АВТОМАТИЗАЦИЯ МОНИТОРИНГА И КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В БАСЕЙНАХ РЕК

В.А. Зеленцов, С.А. Потрясаев, И.Ю. Пиманов, М.Р. Пономаренко

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, pimen@list.ru

Представлены результаты разработки комплекса средств автоматизации, объединенных в систему мониторинга и прогнозирования гидрологической обстановки с использованием гидрологических и гидродинамических моделей и наземно-космических данных. Построенная на базе сервис-ориентированной архитектуры с применением открытых кодов и свободно распространяемого программного обеспечения, система позволяет автоматизировать полный цикл моделирования речных наводнений и визуализации его результатов. Рассмотрены результаты тестирования работы системы на участке реки Северная Двина. Полученные данные свидетельствуют об эффективности применения сервис- и событийно-ориентированных архитектур в сочетании с технологиями платформо-независимого универсального описания, автоматического поиска и интеграции веб-сервисов.

Ключевые слова: наводнения, мониторинг, комплексное моделирование, сервис-ориентированная архитектура, искусственные нейронные сети, геоинформационные системы.

AUTOMATION OF MONITORING AND INTEGRATED MODELING OF HYDROLOGICAL SITUATION IN RIVER BASINS

V.A. Zelentsov, S.A. Potriasaev, I.Yu. Pimanov, M.R. Ponomarenko

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS

The results of the development of an automation equipment complex, combined into a system for monitoring and forecasting the hydrological situation using a complex of hydrological and hydrodynamic models, ground observations and remote sensing data are presented. The system is based on a service-oriented architecture with the use of open codes and free software and allows to automate the full cycle of river flood modeling and visualization of the results. The results of testing the system on Northern Dvina River are described. The obtained data shows the effectiveness of using service- and event-oriented architectures in combination with the technologies of platform-independent universal description, automatic search and integration of web services.

Keywords: flood, monitoring, complex modeling, service-oriented architecture, artificial neural network, geoinformation systems.

Введение

Ограниченное использование систем моделирования, прогнозирования и оценки рисков наводнений, прежде всего в оперативном режиме, на сегодняшний день связано с рядом факторов, к числу которых относятся:

- низкая степень автоматизации работы систем;
- недостаточная оперативность поставки и обработки необходимых данных;
- высокая сложность и междисциплинарность задач интеграции разнородных данных и моделей в единой системе;
- разобщенность усилий разработчиков гидрологических и гидродинамических моделей, специалистов по информационным технологиям и экспертов в области совместной обработки разнородных наземно-аэрокосмических данных;
- сложности с интерпретацией результатов моделирования и доведением их до пользователей, не обладающих специальными знаниями в области гидрологии и информационных технологий.

Для эффективной работы подобных систем требуется автоматизировать весь цикл моделирования, включая этапы загрузки разнородных исходных данных (данных с гидропостов, метеоинформации, материалов аэрокосмической съемки, результатов наземного мониторинга и др.), выбора моделей и их настройки, проведения расчетов, интерпретации результатов моделирования, организации работы в реальном масштабе времени, визуализации данных и др. [10].

Существующие информационные технологии и программные средства для интеграции разнородных информационных ресурсов, как правило, позволяют автоматизировать отдельные этапы работы системы [3]. При этом решение комплексной задачи автоматизации мониторинга и оперативного прогнозирования наводнений в бассейнах рек остается открытым вопросом.

Именно автоматизация, а также интеграция распределенных разнородных информационных ресурсов являются основными принципами, положенными в основу предлагаемых в данной работе программных и информационно-технологических решений по созданию информационной системы для мониторинга, оперативного анализа и прогнозирования гидрологической обстановки в бассейнах рек. С точки зрения требований оперативности наибольшее внимание уделяется организации работы системы при наводнениях.

