-services. Practical testing of the developed software prototype has confirmed the possibility of automatic high-precision operational (from several hours to several days) forecasting of flooding zones and depths of river valleys.

Keywords: monitoring systems, space-ground monitoring, flood modeling, proactive modeling, forecasting.

1. Введение. Мониторинг и прогнозирование наводнений являются в настоящее время ключевыми задачами при обеспечении безопасности жизнедеятельности в населенных пунктах, расположенных в долинах рек. Своевременное предупреждение служб по чрезвычайным ситуациям и населения о надвигающейся угрозе

является условием сохранения жизни и здоровья людей, а также минимизации экономического ущерба в потенциально опасных районах. Крупные города и малые населенные пункты нашей страны за последние годы неоднократно подвергались разрушительному воздействию наводнений, причем в значительных масштабах. По прогнозам, указанная тенденция, как и тренд учащения крупномасштабных природных бедствий гидрологического характера, в обозримом будущем сохранится [1–3]. Это подтверждают, в частности, произошедшие в последние годы катастрофические наводнения в г. Крымске, на реке Амур, в Алтайском крае, Республике Алтай и Хакасии. Серьезные наводнения происходили в эти годы и в Европе: в Сербии, Боснии и Герцеговине, Германии, Болгарии.

Поэтому прогнозирование наводнений, вызываемых весенними половодьями и паводками различного происхождения, является одной из основных задач современной науки [4]. Достоверное и своевременное решение подобных задач имеет первостепенное практическое значение для оценивания ущербов от стихийных бедствий, своевременного принятия превентивных мер и минимизации экономических последствий от наводнений, для управления строительством и режимами функционирования гидротехнических сооружений.

Известные в нашей стране и за рубежом ученые, проводящие исследования по данной проблематике, за последнее время неоднократно, в том числе на страницах Вестника РАН [4, 5], обращались к теме необходимости создания отечественных информационных систем для прогнозирования наводнений. При этом анализировался зарубежный опыт построения подобных систем, и отмечено успешное применение проектных подходов, включающих привлечение значительного числа разнопрофильных организаций, скоординированно работающих над решением поставленной задачи. Такое взаимодействие является оправданным и заслуживающим широкого распространения, поскольку создание систем прогнозирования наводнений носит принципиально междисциплинарный характер и требует участия специалистов различного профиля: как минимум - гидрологов и специалистов по автоматизации моделирования и современным информационным технологиям, по интегрированной обработке разнородных данных, в том числе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

С научно-методической точки зрения одной из основных проблем, возникающих при решении задач прогнозирования наводнений, является обеспечение высокого или требуемого качества

прогноза при имеющемся и фактически доступном объеме исходных данных.

Требования к составу и объему исходных данных определяются типом гидрологической задачи (например, прогноз половодья, паводка, нагона или волны прорыва) и величиной интервала прогноза. Долгосрочный и среднесрочный прогнозы требуют больших объемов исходных данных, таких как характеристики снежного покрова, свойства почв, растительности на водосборе, метеорологических характеристики, и др. В результате долгосрочного и среднесрочного прогнозирования формируются, как правило, обобщенные оценки гидрологической обстановки в анализируемом районе, *возможные* границы зон затопления территории при тех или других *сценариях* развития гидрологической ситуации, а также определение гидравлических параметров водного потока на затопленной территории. Но существующая степень достоверности исходных данных, прежде всего о климатических факторах, не позволяет достаточно точно оценить границы, глубины и время затопления каждого конкретного участка территории. А именно это зачастую необходимо тем лицам и организациям, которые должны использовать результаты прогноза при планировании и проведении аварийно-спасательных мероприятий, а также населению, оказавшемуся в зоне потенциального затопления.

В этом смысле особенное значение имеют методы, технологии и системы оперативного (краткосрочного) прогнозирования наводнений, основанные на численном моделировании перемещения волны половодий и паводков, предназначенные для получения высокоточных оценок параметров затоплений в интервале от нескольких часов до нескольких суток [4]. Состав гидрометеорологических исходных данных в данном случае определяется, прежде всего, достаточно точными результатами измерений текущего уровня и расхода воды при уже начавшемся процессе нарастания интенсивности водного потока.

Необходимо отметить, что именно высокоточное оценивание возможных границ затоплений и уровней подъема воды через заданный интервал времени принципиально отличает рассматриваемые задачи прогнозирования от задач *мониторинга* наводнений, фиксирующих границы зон *уже состоявшихся разливов воды*, и задач *геоинформационного моделирования* [7], позволяющих оценить *возможные* границы зон разлива воды при тех или других *потенциально возможных* уровнях ее подъема.

2. Общий состав систем оперативного прогнозирования наводнений. Научно-методическую основу прогнозирования наводнений составляет анализ количественных связей между

факторами, определяющими их возникновение (снегозапас, жидкие осадки, температура воздуха и т.п.), и гидравлическими параметрами половодного потока [6]. Инерционность природных процессов и наличие хорошо изученных взаимосвязей между ключевыми гидрометеорологическими параметрами, проявляющимися, как правило, с некоторым временным лагом, позволяет выполнять гидрологические прогнозы. В то же время хорошо проработанные и широко применяемые в настоящее время классические методы расчета уровней и расходов воды сами по себе зачастую не могут в оперативном режиме обеспечить пользователей необходимой упреждающей информацией об опасных изменениях водного режима на конкретных участках речных долин, особенно расположенных на значительном удалении от гидрологических постов. Кроме гидрологического моделирования, большое значение при разработке систем оперативного прогнозирования имеет применение современных информационных технологий, обеспечивающих оперативное получение и ввод исходных данных, их обработку и представление результатов на картографической основе в доступной и удобной форме, не требующей от пользователей специальных знаний для интерпретации результатов моделирования.

Можно выделить следующие основные проблемы, для решения которых требуется привлечение современных информационных технологий:

1. Проблема получения, автоматизации сбора и обработки исходных данных из всех доступных источников.

Здесь можно выделить три направления. Первое – необходимость широкого использования и автоматизации процедур обработки материалов космической и (или) авиационной съемки для предварительного формирования цифровой картографической основы анализируемого участка территории (с нанесением границ русла реки, подтопляемых объектов, защитных и гидротехнических сооружений, и т.д.); создания цифровых моделей рельефа (ЦМР), валидации и верификации гидрологических моделей [8, 9]. Второе – обеспечение расчетов результатами измерений расхода и уровня воды в условиях существующей разреженной сети гидрологических постов. В настоящее время достаточно хорошо отработаны и практически апробированы мобильные оперативно устанавливаемые регистраторы уровня, осуществляющие передачу результатов измерений по каналам связи с возможностью автоматической загрузки этих результатов в моделирующие комплексы [10]. Третье – использование технологий краудсорсинга для получения дополнительных данных для адаптации и

валидации гидрологических моделей [11]. Дополнительный эффект при решении рассматриваемой проблемы может быть получен за счет интегрированной обработки всех типов входных данных с синхронизацией моментов поступления той или иной исходной информации, в том числе данных дистанционного зондирования Земли [12–16].

2. Проблема выбора и адаптации используемых моделей и полимодельных комплексов.

Для достижения высокого качества прогнозов принципиально важным является использование при расчетах не одной, а комплекса (ансамбля) гидрологических моделей с возможностью выбора типа и параметров моделей в зависимости от особенностей участка моделирования, характера движения воды по руслу и пойме, состава исходных данных и ряда других факторов. Использование полимодельного подхода, предполагающего наличие комплекса гидрологических моделей и применение наиболее адекватной из них для каждой конкретной ситуации, может существенно повысить качество прогноза, но требует разработки и реализации новых методов автоматического (либо интерактивного) выбора типа модели и настройки ее параметров. Другими словами, требуется привнесение элементов искусственного интеллекта в архитектуру систем оперативного прогнозирования наводнений. Научно-методическую базу такого подхода составляет разрабатываемая авторами данной статьи теория квалиметрии моделей и полимодельных комплексов [17].

3. Проблема доступности результатов прогнозирования.

