

Контроль, прогнозирование развития и парирование некоторых угроз для сложных распределенных систем на основе анализа данных мультисенсорных систем

С.В. Павлов, А.Р. Гизатуллин, Е.С. Брекоткина, А.В. Иванцов

psvgis@mail.ru | Gizartur@yandex.ru | brekotkina@mail.ru | Andreyiv0508@gmail.com

Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

С появлением новых источников и технологий получения данных о местоположении и взаимном расположении объектов и систем в целом, а также их интеграции в методы и алгоритмы управления в реальном времени – сформировались условия для более современного и качественного использования компьютерных технологий в управлении сложными распределенными системами (СРС). Компоненты таких СРС сами являются сложными распределенными системами и оказывают (или потенциально могут оказывать), в том числе, негативное воздействие друг на друга, то есть представляют собой или формируют угрозу друг для друга. Одной из актуальных задач современности является разработка различных, как правило высоко компьютеризированных, средств и методов парирования угроз на основе контроля и прогнозирования развития процессов (в том числе физических), составляющих основу этих угроз. В данной статье рассматривается задача парирования одного из видов угроз – паводка. Рассмотрены вопросы использования различных видов информации, поступающей из различных источников – сенсоров, для контроля и прогнозирования уровня воды и связанного с ним затопления соответствующих территорий. Сама система использования в реальном времени автоматически измеряемых параметров СРС и их дальнейшего применения для цифровой поддержки принятия решений по парированию угроз является сложной высоко компьютеризированной технической системой, относящейся к классу интернета вещей. В то же время она является одной из цифровых подсистем СРС, оказывающих положительное воздействие на другие компоненты СРС в целом. Вся эта информация поступает из различных (технически и ведомственно) неоднородных источников, поэтому для ее оперативного и качественного хранения и использования для целей контроля, прогнозирования и парирования угроз для СРС, она нуждается в специализированных методах анализа, структурирования и распределенного хранения.

Ключевые слова: мультисенсорные системы, сложные распределенные системы, парирование угрозы, прогнозирование развития, пространственные данные, паводок, зона затопления

Monitoring, predicting the development and parrying of certain threats for complex distributed systems based on data analysis of multi-sensor systems

S. V. Pavlov, A. R. Gizatullin, E. S. Brekotkina, A. V. Ivantsov

psvgis@mail.ru | Gizartur@yandex.ru | brekotkina@mail.ru | Andreyiv0508@gmail.com

Ufa state aviation technical University, Ufa, Russia

With the advent of new sources and technologies for obtaining data on the location and mutual location of objects and systems in general, as well as their integration into real – time control methods and algorithms, conditions have been created for more modern and high-quality use of computer technologies in the management of complex distributed systems (SRS). The components of such SRS are themselves complex distributed systems and have (or can potentially have), among other things, a negative impact on each other, that is, they represent or form a threat to each other. One of the most urgent tasks of our time is to develop various, usually highly computerized, tools and methods for parrying threats based on monitoring and forecasting the development of processes (including physical ones) that form the basis of these threats. This article discusses the problem of parrying one of the types of threats – flood. The issues of using various types of information coming from various sources – sensors for monitoring and forecasting the water level and associated flooding of the corresponding territories are considered. The system of using real-time automatically measured SRS parameters and their further application for digital decision support for parrying threats is a complex highly computerized technical system belonging to the class of the Internet of things. At the same time, it is one of the digital subsystems of the SRS that have a positive impact on other components of the SRS as a whole. All this information comes from various (technically and departmental) heterogeneous sources, so for its rapid and high-quality storage and use for monitoring, forecasting and parrying threats to the SRS, it needs specialized methods of analysis, structuring and distributed storage.

Keywords: Multi-sensor systems, complex distributed systems, threat parry, forecasting development, spatial data, flood, flooded area

1. Введение

Качественно новые системы, включающие в себя физические (в том числе технические), биологические (в том числе людей и объекты окружающей среды) и цифровые (в том числе компьютеры, программное обеспечение, данные, а также модели и методы использования этих данных для управления) компоненты требуют новых подходов к управлению отдельными классами этих компонентов и их системным объединением. Это объединение можно рассматривать как сложную взаимосвязанную совокупность объектов различной сложности и физической природы.

На рис. 1 представлена обобщенная схема взаимодействия основных компонентов реального мира, в котором прочное место в последнее время занимает цифровая компонента, позволяющая людям точнее и своевременнее отслеживать (контролировать) состояние и развитие процессов взаимодействия и взаимного влияния этих компонентов друг на друга (как позитивного, так и негативного). Причем эта цифровая компонента, с одной стороны осуществляет сбор, хранение и дальнейшее использование разноплановой (разноаспектной) информации об этих компонентах и связях между ними (включая самую себя), с другой стороны реализует различные модели и алгоритмы взаимодействия этих компонентов (включая прогнозирование и управление некоторыми из этих процессов) [12,14].