Необходимо отметить, что отличительной особенностью рассматриваемой в статье разработки комплекса средств автоматизации является ориентация на использование апробированных и подтвердивших свои характеристики гидрологических и гидродинамических моделей. Такой подход обеспечивает высокоточное оценивание границ затоплений и уровней подъема воды с учетом конкретных условий распространения водного потока, принципиально отличает рассматриваемые задачи построения системы прогнозирования от задач только фиксации границ зон уже состоявшихся затоплений и задач геоинформационного моделирования [9], позволяющих оценить возможные границы зон разлива воды при тех или других потенциально возможных уровнях ее подъема.

Методика исследования

Проблематика создания комплекса средств автоматизации и соответствующей системы мониторинга гидрологической обстановки охватывает необходимость решения по меньшей мере двух групп задач. Первая из них касается разработки

методов и алгоритмов оценивания и выбора наиболее приемлемых для каждой конкретной ситуации моделей прогнозирования распространения водного потока. Вторая группа задач состоит в выборе, адаптации и практической реализации комплекса программно-технологических решений, обеспечивающих в оперативном режиме интеграцию разнородных информационных ресурсов, включая выбранные модели прогнозирования, обработку наземно-аэрокосмических данных, интерпретацию, визуализацию и предоставление результатов мониторинга и моделирования пользователю.

Методической основой решения задач первой группы являются полученные к настоящему времени результаты нового научного направления — квалитетрии моделей и полимодельных комплексов [7], уже апробированных в ряде прикладных направлений и доказавших свою эффективность.

В настоящей статье основное внимание уделяется второй группе задач по обоснованию архитектуры и технологическому построению интегрирующего комплекса средств автоматизации. При этом для прогнозирования наводнений в оперативном режиме реализуется технология, построенная на базе концепции многомодельного описания сложных природных объектов с реализацией механизма выбора и структурной и параметрической адаптации параметров наиболее адекватной модели для каждой конкретной ситуации [1, 17].

Система мониторинга гидрологической обстановки (СМГО) в рассматриваемой постановке в общем случае включает размещенные на различных ресурсах средства сбора гидрологической и метеоинформации, математические модели прогноза, источники данных аэрокосмической съемки, пользовательские терминалы, средства оповещения и др.

Наиболее распространенными типами архитектур при создании подобных систем являются [12]:

- монолитная архитектура;
- модульная архитектура;
- компонентная архитектура;
- клиент-серверная архитектура;
- сервис-ориентированная архитектура.

Преимуществами систем с монолитной архитектурой [2, 16] являются простота управления и развертывания, обеспечение высокой согласованности программного кода и высокого качества контроля ошибок. Основным недостатком данных систем с точки зрения рассматриваемых задач является их ориентация на создание относительно небольших, локальных приложений, развертываемых на едином вычислительном ресурсе.

Модульная архитектура используется при создании более сложных программных комплексов [2, 6]. Она основана на декомпозиции приложения и введении понятия плагина — программного модуля, который независимо компилируется, может динамически подключаться к основной программе и обеспечивать тем самым расширение ее функциональности.

В компонентной архитектуре [22] используется аналогичный подход, позволяющий создавать достаточно сложные информационные системы за счет

«блочного» построения программного кода и повторного использования одних и тех же фрагментов кода. При этом базовым является требование универсальности используемых модулей. Развитие универсальности привело к созданию программных библиотек с возможностью широкого выбора необходимых модулей для реализации требуемой функциональности информационной системы.

Однако и монолитная, и компонентная архитектуры предназначены для построения локализованных информационных систем.

Для СМГО одной из основных требуемых функций является организация взаимодействия разнородных информационных ресурсов, к тому же функционирующих в асинхронном режиме. К таким ресурсам относятся: программные комплексы и автоматизированные системы получения и предобработки исходных данных, их каталогизации, хранения, архивирования; расчетно-вычислительные модули, осуществляющие прогноз распространения водного потока и оценивание потенциального ущерба; программно-инструментальные средства интерпретации результатов расчетов и предоставления их пользователю и т.д. При этом отдельные информационные ресурсы и модули могут быть территориально распределены и должны взаимодействовать через телекоммуникационные сети. Реализацию такого взаимодействия обеспечивает клиент-серверная архитектура [18]. В простейшем варианте клиент-серверная архитектура включает пользовательский клиент, на котором реализуется основная логика работы информационной системы, и серверную часть в виде системы управления базами данных (СУБД) или файл-сервера. В общем случае данный тип архитектуры обеспечивает любое взаимодействие двух и более распределенных программных модулей. Наиболее полный вариант такого взаимодействия обеспечивается при использовании сервис-ориентированной архитектуры (COA) [19].