Основными параметрами наводнений, интересующими конечного пользователя, являются границы потенциально затопляемых территорий, глубины затопления и скорости течения в каждый момент времени на прогнозируемом интервале. Наиболее удобным способом представления результатов моделирования является их отображение в виде динамичной картины изменения границ, глубин затопления и скоростного поля потока с отражением на картографической основе объектов в зоне затопления. Крайне желательно, чтобы эти результаты были реализованы в виде Веб-сервисов, в том числе были доступны при работе с различными персональными цифровыми устройствами (в том числе, планшетными компьютерами, смартфонами и т.п.). В настоящее время накоплен достаточно большой опыт решения и задач этого класса [18].

Проведенный анализ показал, что в настоящее время существуют все необходимые условия для создания систем оперативного прогнозирования наводнений с описанными свойствами: с одной

стороны, это хорошо проработанные и неоднократно апробированные гидрологические модели для различных типов русел и речных долин [19–22], с другой стороны, получившие в последнее время развитие и практическую реализацию необходимые для создания таких систем информационные технологии, в том числе связанные с автоматизацией и интеллектуализацией моделирования [8]. Интеграция этих двух направлений приводит к созданию систем принципиально нового класса – *интеллектуальных информационных систем* оперативного мониторинга и упреждающего моделирования (далее в статье ИИС).

Как следует из изложенного, основными компонентами системы, обеспечивающей решение задач оперативного мониторинга и упреждающего моделирования наводнений, должны являться:

подсистемы получения, ввода и интегрированной обработки данных наземных измерений и материалов аэрокосмосъемки;

информационно-моделирующая подсистема, включающая комплекс гидрологических моделей, а также технологии выбора и адаптации указанных моделей;

подсистема визуализации и доступа к результатам моделирования на основе геопортальных решений и Веб – технологий.

3. Использование данных дистанционного зондирования Земли. При реализации первой из подсистем необходимо учитывать, что исходная информация для решения задач оперативного прогнозирования включает, как минимум, следующие компоненты: векторизованные топографические карты необходимого масштаба, цифровые модели рельефа (или материалы съемок для их разработки), данные режимных наблюдений за расходами и уровнями воды с гидрологических постов и данные специальных гидрологических съемок.

Учитывая обширность речных пойм и недостаток существующих наземных данных, для реализации первой из перечисленных подсистем целесообразно широко использовать методы дистанционного зондирования Земли, в том числе из космоса.

Данные ДЗЗ являются во многих случаях основой проведения мониторинга наводнений как самостоятельной задачи. Их включение в состав систем прогнозирования наводнений позволяет компенсировать недостаток наземных данных, и провести дополнительную адаптацию используемых моделей. Можно выделить следующие направления применения данных ДЗЗ при построении ИИС:

1) Актуализация картографической информации о современной инфраструктуре в речных долинах - границах населенных пунктов в

зоне затопления, дорогах, линейных сооружениях, влияющих на структуру потока на пойме, а также о конфигурации речных русел. Для этих целей необходимы космические снимки высокого пространственного разрешения в видимом диапазоне (получаемые, например, с космических аппаратов (КА) Ресурс-П, GeoEye, WordView), а также материалы аэрофотосъемки (получаемые, в том числе, с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА)) в период летне-осенней межени.

2) Получение информации о рельефе речных долин. Для этих целей перспективными являются ЦМР, полученные на основе высокодетальных космических и авиационных съемок. В настоящее время основные возможности получения более точных и пригодных к использованию моделей рельефа связаны с программами работы радарных КА TerraSAR и TanDem по созданию ЦМР Земли с разрешением по высоте порядка 2 м, а также применение для локальных участков съемок с БПЛА, или лазерного сканирования, обеспечивающих сантиметровую точность при построении ЦМР.

3) Калибровка и верификация гидродинамических моделей на основе информации о границах затопления территории с космических снимков [12] и по результатам краудсорсинга. Калибровочными параметрами гидродинамических моделей являются сведения о шероховатости подстилающей поверхности, определяющей гидравлическое сопротивление, и характеризуемой, как правило, коэффициентом шероховатости. Задание полей коэффициентов шероховатости в первом приближении проводится на основе дешифрирования и выделения областей с различным характером растительного покрова и микрорельефа и подбором для них значений коэффициентов по таблицам Срибного, Чоу, Карасева и др. [23]. Для этих целей применимы снимки как среднего, так и высокого разрешения. Обычно выделяется 5–6 основных типов подстилающей поверхности (русла, пашня, луг, лес, городская застройка). Для дешифрирования выделенных типов поверхности успешно разрабатываются и применяются методы и технологии автоматизированной обработки данных [24, 25].

Необходимо отметить, что максимально достоверные результаты расчетов могут быть получены только в результате совместной, интегрированной обработки различных типов данных, полученных в ходе наземных и аэрокосмических измерений.

4. Гидродинамические модели движения речного потока. Базовыми компонентами информационно-моделирующей подсистемы являются гидрологические модели. Независимо от способа конкретной

программной реализации в основу математических моделей движения водных потоков чаще всего положено решение системы уравнений Сен-Венана. Водный поток, при записи системы уравнений Сен-Венана, может быть представлен как в одномерной (характеристики потока осреднены по поперечному сечению), так и в двумерной (осреднение по глубине) схематизации.

К настоящему времени в разных странах разработано и применяется в практических расчетах значительное количество таких моделей: российские программные комплексы *Flood, River u STREAM_2D*, разработанные В.В. Беликовым, А.Н. Милитеевым и др. [26], *Mike 11, Mike 21* Датского гидрологического института [27], *Delft 3D* Института Deltares г. Дельфт (Нидерланды) [28], *HEC-RAS* Американского корпуса военных инженеров [29], *FLO-2D* [30], французский *TELEMAC* и др. Модели различаются, в основном, способами схематизации расчетной области (треугольные, четырехугольные и смешанные сетки), применяемыми расчетными схемами и методами (конечных разностей, конечных элементов), набором дополнительных блоков (распространение примесей, транспорт наносов и т.п.). В России наибольшее распространение получила двумерная модель *River* [6, 26, 31], обновленная версия которой выпущена в 2014 г. и зарегистрирована в Роспатенте под названием *STREAM_2D* [32].

При создании автоматизированных систем оперативного прогнозирования наводнений первоочередное значение имеет тот факт, что, как уже отмечалось выше, не существует универсальной модели, пригодной для описания процессов развития наводнений на различных по протяженности и конфигурации участках рек. При выборе гидродинамических моделей для решения задач прогнозирования наводнений целесообразна реализация многомодельного подхода: в зависимости от протяженности участка мониторинга и наличия исходной информации возможен выбор между одномерными гидродинамическими моделями для протяженных (100–1000 км) участков, и двумерными моделями для участков речных долин длиной менее 100 км при значительной ширине русел и пойм, их сложной конфигурации, расположении различных сооружений в руслах и на поймах. Значительного эффекта в экономии сил и средств при исследовании и мониторинге протяженных речных объектов можно достичь за счет совместного (гибридного, комплексного, многомасштабного) расчета по одномерной и двумерной моделям.

Поэтому одним из принципиальных вопросов создания информационных систем и систем прогнозирования наводнений

является формирование механизма выбора наиболее адекватной гидрологической модели для конкретных условий.

5. Методы выбора и адаптации гидрологических моделей. К настоящему времени достаточно хорошо развиты теория, методы и технологии создания и использования различных классов моделей (концептуальных, математических, логико-алгебраических, логико-лингвистических, их комбинаций и т.п.) сложных объектов (СЛО) и процессов (СлП) [33]. Вместе с тем, как показал проведенный анализ, в современных условиях практически остаётся нерешённой проблема оценивания качества моделей, анализа и упорядочения различных классов моделей, обоснованного синтеза новых моделей либо выбора из числа уже существующих моделей наиболее предпочтительных, предназначенных для решения конкретных прикладных задач. Актуальность данной проблемы в ещё большей степени усиливается в том случае, когда исследуемый объект описывается не одной моделью, а полимодельным комплексом, в состав которого могут входить разнородные и комбинированные модели, каждая из которых должна оцениваться своей системой показателей [33]. Дополнительную сложность указанная проблема приобретает в том случае, когда при оценивании качества моделей приходится учитывать фактор времени. Это касается, прежде всего, тех объектов-оригиналов, у которых под действием различных причин (объективных, субъективных, внутренних, внешних и т.п.) наблюдается существенная структурная динамика [34]. В этих условиях для того, чтобы используемые модели сохраняли свою точность и полезность, необходимо проводить их адаптацию к изменяющимся условиям. Для этого необходимо заранее, на этапе синтеза модели, в состав её параметров и структур вводить дополнительные элементы, которые на этапе непосредственного использования модели позволят управлять ее качеством – снизят чувствительность модели и соответствующих показателей ее качества к изменениям состава, структуры и содержания исходных данных.