COA позволяет реализовать модульный подход к построению сложных информационных систем. Для этой цели отдельные прикладные модули системы исполняются как веб-сервисы с возможностью обмена данными по стандартным протоколам. Связующим программным обеспечением в COA традиционно является сервисная шина предприятия (Enterprise Service Bus, ESB). ESB предоставляет централизованный и унифицированный событийно-ориентированный обмен сообщениями между различными модулями информационной системы [19].

Используемые модули могут содержать внутри себя сторонние программные комплексы, решающие конкретные прикладные задачи и представленные в виде законченных решений, прошедших при необходимости валидацию и верификацию. При этом могут использоваться различные языки программирования, программно-технологические средства и инструменты для организации взаимодействия, обработки и хранения данных. Это дает возможность рационального построения СМГО в целом за счет выбора наилучшей конфигурации программно-аппаратных решений для каждой прикладной задачи.

Использование COA в качестве базового архитектурного решения позволяет учесть основные особенности задач оперативного комплексного моделирования наводнений и автоматизировать процедуры мониторинга гидрологической обстановки в бассейнах рек.

Проведенный анализ показал, что для максимально полной автоматизации функционирования СМГО в ее состав должны быть включены следующие компоненты:

- сервисная шина;
- интерпретатор сценария на языке BPEL, встроенный в сервисную шину;
- программное обеспечение для отображения данных по стандартам веб-картографии;
- система управления базой пространственных данных;
- сервер администрирования;
- сервис сбора данных с гидрологических датчиков;
- сервис получения, обработки и загрузки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ);
- сервис прогнозирования значений параметров гидродинамических процессов;
- сервис, управляющий работой расчетной гидродинамической модели;
- сервис прогнозирования уровня и расхода воды на гидропостах;
- сервис обработки и интерпретации результатов расчетов;
- пользовательский веб-интерфейс — веб-приложение для работы на стационарных и мобильных пользовательских устройствах.

Структурно-функциональная схема СМГО, включающая перечисленные компоненты, приведена на рис. 1.

Как отмечалось выше, в данной системе реализована концепция многомодельного описания сложных природных объектов с реализацией механизма выбора и структурной и параметрической адаптации параметров наиболее адекватной модели для каждой конкретной ситуации.

Расчет расходов воды выполняется не только на основе гидрологических моделей, но также с помощью искусственных сетей (ИНС). Для этого использован специально разработанный алгоритм автоматического подбора (адаптации) конфигурационных параметров предложенных моделей ИНС.

Корректировка параметров используемых гидродинамических моделей выполняется по результатам анализа данных дистанционного зондирования Земли из космоса.

Важное место в системе отводится использованию материалов космической съемки. Космическая съемка позволяет получить площадные пространственные данные по всей площади водосбора и при совместном использовании с результатами наземного гидрометеорологического мониторинга выполнить подробный площадной анализ гидрологической обстановки на территории. Использование данных дистанционного зондирования Земли является перспективным направлением мониторинга российских рек, для которых, как правило, характерны редкая сеть пунктов гидрометеорологических наблюдений, отсутствие актуальных пространственных данных на территорию (ЦМР и др.), формирование ледовых заторов в ходе вскрытия рек.

При решении задач мониторинга наводнений наиболее широкое применение сегодня находят оптическое и радиолокационное зондирование, обеспечивающие

Рис. 1. Структурно-функциональная схема СМГО.

широкий пространственный охват съемки и регулярное получение оперативных данных. В то же время существуют и ограничения по использованию данных технологий. Так, значительная облачность существенно ограничивает возможности применения оптических систем. В этом случае основным источником данных становятся материалы радарной съемки, не зависящей от состояния облачного покрова и освещенности земной поверхности. Использование радарных снимков наиболее эффективно на открытых участках; в условиях городской застройки задача усложняется [20, 21]. Таким образом, решение данной проблемы требует комплексного применения материалов космической съемки — оптической и радарной. В рамках исследования предложен метод обработки и анализа данных ДЗЗ, включающий три основных этапа [4]:

- автоматическую пороговую обработку радиолокационных данных;
- расчет нормализованного разностного водного индекса NDWI по данным зондирования в оптическом диапазоне;
- совместный анализ результатов обработки радарных и оптических данных.

Для хранения информации (входных данных и результатов обработки и моделирования) применяется битемпоральная база данных, которая благодаря используемой темпоральной модели данных (ТМД) дает возможность фиксировать время актуальности данных, а также транзакционное время (момент их записи в хранилище). Это позволяет организовать оперативный режим работы системы и выполнять сценарное моделирование. При этом для работы с темпоральными данными конечному пользователю не требуются специальные знания, так как для визуализации данных в веб-интерфейсе используется временная шкала — удобный инструмент для просмотра как исходных данных, так и результатов прогнозирования и сценарного моделирования.

Стоит отметить, что все этапы вычислительного процесса (от сбора данных до представления результатов прогнозирования) полностью автоматизированы. В связи с тем, что система ориентирована на пользователей без специальных знаний в области информационных технологий, интерфейс содержит только минимальный необходимый набор инструментов для работы с данными, к которым относятся:

- строка поиска пространственных данных;
- перечень отображаемых данных;
- временная шкала для работы с темпоральными данными.

Это позволяет скрыть от конечного пользователя всю сложность системы и не требует от него специальной подготовки в области информационных технологий, геоинформатики и др. Внешний вид интерфейса пользователя показан на рис. 2.

Результаты исследований

Разработанная система апробирована в ходе весеннего половодья в 2014—2018 гг. на участке русла реки Северная Двина от г. Великий Устюг до г. Котлас. Наводнения — частое для данного района явление, причиняющее значительный экономический ущерб.

Рис. 2. Вид веб-интерфейса системы.

Вверху справа — графики изменения уровня с фиксацией пересечения границ опасных явлений, ниже — оперативные значения уровня воды на гидропостях.

Целью апробации являлось подтверждение возможности автоматизации всех этапов мониторинга и моделирования гидрологической обстановки на базе предложенного состава технологических решений.

Для наблюдения и изучения наводнений на выбранной территории специалистами Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова и Института водных проблем РАН неоднократно проводились подробные исследования, в том числе настройка гидродинамических моделей и проверка их достоверности [13, 14, 23, 24]. В 2014—2016 гг. авторами статьи совместно с данными специалистами были выполнены тестовые запуски системы. Весной 2018 г. в течение всего периода половодья тестирование осуществлялось в режиме реального времени.

В ходе эксперимента сценарные расчеты выполнялись с применением отечественной модели класса STREAM 2D (ранее известные как Flood и River), разработанной под руководством А.Н. Милитеева и В.В. Беликова [11]. Расчет расходов воды, поступающей на верхние границы гидродинамической модели, осуществлялся с помощью модели ECOMAG, разработанной под руководством Ю.Г. Мотовилова [8], и искусственных нейронных сетей. Также в рамках совершенствования системы обе модели использованы для получения данных в режиме реального времени на участке слияния рек Сухоны и Юга.

При тестировании работы системы в оперативном режиме данные для моделирования затоплений поступали с 12 стационарных и 5 временных гидропостов. Для их загрузки в модель осуществлялся этап предварительной обработки.

Для прогноза затопления Великого Устюга, связанного с формированием ледовых заторов, использовались разрабатываемые прогностические искусственные нейронные сети, с помощью которых был составлен прогноз на период 9 марта — 29 апреля 2018 г. для следующих районов:

- посты Тотьма и Каликино (река Сухона);
- пост Гаврино (участок слияния рек Юга и Лузы);
- пост в Великом Устюге.