К настоящему времени в рамках разрабатываемой авторами общей квалиметрии моделей и полимодельных комплексов создано несколько технологий их структурно-параметрической адаптации. Одна из них применительно к задачам оперативного прогнозирования наводнений представлена на рисунке 1.

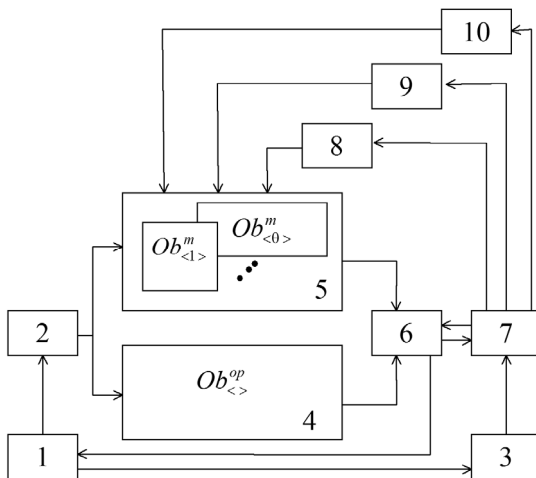


Рис. 1. Обобщённая технология оценивания и управления качеством гидрологических моделей

На данном рисунке приняты следующие условные обозначения: 1 — формирование целей и требований к результатам оперативного прогнозирования наводнений; 2 — получение (формирование) входных данных (сценариев входных воздействий); 3 — формирование целей моделирования; 4 — моделируемая система (объект-оригинал $Ob_{<\theta>}^{op}$); 5 — модели ($Ob_{<\theta>}^m$) исследуемой системы $Ob_{<\theta>}^{op}$; 6 — оценивание качества модели (полимодельных комплексов); 7 — управление качеством моделей; 8 — управление параметрами моделей; 9 — управление структурами моделей; 10 — изменение концепции описания моделей (изменение границ в паре объект-среда).

При построении систем оперативного прогнозирования наводнений приведенная технология реализуется через создание интеллектуального интерфейса (ИИ), на базе которого в автоматическом (либо интерактивном) режиме осуществляется объединение разнородных наземно-космических данных, экспертных знаний, используемых далее при прогнозировании.

Основным предназначением ИИ является выбор и адаптация конкретной модели расчёта зон распространения воды и глубин затоплений на основе контекстной информации (точности исходных данных, динамики развития наводнения, требований к оперативности получения результата и т.д.). В качестве научной основы адаптации гидрологических моделей выбраны методы и алгоритмы, интенсивно

развиваемые в настоящее время в рамках теории эволюционного моделирования [35].

В целом, создание интеллектуального интерфейса обеспечивает получение синергетического эффекта от совместной обработки и использования разнородных наземно-космических данных и применения комплекса моделей для оценки зон возможных затоплений.

6. Архитектура интеллектуальных информационных систем.

Как следует из описанного выше состава ИИС, она должна обеспечивать гибкое взаимодействие целого ряда компонентов, включая существующие и перспективные программные модули, реализующие гидрологические модели, модули обработки входных данных и визуализации результатов прогнозирования, управляющие модули, и др. С этой точки зрения целесообразно построение ИИС на базе сервис-ориентированной архитектуры (Software as a Service, SaaS) [36]. В этом случае основу предлагаемой ИИС составляют три компонента: управляющее приложение, сервисная шина и интеллектуальный интерфейс.

Общий состав системы приведен на рисунке 2.

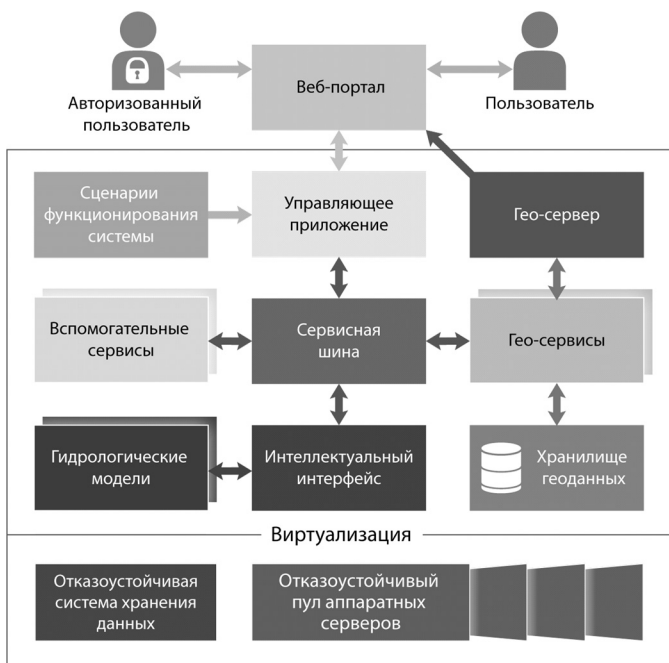


Рис. 2. Структура ИИС

Управляющее приложение предназначено для реализации логики работы системы, которая определяется взаимосвязью операций сбора, обработки данных, опубликования и визуализации данных.

Сервисная шина в данном случае – это программное ядро, хранящее информацию об имеющихся в системе сервисах. Под сервисами понимаются отдельные слабо связанные программные модули, реализующие технологические операции, например, сбор данных от внешних датчиков, обработка космоснимка, публикация векторной карты на геосервере, и другие.

Сервис-ориентированная архитектура системы оперативного прогнозирования наводнений и свойственная ей слабая связность программных модулей позволяют повысить гибкость и перевести разрабатываемую систему в формат «облачного» приложения, реализуемого как сервис, посредством процесса виртуализации ресурсов аппаратного обеспечения. В частности, модули, реализующие алгоритмы обработки данных, прогнозирования и поддержки принятия решений, могут быть значительно распределены территориально и структурно, выполняться на вычислительных мощностях, находящихся не только в разных городах, но и принадлежащих разным организациям. При этом синтезированная система прогнозирования точки зрения конечного пользователя будет функционировать как единое целое локальное решение.

Обязательное требование, реализуемое в рассматриваемой системе – наличие режима автоматической работы, предполагающего выполнение в заданные интервалы времени полного рабочего цикла (сбор данных, моделирование гидрологических процессов, визуализация результатов) без вмешательства оператора.

7. Подсистема доступа к результатам прогнозирования.

Оперативность анализа ситуаций, связанных с наводнениями, и принятие мер по управлению этими ситуациями зачастую зависят от удобства и оперативности доступа к результатам прогнозирования.

В существующих в настоящее время отечественных программных комплексах в результате работы гидрологических моделей, как правило, формируется массив данных, подробно описывающих прогноз наводнений в виде таблиц, матриц уровней, списков значений множества показателей, и т.д. Эти данные могут быть интерпретированы только специалистами. В то же время у широкого круга заинтересованных лиц и организаций существует потребность *оперативного получения* и анализа данных о предстоящем наводнении. Для устранения этого противоречия необходима подсистема

интерпретации, визуализации и распространения информации о прогнозе наводнения.

Ключевой особенностью указанной подсистемы является обеспечение доступности результатов прогнозирования, которая включает:

- доступность интерпретации данных, заключающуюся в автоматизации процесса преобразования большого объёма разнородных технических данных в понятные неспециалисту графические образы (контур затопления на карте местности, графики и диаграммы);

- территориальную доступность информации, достигаемую через распространение результатов прогноза по каналам связи: Интернет, телефонные сети, системы оповещений о чрезвычайных ситуациях;

- доступность накопленного архива прогнозной и реальной информации, необходимой для проведения верификации и корректировки гидрологических моделей и выполнения аналитических работ.

Перечисленные особенности реализуются за счёт применения набора стандартизованных протоколов хранения, обработки и передачи информации.

Основой для хранения пространственно-временной информации является пространственная база данных (БД). К настоящему времени многие классические системы управления базами данных (СУБД) имеют поддержку пространственных данных: OracleSpatial, Microsoft SQL Server, PostgreSQL (расширение PostGIS), MySQL (поддержка типа данных geometry). Пространственные БД позволяют хранить целостный пространственный объект (геометрию и атрибутивную информацию). Кроме того, такие БД позволяют выполнять пространственные аналитические запросы (пересечение, объединение, вычисление площадей и расстояний и т.п.). Таким образом, становится возможным автоматизировать процессы обработки и анализа массивов данных, поступающих от гидрологических моделей.

Несмотря на то, что геоинформационные системы (ГИС) успешно используются специалистами на протяжении уже более 40 лет, в повседневную жизнь обычных граждан, не специалистов, они широко так и не вошли из-за сложности работы и дороговизны. Важным шагом на пути к созданию общедоступных геоинформационных сервисов стало бурное развитие Веб-картографии. Применение Веб-картографии для распространения как прогнозной, так и архивной информации о наводнениях, значительно расширяет круг её потребителей. Достаточно

иметь терминал (смартфон, планшетный или персональный компьютер) и доступ в Интернет для того, чтобы оперативно получить актуальную информацию в доступном для понимания виде. В настоящее время предлагается широкий выбор решений, на основе которых возможно построение геоинформационных сервисов: GeoServer; MapServer; ArcGISServer; OracleMapViewer и другие. Использование стандартных протоколов для передачи картографических данных позволяет не только предоставлять информацию конечным пользователям, но и обмениваться данными между различными профессиональными геоинформационными системами. В предлагаемой системе использование SaS и технологий Веб-картографии даёт возможность организовать доступ к оперативной информации ИИС практически из любой точки пространства и с любого устройства при наличии доступа к сети Интернет.

Новые перспективы для создания комплексного решения по доведению результатов прогнозов и оповещению заинтересованных лиц открывают возможности интеграции со сторонними телекоммуникационными системами. Программная интеграция с сервисами провайдеров сотовой связи упрощает и удешевляет процесс массовой рассылки коротких текстовых сообщений (SMS) на мобильные телефоны заинтересованных лиц. При необходимости возможна также интеграция с городской или сельской системой уличного оповещения о чрезвычайных ситуациях.

Основное преимущество реализованных в ИИС способов межсистемного взаимодействия заключается в сведении к минимуму человеческого фактора в цепочке доведения критически важной информации до потребителя. Так, известны случаи катастрофических природных явлений, в ходе которых, по словам специалистов, неудовлетворительная работа системы оповещений не позволила сократить причинённый ущерб (Крымск, 2012, <http://lenta.ru/news/2012/07/09/pay/>).

Внешний вид разработанного на основе перечисленных принципов геопортала показан на рисунке 3.

В основе интеграции и координации частных моделей лежит темпоральная модель данных (ТМД), позволяющая хранить сведения о жизненном цикле данных. ТМД применяется для хранения как исходных данных (гидрометеорологические, результаты тематической обработки спутниковых снимков), так и результатов моделирования. Доступ пользователя к темпоральным данным реализован в виде временной шкалы в Веб-интерфейсе. Используя этот механизм, пользователь может просматривать различные данные (исходные,

исторические и прогнозируемые) без специальных знаний (например, формального языка запросов), просто перемещая ползунок шкалы.



Рис. 3. Внешний вид экрана геопортала для представления результатов прогнозирования наводнений

Накопленная в пространственных базах данных информация может быть доступна как специалистам-гидрологам, так и другим заинтересованным лицам и организациям, в том числе службам по чрезвычайным ситуациям. Предоставление пользователям Веб-интерфейса с интуитивно понятными элементами для формирования поискового запроса, управления временной шкалой, выполнения пространственных аналитических операций позволяет повторно использовать данные о наводнениях для решения широкого круга задач: от территориального планирования до страхования жизни и имущества граждан.

8. Результаты апробации прототипа интеллектуальных информационных систем. Практическая апробация описанной системы оперативного прогнозирования наводнений проведена в ряде регионов нашей страны и за рубежом. Наиболее показательные результаты получены во время наводнения 2013 г. на р. Даугава (Латвия) в районе г. Даугавпилса. При этом наилучшие результаты с точки зрения расчета и прогнозирования зон затоплений и реализации оперативного оповещения населений и организаций получены для интервала прогноза 12–24 часа.

Эксперимент проводился совместно Санкт-Петербургским институтом информатики и автоматизации РАН и Рижским техническим университетом (Латвия) [37] в рамках выполнения проекта по программе приграничного сотрудничества ESTLATRUS.

Общая структура проведенного эксперимента приведена на рисунке 4.

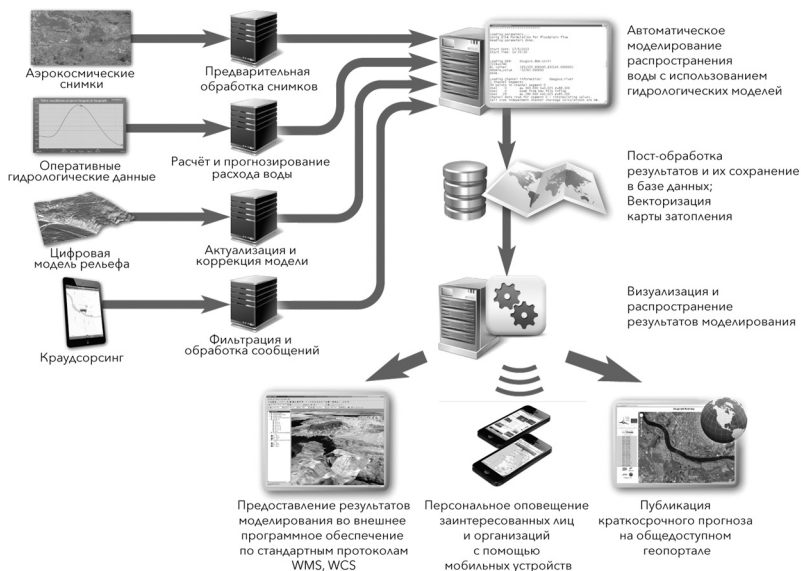


Рис. 4. Схема эксперимента по апробации системы оперативного прогнозирования наводнений

В качестве гидрологического модуля при прототипировании системы оперативного прогнозирования наводнений была использована одна из версий модели LISFLOOD-FP [38]. Тестовое моделирование проводилось на участке реки Даугава в районе города Даугавпилс (Латвия) протяжённостью около 20 км. Интервал времени для проведения тестирования был выбран таким образом, чтобы охватить наиболее вероятный период возникновения весеннего паводка. Процесс подготовки моделирования включал формирование следующих исходных данных:

Цифровую модель рельефа, созданную методом лазерного сканирования.

Морфометрические характеристики русла реки. Для одномерной модели движения воды по русловой сети построена упрощённая модель русла Даугавы на выбранном участке. Данные по

ширине русла реки сформированы на основе спутниковых снимков региона в период межени. Данные о глубине реки были предоставлены гидрологической службы г. Даугавпилса.

Уровень и расход воды. На момент проведения тестового моделирования на выбранном участке Даугавы функционировал один гидрологический пост, способный в автоматическом режиме ежедневно получать данные об уровне воды. Однако для выполнения расчётов данных об уровне воды недостаточно, требуется знать расход воды в реке. Метеорологическая служба в обычном режиме выполняет измерение расхода воды в реке с периодичностью два раза в месяц, и в любом случае не чаще одного раза в сутки. Для получения данных о расходах воды применялась модель, построенная специалистами из Рижского технического университета профессором Галиной Меркурьевой и докторантом Виталием Большаковым. При этом использованы методы линейной регрессии и символьной регрессии с применением генетического программирования. Для обеспечения оперативного доступа к результатам расчета создан Веб-сервис пересчёта уровня воды в реке в расход. Таким образом, значение расхода воды в реке стало доступным ежедневно.

Информационно-моделирующая подсистема была развёрнута в Научно-техническом центре Инновационных космических технологий СПИИРАН. Ежедневно происходил приём информации от созданной системы сбора и первичной обработки данных, и выполнялось моделирование. По его результатам формировался прогноз затопления территории на 12 часов вперёд. Результат представлял собой геопривязанную растровую карту с информацией о глубине потока на затопленной территории (рисунк 5).