Анализ данных, полученных с применением модели ECOMAG и ИНС, показал следующее:

- имитационная модель, учитывающая данные о процессах формирования стока по всей площади водосбора за значительный период времени, точнее отражала аномальные ситуации и прогнозировала их развитие;

- ИНС эффективнее работают при обычном ледоходе, прогнозируя длительные по времени и инерционные изменения, так как они были обучены на тестовых примерах именно для таких условий без учета аномальных ситуаций.

Таким образом, для того чтобы повысить точность прогнозирования уровня воды, необходимо использовать комплекс различных моделей на базе независимых методов. В связи с этим в период нормального ледохода использовались ИНС, а при нештатной ситуации (в частности, при возникновении ледовых заторов) прогнозирование осуществлялось с применением имитационной модели.

В ходе работы системы прогноз затоплений выполнялся каждый час на 24 часа вперед после загрузки данных в модель. Далее выполнялась визуализация зон и глубины затоплений в интерфейсе системы, позволяющем одновременно просматривать следующие данные:

- моделируемые контуры зон распространения воды;
- информацию о гидропостах, используемых для получения данных;
- графики изменения уровня воды на гидропостах с результатами прогнозов изменения уровня;
- результаты обработки данных ДЗЗ.

В качестве материалов космической съемки использовались снимки с КА «Ресурс-П» и «Канопус-В» (Россия), Sentinel-1 и Sentinel-2 (Европейское космическое агентство), RADARSAT-2 (Канада). Для оценки результатов моделирования и получения дополнительных сведений о территории (в частности, о ледовых заторах) в ходе половодья весной 2018 г. (1 апреля — 16 мая 2018 г.) в системе опубликовано более 20 снимков с российских КА и спутников Sentinel.

Вид интерфейса системы с наложенным космическим снимком КА Sentinel-2 показан на рис. 3.

Кроме того, в ходе тестирования сценарного режима работы системы результаты моделирования наводнения 2016 г. были сопоставлены с результатами обработки космических снимков за тот же период. При этом были использованы данные RADARSAT-2, обработанные в соответствии с предложенным подходом. Анализ результатов позволил выявить высокий уровень совпадения контуров затопления на открытых территориях (без городской застройки). В целом расхождение между площадями зон затоплений, построенных по результатам

Рис. 3. Общий вид интерфейса системы.

моделирования и обработки данных ДЗЗ, составило 7 %. При этом выполнена оценка точности прогноза по составу объектов инфраструктуры на затопленных участках, составившая не менее 90 %.

Выводы

Результаты апробации предложенного подхода и тестирования разработанной системы (в оперативном и сценарном режимах) подтверждают эффективность применения сервис- и событийно-ориентированных архитектур совместно с технологиями платформонезависимого универсального описания, автоматического поиска и интеграции веб-сервисов, обеспечивающих требуемую базовую функциональность систем мониторинга и моделирования наводнений. Система построена на базе открытой отечественной программной платформы. Кроме того, особенности построения системы позволяют в полной мере учесть специфические условия российских рек и отвечают требованиям к информационному обеспечению гидрометеорологического мониторинга.

Благодаря автоматизации процессов мониторинга и моделирования, а также наличию удобных и простых средств взаимодействия с моделирующими комплексами разработанная система мониторинга гидрологической обстановки дает возможность объединить усилия разработчиков гидрологических и гидродинамических моделей, специалистов в области разработки информационных технологий и программно-инструментальных средств обработки разнородных данных и специалистов-практиков для использования результатов математического моделирования в оперативном режиме.

Полная автоматизация вычислительного процесса избавляет пользователя от трудностей применения разнородных территориально распределенных информационных ресурсов, существенно расширяя круг пользователей и включая в него службы по чрезвычайным ситуациям, органы муниципального образования, страховые компании и др.

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 счет 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.