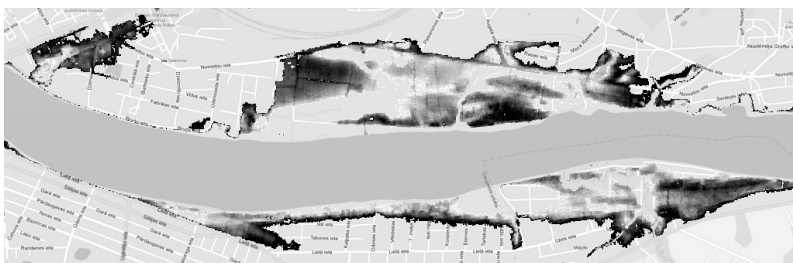


Рис. 5. Растровая карта затопленной территории

Созданная подсистема визуализации выполняла несколько этапов постобработки полученных результатов моделирования. Прежде всего, растровая карта затопления автоматически векторизовалась для обеспечения совместимости со сторонними геоинформационными

системами. Векторная карта и соответствующая метка времени моделирования автоматически сохранялись в базе данных для формирования архива информации о динамике наводнения.

Второй этап визуализации — размещение результатов моделирования на геопортале. Данный сервис предоставлял возможность просмотра слоёв с контурами зоны затопления от начала процесса моделирования до 12-ти часового прогноза. При этом для наглядного представления динамики процесса наводнения допускалось наложение слоёв, соответствующих различным меткам времени.

Следующим этапом работы системы явилось автоматическое оповещение лиц, чье недвижимое имущество попадало в прогнозируемую зону затопления. Иллюстрация данного сервиса представлена на рисунке 6.

Индивидуальное информирование

Интеграция результатов моделирования затоплений с электронной адресной системой

Дома в расчётной зоне затопления

Уп. Речная, д. 1	Петрова И.В.	(81270) 78482
Уп. Речная, д. 3	Петрова А.И.	(81270) 78347
Уп. Речная, д. 5	Сидорова К.Р.	(81270) 78289
Уп. Речная, д. 7	Смирнов Е.П.	(81270) 78654
Уп. Речная, д. 9	Кузнецов Р.Г.	(81270) 78951

Автоматическое оповещение населения (автодозвон, SMS)

Рис. 6. Иллюстрация сервиса оперативного оповещения.

Верификация модели осуществлялась на основе использования космических снимков с КА Radarsat-1. Снимок, полученный 23 марта 2013 года, позволил уточнить текущее состояние русла реки. В дальнейшем была использована технология социальных сетей сбора информации, известная под названием «краудсорсинг». Для реализации данной технологии сформирован сервис <http://daugava.crowdmap.com> на открытой платформе «Ushahidi». Сервис представляет возможность любому пользователю разместить фотографию, привязанную к географическим координатам, и соответствующий комментарий. Данные фотоснимки позволили провести оперативную калибровку модели и уточнить прогноз распространения воды.

Основным итогом проведенной апробации стало подтверждение достаточно высокой точности работы прототипа системы - прогноз затопления значимых объектов инфраструктуры совпал с реальными данными не менее чем на 95%. Высокий уровень достоверности прогноза был достигнут за счёт постоянной актуализации входных параметров (в том числе с использованием технологий краудсорсинга – рисунок 7) для ситуационно выбранных гидрологических моделей. Кроме того, получили экспериментальное подтверждение правильность принятых решений по составу модулей и требованиям к процедурам получения исходных данных, а также подтверждена работоспособность заявленных сервисов.



Рис. 7. Динамика развития наводнения. Фотоснимки с интервалом в сутки

Заключение. В данной статье представлены разработанные к настоящему времени основы построения и апробированные решения по созданию перспективных интеллектуальных информационных продуктов и сервисов оперативного прогнозирования наводнений.

Данные решения и сервисы реализованы в виде системы оперативного прогнозирования наводнений, базирующейся на сервис-ориентированной архитектуре и интегрированной обработке данных наземно-космического мониторинга. Основными элементами системы являются комплекс гидрологических моделей и интеллектуальный интерфейс, обеспечивающий выбор моделей расчета для конкретных условий прогноза и исходных данных. Применение современных интеллектуальных информационных технологий и средств доступа пользователей к результатам прогноза обеспечивают возможность их широкого использования при совершенствовании систем гидрометеорологического моделирования, мониторинга и прогнозирования наводнений в нашей стране.

Литература

1. *Порфирьев Б.Н., Макарова Е.А.* Экономическая оценка ущерба от природных бедствий и катастроф // Вестник Российской академии наук. 2014. Том 84. №12. С. 1059–1072.
 2. *Порфирьев Б.Н.* Экономические последствия катастрофического наводнения на Дальнем Востоке в 2013 г. // Вестник Российской академии наук. 2015. Том 85. №22. С. 128–137.
 3. *Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Христофоров А.В.* Мониторинг гидрологических процессов и повышение безопасности водопользования // М.: Географический ф-т МГУ. 2011. 367 с.
 4. *Васильев О.Ф.* Создание систем оперативного прогнозирования паводков и паводков // Вестник Российской академии наук. 2012. Том 82. №3. С. 237–242.
 5. *Данилов-Данильян В.И., Гельфан А.Н.* Экстраординарное наводнение в бассейне реки Амур // Вестник Российской академии наук. 2014. Том 84. №9. С. 817–823.
 6. *Алабян А.М., Алексеевский Н.И., Евсеева Л.С., Жук В.А., Иванов В.В., Сурков В.В., Фролова Н.Л., Чалов Р.С., Чернов А.В.* Генетический анализ причин весеннего затопления долины Малой Северной Двины в районе г. Великого Устюга // Эрозионные и русловые процессы. 2004. Том 14. С. 104–130.
 7. *Новаковский Б.А., Колесникова О.Н., Прасолова А.И., Пермяков Р.В.* Геоинформационное моделирование наводнений по материалам космической съемки (на примере г. Бийск, Алтайский край) // Геоинформатика. 2015. №1. С. 15–20.
 8. *Зеленцов В.А., Петухова Ю.Ю., Потрясаев С.А., Рогачев С.А.* Технология оперативного автоматизированного прогнозирования разлива реки в период весенних паводков // Труды СПИИРАН. 2013. Вып. 6(29). С. 40–57.
 9. *Merkuryeva G.V., Merkuruyev Yu. A., Lektavers A., Sokolov B.V., Potryasaev S.A., Zelentsov V.A.* Advanced timer flood monitoring, modeling and forecasting // Journal of Computational Science. 2014.
 10. *Шержуков Е.Л.* Региональные системы мониторинга опасных природных и техногенных явлений на примере Краснодарского края // Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз. Материалы всероссийской научной конференции. Новочеркасск: Изд. ЛИК. 2013. С. 261–265.
 11. *Romanovs A., Sokolov B.V., Lektavers A., Potryasaev S., Shkodyrev V.* Crowdsourcing interactive technology for natural-technical objects integrated monitoring // Speech and Computer. LNCS vol. 8773. Heidelberg: Springer. 2014. pp. 176–183.
- 24 SPIIRAS Proceedings. 2015. Issue 4(41). ISSN 2078-9181 (print), ISSN 2078-9599 (online)
www.proceedings.spiiras.nw.ru

12. *Крыленко И.Н.* Опыт применения космических снимков для компьютерного моделирования затопления территории при наводнениях на реках // Земля из космоса – наиболее эффективные решения. II Международная конференция: тезисы докладов. М.: Изд-во Бином, 2005. С. 104–106.
13. *Merkuryev Y., Okhtilev M., Sokolov B., Trusina I., Zelentsov V.* Intelligent Technology for Space and Ground based Monitoring of Natural Objects in Cross-Border EU-Russia Territory // Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2012). Munich. Germany. 2012. pp. 2759–2762.
14. *Sokolov B.V., Okhtilev M.Yu., Zelentsov V.A., Maslova M.A.* The Intelligent Monitoring Technology Based on Integrated Ground and Aerospace Data // Proceedings of the Int. Conf. on Harbor Maritime and Multimodal Logistics M&S. Vienna, Austria. 2012. pp. 112–117.
15. *Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., Соколов Б.В.* Интеллектуальная информационная технология решения задач интегрированного наземно-космического мониторинга // Сборник тезисов шестой международной конференции «Земля из космоса — наиболее эффективные решения». М.:ИТЦ СканЭкс. НП «Прозрачный мир». 2013. С. 143–145.
16. *Зеленцов В.А., Ковалев А.П., Охтлев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Методология создания и применения интеллектуальных информационных технологий наземно-космического мониторинга сложных объектов // Труды СПИИРАН. 2013. Вып. 5(28). С. 7–81.
17. *Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов // Известия РАН. Теория и системы управления. 2004. №6. С. 5–16.
18. *Зеленцов В.А., Зюбан А.В., Потрясаев С.А., Крыленко И.Н., Хименко В.И.* Формирование системы обработки, хранения и визуализации данных дистанционного зондирования на базе сервис-ориентированной архитектуры // Экология. Экономика. Информатика. Сборник статей: в 2 т. Ростов–на–Дону: Изд. ЮФУ. 2014. Том 2. С. 71–75.
19. *Алексеевский Н.И., Крыленко И.Н., Беликов В.В., Кочетков В.В., Норин С.В.* Численное гидродинамическое моделирование наводнения в г. Крымске 6-7 июля 2012 г. // Гидротехническое строительство. 2013. №3. С. 29–35.
20. *Лебедева С.В., Алабян А.М., Крыленко И.Н., Федорова Т.А.* Наводнения в устье Северной Двины и их моделирование // Геориск. 2015. №1. С. 18–25.
21. *Калугин А.С., Крыленко И.Н.* Математическое моделирование движения паводочной волны при использовании исходной информации различной детальности // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2014. №3. С. 38–57.
22. *Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Завадский А.С., Крыленко И.Н.* Оценка опасности гидрологических явлений на региональном и локальном уровнях // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2014. №3. С.58–74.
23. *Барышников Н.Б.* Гидравлические сопротивления речных русел // СПб.: Изд-во РГГМУ. 2003. 147 с.
24. *Sokolov B.V., Zelentsov V.A., Brovkina O., Mochalov V.F., Potrysaev S.A.* Complex Objects Remote Sensing Forest Monitoring and Modeling // Modern Trends and Techniques in Computer Science: Proceedings of the 3rd Computer Science On-line Conference 2014 (CSOC 2014). London: Springer. 2014. vol. 285. pp. 445–453.
25. *Sokolov B.V., Zelentsov V.A., Yusupov R.M., Merkurjev Yu.A.* Multiple models of information fusion processes: Quality definition and estimation // Journal of Computational Science. 2014. vol. 5. Issue 3. pp. 380–386.

26. *Беликов В.В., Милитеев А.Н.* Двуслойная математическая модель катастрофических паводков // В сб. "Вычислительные технологии". Новосибирск. 1992. Т. 1. №3. С. 167–174.
27. *Skotner C. et al.* MIKE FLOOD WATCH - managing real-time forecasting // URL: http://dhigroup.com/upload/publications/mike11/Skotner_MIKE_FLOOD_watch.pdf. (дата обращения: 20.05.2015).
28. Delft3D-FLOW Version 3.06 User Manual. WL | Delft hydraulics. 2001.
29. HEC-RAS river analysis system User's Manual. 2002.
30. FLO-2D. Version 2006.01 User Manual. URL: <http://www.flo-2d.com> (дата обращения: 25.05.2015).
31. *Алабян А.М., Алексеевский Н.И., Евсеева Л.С., Жук В.А., Иванов В.В., Сурков В.В., Фролова, Чалов Р.С. Чернов А.В.* Генетический анализ причин весеннего затопления долины Малой Северной Двины в районе г. Великого Устюга // В сб. Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ. 2003. Вып. 14. С. 105–131.
32. *Таратунин А.А.* Наводнения на территории Российской Федерации / Под ред. Н.И. Коронкевича // Екатеринбург: Изд-во ФГУП Рос НИИВХ. 2008. 432 с.
33. *Беликов В.В., Кочетков В.В.* Программный комплекс STREAM_2D для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014612181. Российское агентство по интеллектуальной собственности. 2014.
34. *Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Применение алгебраического подхода в квалиметрии моделей и полимодельных комплексов // Материалы Шестой всероссийской научно-практической конференции "Имитационное моделирование. Теория и практика" ИММОД-2013. Казань: Изд-во "Фэн" Академии наук РТ. 2013. Т. 1. С. 68–79.
35. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов // М.: Наука. 2006. 410 с.
36. *Букатова И.И.* Эволюционное моделирование и его приложения // М.: Наука. 1979. 231 с.
37. *Laurent S. St., Johnston J., Dumbil E.* Programming Web Services with XML-RPC // O'Reilly Media, Inc. 2001. 213p.
38. *Merkuryev Y., Merkuryeva G., Sokolov B., Zelentsov V.* Information Technologies and Tools for Space-Ground Monitoring of Natural and Technological Objects // Riga Technical University. 2014. 110 p.
39. *Van der Knijff J.M., Younis J., De Roo A.P.J.* LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river-basin scale water balance and flood simulation // International Journal of Geographical Information Science. 2010. vol. 24. no. 2. pp. 189–212.

References

1. Porfir'ev B.N., Makarova E.A. [Economic assessment of damage from natural disasters and accidents]. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk — Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2014. Issue 84. vol. 12. pp. 1059–1072. (In Russ.).
2. Porfir'ev B.N. [Economic consequences of a catastrophic flood in the Far East in 2013]. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk — Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2015. Issue 85. vol. 22. pp. 128–137. (In Russ.).
3. *Alekseevskij N.I., Frolova N.L., Hristoforov A.V.* *Monitoring gidrologicheskikh processov i povyshenie bezopasnosti vodopol'zovaniya* [Monitoring of hydrological processes and increase of safety of water use]. М.: Географический ф-т МГУ. 2011. 367 p. (In Russ.).

4. Vasil'ev O.F. [Creation of systems of expeditious forecasting of high waters and floods]. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk — Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2012. Issue 82. vol. 3. pp. 237–242. (In Russ.).
5. Danilov-Danil'jan V.I., Gel'fan A.N. [Extraordinary flood in a river basin Amur]. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk — Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2014. Issue 84. vol. 9. pp. 817–823. (In Russ.).
6. Alabjan A.M., Alekseevskij N.I., Evseeva L.S., Zhuk V.A., Ivanov V.V., Surkov V.V., Frolova N.L., Chalov R.S., Chernov A.V. [The reasons genetic analysis of spring flooding of the Small Northern Dvina valley around of Velikiy Ustyug]. *Jerozionnye i ruslovyje processy — Erosive and riverbed processes*. 2004. Issue 14. pp. 104–130. (In Russ.).
7. Novakovskij B.A., Kolesnikova O.N., Prasolova A.I., Permjakov R.V. [Geoinformation modeling of floods on materials of space shooting (on the example of Biysk, Altai Krai)]. *Geoinformatika — Geoinformatika*. 2015. vol. 1. pp. 15–20. (In Russ.).
8. Zelentsov V.A., Petukhova Ju.Ju., Potryasaev S.A., Rogachev S.A [Technology of the operational automated forecasting of river flood in the spring floods period]. *Trudy SPIIRAN — SPIIRAS Proceedings*. 2013. vol. 6(29). pp. 40–57. (In Russ.).
9. Merkuryeva G.V., Merkuryev Yu. A., Lectauers A., Sokolov B.V., Potryasaev S.A., Zelentsov V.A. Advanced timer flood monitoring, modeling and forecasting. *Journal of Computational Science*. 2014.
10. Sherzhukov E.L. [Regional systems of monitoring of the dangerous natural and technogenic phenomena on the example of Krasnodar Krai]. *Vodnaja stihija: opasnosti, vozmozhnosti prognozirovanija, upravlenija i predotvrashhenija ugroz. Materialy vsrossijskoj nauchnoj konferencii*. [Water elements: dangers, possibilities of forecasting, management and prevention of threats. Materials of the All-Russian scientific conference]. Novochoerkassk: Izd. LIK. 2013. pp. 261–265. (In Russ.).
11. Romanovs A., Sokolov B.V., Lektuers A., Potryasaev S., Shkodyrev V. Crowdsourcing interactive technology for natural-technical objects integrated monitoring. *Speech and Computer*. LNCS vol. 8773. Heidelberg: Springer. 2014. pp. 176–183.
12. Krylenko I.N. [Experience of application of space pictures for computer modeling of flooding of the territory at floods on the rivers] *Zemlja iz kosmosa — naibolee jeffektivnye reshenija. II Mezhdunarodnaja konferencija: tezisy dokladov* [The earth from space — the most effective decisions. II International conference: theses of reports]. M.: Izd-vo Binom. 2005. pp. 104–106. (In Russ.).
13. Merkuryev Y., Okhtilev M., Sokolov B., Trusina I., Zelentsov V. Intelligent Technology for Space and Ground based Monitoring of Natural Objects in Cross-Border EU-Russia Territory. *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2012)*. Munich. Germany. 2012. pp. 2759–2762.
14. Sokolov B.V., Okhtilev M.Yu., Zelentsov V.A., Maslova M.A. The Intelligent Monitoring Technology Based on Integrated Ground and Aerospace Data // *Proceedings of the Int. Conf. on Harbor Maritime and Multimodal Logistics M&S*. Vienna. Austria. 2012. pp. 112–117.
15. Zelentsov V.A., Potryasaev S.A., Sokolov B.V. [Intellectual information technology of the problems solution of the integrated land and space monitoring] *Sbornik tezisov shestoj mezhdunarodnoj konferencii «Zemlja iz kosmosa — naibolee jeffektivnye reshenija»*. [Collection of theses of sixth international conference "The Earth from Space — the Most Effective Decisions"]. M.: ITC SkanEx, NP «Prozrachny mir». 2013. pp. 143–145. (In Russ.).