Список литературы

1. 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 // Труды СПИИ РАН. 2015. № 41 (4). С. 5—33.
2. Гринфилд Дж., Шорт К., Кук С., Кент С., Крупи Дж. Фабрики разработки программ: потоковая сборка типовых приложений, моделирование, структуры и инструменты / Пер. с англ. М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. 592 с.
3. 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 СПИИ РАН. 2017. № 55 (6). С. 86—113.
4. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., Пиманов И.Ю., Пономаренко М.Р. Использование данных космического радиолокационного зондирования при анализе зон затопления в половодье // Инженерные изыскания. 2018. Т. XII, № 7—8. С. 54—60. DOI: 10.25296/1997-8650-2018-12-7-8-54-60.
5. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., Пиманов И.Ю., Семенов А.Е. Мониторинг и моделирование наводнений на базе системы с сервис-ориентированной архитектурой // Геориск. 2016. № 1. С. 12—15.
6. Календарев А. Современная веб-архитектура. От монолита к микросервисам // Системный администратор. 2017. № 1—2. С. 80—83.
7. Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: изд-во РАН, 2018. 314 с.
8. Мотовилов Ю.Г. Свидетельство о гос. рег. в Роспатенте № 2013610703. ECOMAG. Россия, 2013.
9. Новаковский Б.А., Колесникова О.Н., Прасолова А.И., Пермяков Р.В. Геоинформационное моделирование наводнений по материалам космической съемки (на примере г. Бийска, Алтайский край) // Геоинформатика. 2015. № 1. С. 15—20.
10. Пиманов И.Ю. Программные инструментальные средства для комплексного моделирования при мониторинге и прогнозировании развития чрезвычайных ситуаций с использованием данных дистанционного зондирования // Известия вузов. Приборостроение. 2018. № 11. С. 988—996.
11. Программный комплекс STREAM 2D CUDA для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках с использованием технологии CUDA (на графических процессорах NVIDIA) / А.И. Алексюк, В.В. Беликов. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017660266. Российское агентство по интеллектуальной собственности, 2017.
12. Советов Б.Я., Водяхо А.И., Дубенецкий В.А., Цехановский В.В. Архитектура информационных систем. М.: Издательский центр «Академия», 2012. 288 с.

13. *Alabyan A.M., Lebedeva S.V.* Flow dynamics in large tidal delta of the Northern Dvina river: 2D simulation // *J. Hydroinformatics*. 2018. V. 20, No. 4. P. 798—813.
14. *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, No. S1. P. 171—188.
15. *Zelentsov V.* et al. River Flood Forecasting System: An Interdisciplinary Approach / In: Refice A., D'Addabbo A., Capolongo D. (eds.). *Flood Monitoring through Remote Sensing*. Springer Remote Sensing/Photogrammetry. Springer, Cham, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-63959-8_4.
16. *Gouigoux J. P., Tamzalit D.* From Monolith to Microservices: Lessons Learned on an Industrial Migration to a Web Oriented Architecture // In: Proc. IEEE International Conf. on Software Architecture Workshops (ICSAW'2017), 2017. P. 62—65. doi: 10.1109/ICSAW.2017.35
17. *Zelentsov V.A., Potryasaev S.A., Pimanov I.J., Nemykin S.A.* Creation of Intelligent Information Flood Forecasting Systems Based on Service Oriented Architecture / In: R. Silhavy, R. Senkerik, Z. Oplatkova, P. Silhavy, Z. Prokopova (eds.). *Automation Control Theory Perspectives in Intelligent Systems. CSOC 2016 // Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2016. V. 466. P. 371—381. DOI: 10.1007/978-3-319-33389-2_35.
18. *Oluwatosin H.S.* Client-Server Model // *IOSRJ Comput. Eng.* 2014. V. 16, No. 1. P. 2278—8727.
19. *Paik H., Lemos A., Barukh M., Benatallah B., Natarajan A.* Web Service Implementation and Composition Techniques. Springer International Publishing, 2017. 256 p.
20. *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 / In: Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems. CSOC 2017 // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. V. 574. P. 291—299. DOI: 10.1007/978-3-319-57264-2_30.
21. *Ponomarenko M.R., Pimanov I.Yu.* Processing of SAR amplitude images with posting the results on web server // *J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol.* 2016. V. 9 (7). P. 994—1000. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-7-994-1000.
22. *Richards M.* Software Architecture Patterns. O'Reilly Media, Inc, 2015. 47 p.
23. *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.
24. *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.