16. Zelentsov V.A., Kovalev A.P., Okhtilev M.Ju., Sokolov B.V., Jusupov R.M. [Methodology of creation and application of intellectual information technologies of space-ground monitoring of difficult objects]. *Trudy SPIIRAN — SPIIRAS Proceedings*. 2013. vol. 5(28). pp. 7–81. (In Russ.).
17. Sokolov B.V., Jusupov R.M. [Conceptual bases of estimation and quality analysis of models and polymodel complexes]. *Izvestija RAN. Teorija i sistemy upravlenija - Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2004. no. 6. pp. 5–16. (In Russ.).
18. Zelentsov V.A., Zjuban A.V., Potryasaev S.A., Krylenko I.N., Khimenko V.I. [Formation of system of processing, storage and visualization of data of remote sensing on base of service-oriented architecture]. *Jekologija. Jekonomika. Informatika. Sbornik statej: v 2 t. — Ecology. Economy. Informatics. Collection of articles: in 2 vol.* Rostov-na-Donu: Izd. JuFU. 2014. Issue 2. pp. 71–75. (In Russ.).
19. Alekseevskij N.I., Krylenko I.N., Belikov V.V., Kochetkov V.V., Norin S.V. [Numerical hydrodynamic modeling of a flood in Krymsk on July 6-7, 2012]. *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo — Hydrotechnical construction*. 2013. no. 3. pp. 29–35. (In Russ.).
20. Lebedeva S.V., Alabjan A.M., Krylenko I.N., Fedorova T.A. [Floods to the mouth of Northern Dvina and their modeling]. *Georisk - Georisk*. 2015. vol. 1. pp. 18–25. (In Russ.).
21. Kalugin A.S., Krylenko I.N. [Mathematical modeling of the movement of a pavodochny wave when using initial information of various detail]. *Vodnoe hozjajstvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie — Water management of Russia: problems, technologies, management*. 2014. vol. 3. pp. 38–57. (In Russ.).
22. Frolova N.L., Agafonova S.A., Zavadskij A.S., Krylenko I.N. [Danger assessment of the hydrological phenomena at the regional and local levels]. *Vodnoe hozjajstvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie — Waterv management of Russia: problems, technologies, management*. 2014. vol. 3. pp. 58–74. (In Russ.).
23. Baryshnikov N.B. *Gidravlicheskie soprotivlenija rechnyh rusel* [Hydraulic resistance of river courses]. SPb.: Izd-vo RGGMU. 2003. 147 p. (In Russ.).
24. Sokolov B.V., Zelentsov V.A., Brovkina O., Mochalov V.F., Potryasaev S.A. Complex Objects Remote Sensing Forest Monitoring and Modeling. Modern Trends and Techniques in Computer Science: Proceedings of the 3rd Computer Science On-line Conference 2014 (CSOC 2014). London: Springer. 2014. vol. 285. pp. 445–453.
25. Sokolov B.V., Zelentsov V.A., Yusupov R.M., Merkurjev Yu.A. Multiple models of information fusion processes: Quality definition and estimation. *Journal of Computational Science*. 2014. vol. 5. Issue 3. pp. 380–386.
26. Belikov V.V., Militeev A.N. [Two-layer mathematical model of catastrophic floods] *V sb. «Vychislitel'nye tehnologii» — Collection of papers «Computing technologies»*. Novosibirsk. 1992. Issue 1. vol. 3. pp. 167–174. (In Russ.).
27. Skotner C. et al. MIKE FLOOD WATCH — managing real-time forecasting. Available at: http://dhigroup.com/upload/publications/mike11/Skotner_MIKE_FLOOD_watch.pdf. (accessed: 20.05.2015).
28. Delft3D-FLOW Version 3.06 User Manual. WL | Delft hydraulics. 2001.
29. HEC-RAS river analysis system User's Manual. 2002.
30. FLO-2D. Version 2006.01 User Manual. <http://www.flo-2d.com> (accessed: 25.05.2015).
31. Alabjan A.M., Alekseevskij N.I., Evseeva L.S., Zhuk V.A., Ivanov V.V., Surkov V.V., Frolova, Chalov R.S. Chernov A.V. [The reasons genetic analysis of spring flooding of the valley of Small Northern Dvina around of Velikiy Ustyug]. *V sb. Jerozija pochv i ruslovyje process — Collection of papers Erosion of soils and riverbed processes*. M.:Izd-vo MGU. 2003. vol. 14. pp. 105–131. (In Russ.).

32. Taratunin A.A. *Navodnenija na territorii Rossijskoj Federacii* [Floods in the territory of the Russian Federation. Edired by N.I. Koronkevich]. Ekaterinburg: Izd-vo FGUP Ros NII VH. 2008. 432 p. (In Russ.).
33. Belikov V.V., Kochetkov V.V. [The program STREAM_2D complex for calculation of currents, deformations of a bottom and transfer of pollution in open streams]. Certificate on the state registration of the computer programs no. 2014612181. The Russian agency on intellectual property. 2014. (In Russ.).
34. Mikoni S.V., Sokolov B.V., Jusupov R.M. [Application of algebraic approach in a kvalimetriya of models and polymodel complexes] *Materialy Shestoj vsrossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii "Imitacionnoe modelirovanie. Teorija i praktika" IMMOD-2013* [Proceedings of the Sixth All-Russian scientific and practical conference "Simulation. Theory and practice" IMMOD-2013]. Kazan': Izd-vo "Fjen" Akademii nauk RT. 2013. Issue 1. pp. 68–79. (In Russ.).
35. Ohtilev M.Ju., Sokolov B.V., Jusupov R.M. *Intellectual'nye tehnologii monitoringa i upravlenija strukturnoj dinamikoj slozhnyh tehnicheskix ob'ektov* [Intellectual technologies of monitoring and management of difficult technical objects structural dynamics]. M.: Nauka. 2006. 410 p. (In Russ.).
36. Bukatova I.L. *Jevoljucionnoe modelirovanie i ego prilozhenija* [Evolutionary modeling and its applacation]. M.: Nauka. 1979. 231 p. (In Russ.).
37. Laurent S. St., Johnston J., Dumbil E. *Programming Web Services with XML-RPC*. O'Reilly Media, Inc. 2001. 213p.
38. Merkurjev Y., Merkurjeva G., Sokolov B., Zelentsov V. *Information Technologies and Tools for Space-Ground Monitoring of Natural and Technological Objects*. Riga Technical University. 2014. 110 p.
39. Van der Knijff J.M., Younis J., De Roo A.P.J. LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river-basin scale water balance and flood simulation. *International Journal of Geographical Information Science*. 2010. vol. 24. no. 2. pp. 189–212.

Алабян Андрей Михайлович — к-т геогр. наук, доцент кафедры гидрологии суши географического факультета, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, (МГУ). Область научных интересов: динамика русловых потоков, русловые процессы, моделирование, технологии ГИС и ДЗЗ. Число научных публикаций — 50. andrei_alabyan@mail.ru; Ленинские горы, 1, Москва, 119991; р.т.: (495)939-1533.

Alabyan Andrey Mikhailovich — Ph.D., associate professor, associate professor of hydrology department of geography faculty, Lomonosov Moscow State University. Research interests: river flow dynamic, river channel processes, modelling, GIS, remote sensing. The number of publications — 50. andrei_alabyan@mail.ru; 1, Leninskiye Gory, Moscow, 119899; office phone: (495)939-1533.

Зеленцов Вячеслав Алексеевич — д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: системный анализ, теория надежности, модели и методы принятия решений в сложных организационно-технических системах с использованием аэрокосмических данных. Число научных публикаций — 250. v.a.zelentsov@gmail.com; 14-я линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: (812)328-0103, Факс: (812)328-4450.

Zelentsov Viacheslav Alekseevich — Ph.D., Dr. Sci., professor, chief researcher of laboratory for information technologies in systems analysis and modeling, St. Petersburg Institute for

Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: analyses of systems, reliability theory, mathematical models and methods of decision-making support in complex technical-organizational systems with the use of aerospace data. The number of publications — 250. v.a.zelentsov@gmail.com; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: (812)328-0103, Fax: (812)328-4450.

Крыленко Инна Николаевна — к-т геогр. наук, старший научный сотрудник кафедры гидрологии суши географического факультета, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, (МГУ). Область научных интересов: опасные гидрологические процессы, гидрологическая безопасность, моделирование, технологии ДЗЗ. Число научных публикаций — 30. krylenko_i@mail.ru; Ленинские горы, 1, Москва, 119991; р.т.: (495)939-1533.

Krylenko Inna Nikolaevna — Ph.D., senior researcher of hydrology department of geography faculty, Lomonosov Moscow State University. Research interests: hydrological modelling, natural hazards, water safety, remote sensing. The number of publications — 30. krylenko_i@mail.ru; 1, Leninskiye Gory, Moscow, 119899; office phone: (495)939-1533.

Потрысаев Семен Алексеевич — к-т техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Число научных публикаций — 40. spotryasaev@gmail.com; 14-я линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: (812)328-0103, Факс: (812)328-4450.

Potryasaev Semen Alekseevich — Ph.D., senior researcher of laboratory for information technologies in systems analysis and modeling, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: analyses of systems, reliability theory, mathematical models and methods of decision-making support in complex technical-organizational systems with the use of aerospace data. The number of publications — 40. spotryasaev@gmail.com; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: (812)328-0103, Fax: (812)328-4450.

Соколов Борис Владимирович — д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, заместитель директора по научной работе, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Число научных публикаций — 450. sokol@iias.spb.su; 14-я линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: +7-812-328-3311.

Sokolov Boris Vladimirovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, Honored scientist of Russian Federation, deputy director for research, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: development of research fundamentals for the control theory by structural dynamics of complex organizational-technical systems. The number of publications — 450. sokol@iias.spb.su; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7-812-328-3311.

Юсупов Рафаэль Мидхатович — д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН, заслуженный деятель науки и техники РФ, директор, Федеральное государственное

бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), президент, НП Национальное общество имитационного моделирования («НОИМ»). Область научных интересов: теория управления, информатика, теоретические основы информатизации и информационного общества, информационная безопасность. Число научных публикаций — 390. spiiran@iias.spb.su; 199178, Санкт-Петербург, 14 линия, д. 39; р.т.: +7-812-328-3311.

Yusupov Rafael Midhatovich — Dr. Sci., professor, Corr. Member of RAS, director, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), president of NP National Simulation Society («NSS»). Research interests: control theory, informatics, theoretic basics of informatization and information society, information security. The number of publications — 390. spiiran@iias.spb.su; 39, 14-th Line, St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7-812-328-3311.

Поддержка исследований. Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации: СПбГПУ (мероприятие 6.1.1), ИТМО (субсидия 074-U01), Программы НТС Союзного государства «Мониторинг СГ» (проект 1.4.1-1), грантов РФ №14-21-00135, 14-11-00748; РФФИ №12-07-00302, 13-07-00279, 13-08-00702, 13-08-01250, 13-07-12120, 13-06-0087, 15-29-01294-офи-м, 15-07-08391, 15-08-08459, 15-07-01230, 15-06-04195; ОНИТ РАН (проект №2.11); проекта ESTLATRUS/1.2./ELRI-121/2011/13 «Baltic ICT Platform».

Acknowledgements. This research is supported by ITMO (project 074-U01), program “Monitoring SG” (project 1.4.1-1), RSF (projects 14-21-00135, 14-11-00748); RFBR (grants 12-07-00302, 13-07-00279, 13-08-00702, 13-08-01250, 13-07-12120, 13-06-0087, 15-29-01294-офи-м, 15-07-08391, 15-08-08459, 15-07-01230, 15-06-04195); ONITRAS (project №2.11); project ESTLATRUS/1.2./ELRI-121/2011/13 «Baltic ICT Platform».

РЕФЕРАТ

*Алабян А.М., Зеленцов В.А., Крыленко И.Н., Потрясаев С.А.,
Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* **Оперативное прогнозирование
наводнений на основе комплексного упреждающего
моделирования и интеграции разнородных данных.**

В настоящее время перспективным направлением повышения точности прогноза зон и глубин затоплений при разливах рек является проведение междисциплинарных исследований и создание систем прогнозирования на базе интегрированного использования достижений в гидрологии, информационных технологиях, обработке данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и моделировании.

Привлечение информационных технологий и методов упреждающего моделирования позволяет решить следующие основные проблемы:

1. Проблему получения, автоматизации сбора и обработки исходных данных из всех доступных источников, включая данные с гидрологических постов, цифровые модели рельефа и данные ДЗЗ.
2. Проблему выбора и адаптации используемых гидрологических моделей.
3. Проблему доступности результатов прогнозирования.

В статье решение данных проблем рассматривается на примере построения системы оперативного (на 12-48 часов) прогнозирования наводнений. Система строится на базе сервис-ориентированной архитектуры с реализацией интеллектуального интерфейса для выбора и адаптации гидрологических моделей с учетом особенностей распространения воды по руслу реки. Доступ к результатам прогнозирования обеспечивается за счет применения геопортальных технологий и Веб-сервисов. Тестирование системы проведено во время весеннего половодья 2013 г. на р. Даугава (Латвия). Прогноз затопления значимых объектов инфраструктуры совпал с реальными данными не менее, чем на 95%.

SUMMARY

Alabyan A.M., Zelentsov V.A., Krylenko I.N., Potryasaev S.A., Sokolov B.V., Yusupov R.M. **Operational Flood Forecasting on the Basis of Complex Proactive Modeling and Integration of Heterogeneous Data.**

Currently, a promising way to increase the accuracy of the forecast of zones and depths of flooding in river impoundments is to conduct interdisciplinary research and create forecasting systems based on integrated use of achievements in hydrology, information technologies, Earth remote sensing data processing and modeling.

The use of information technologies and methods of proactive modeling allows one to solve the following main problems:

1. The problem of obtaining, automating the collection and processing of raw data from all available sources, including data from gauging stations, digital elevation models and Earth remote sensing data.

2. The problem of selection and adaptation of used hydrological models.

3. The problem of access to the forecasting results.

The paper examines a solution to these problems using evidence from the constructed short-term (for 12-48 hours) flood forecasting system.

The system was created on the basis of service-oriented architecture with the implementation of an intelligent interface for selecting and adapting hydrological models taking into account features of the water spread along the riverbed.

Access to the results of forecasting was provided by the application of geoportal technologies and Web services. System testing was performed during the spring flood in 2013 on the Daugava river (Latvia). Forecasting results for the significant infrastructure objects agreed with the real data (not less than 95%).