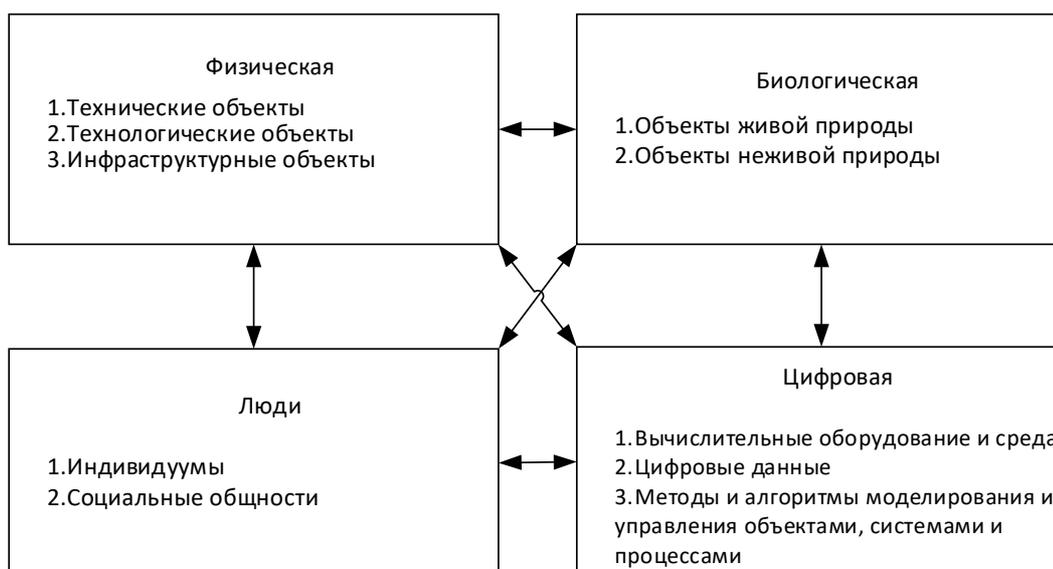


Рис. 1. Обобщенная схема взаимодействия основных компонентов реального мира в условиях 4-ой промышленной революции

В связи с появлением новых источников и технологий получения данных о местоположении и взаимном расположении объектов и систем в целом, а также их интеграции в методы и алгоритмы управления в реальном времени – сформировались условия для более современного и качественного использования компьютерных технологий в управлении сложными распределенными системами (СРС), которые характеризуются существенной удаленностью составляющих компонент друг от друга и существенным и быстрым во времени изменением их характеристик. Здесь необходимо отметить, что компоненты (подсистемы) таких СРС (например, представленные на рис. 1) сами являются сложными распределенными системами и оказывают (или потенциально могут оказывать), в том числе, негативное воздействие друг на друга, то есть представляют собой или формируют угрозу друг для друга. Поэтому одной из актуальных задач современности является разработка различных, как правило высоко компьютеризированных, средств и методов парирования угроз на основе контроля и прогнозирования развития процессов (в том числе физических), составляющих основу этих угроз [9].

В данной статье рассматривается задача парирования одного из видов угроз – паводка, основанного на физическом процессе подъема уровня воды в водных объектах на территории субъекта Российской Федерации (на примере Республики Башкортостан). Необходимо отметить, что угрозу чаще всего представляет не сам процесс подъема уровня воды, а наступающее вслед за этим процессом затопление или подтопление определенных территорий и находящихся на них технических, технологических, инфраструктурных и природных объектов, а также людей и объектов их жизнеобеспечения [4,7].

2. Прогнозирование уровня воды и зоны затопления

Задача контроля и прогнозирования развития паводковой ситуации известна давно, и существуют решения (научные, технические, организационные), позволяющие в некоторой степени определять основные характеристики этой

угрозы и реагировать на возможность ее негативного развития (то есть парировать) по отношению к перечисленным выше объектам СРС. Один из вариантов схемы контроля, прогнозирования развития и парирования угрозы паводка для СРС представлена на рис. 2. В настоящее время принятие решения о проведении некоторых действий (мероприятий) по парированию или снижению угрозы паводка осуществляется в том числе и из экономических соображений, так как реализация этих мероприятий требует определенных финансовых, материальных и временных затрат. В качестве одного из наиболее распространенных критериев при принятии этих решений является анализ и сравнение ущерба от реализации угрозы (на рис. 2 обозначен символом u) и расходов (или затрат) на парирование и/или снижение этой угрозы (на рис. 2 - e). Наибольший научный интерес для специалистов в области информационных технологий представляет блок контроля и прогнозирования паводковой ситуации, на основании которого формируются и выполняются мероприятия по парированию (ликвидации или смягчению) угрозы для объектов СРС. На самом деле, с терминологической точки зрения, существует несколько природных явлений, которые характеризуются подъемом уровня воды в водных объектах: наводнение, половодье и паводок. Два последних понятия в последние годы часто употребляются в одном и том же смысле – подъем воды, который может негативно повлиять на объекты СРС, будь то весенний подъем уровня воды, вызванный в основном интенсивным снеготаянием и/или дождем (на самом деле – это половодье), или подъемом уровня воды в другое время года, вызванным дождями. Поэтому в дальнейшем термином паводок будет называться любая ситуация на водном объекте, при которой происходит подъем уровня воды, приводящий к затоплению определенных территорий.

Основной характеристикой угрозы СРС от паводка является затопление и подтопление определенной территории, при котором наносится повреждение или вред некоторым компонентам СРС, попавшим в зону затопления, и/или деятельность (или функционирование) которых нарушена возникшими зонами затопления.

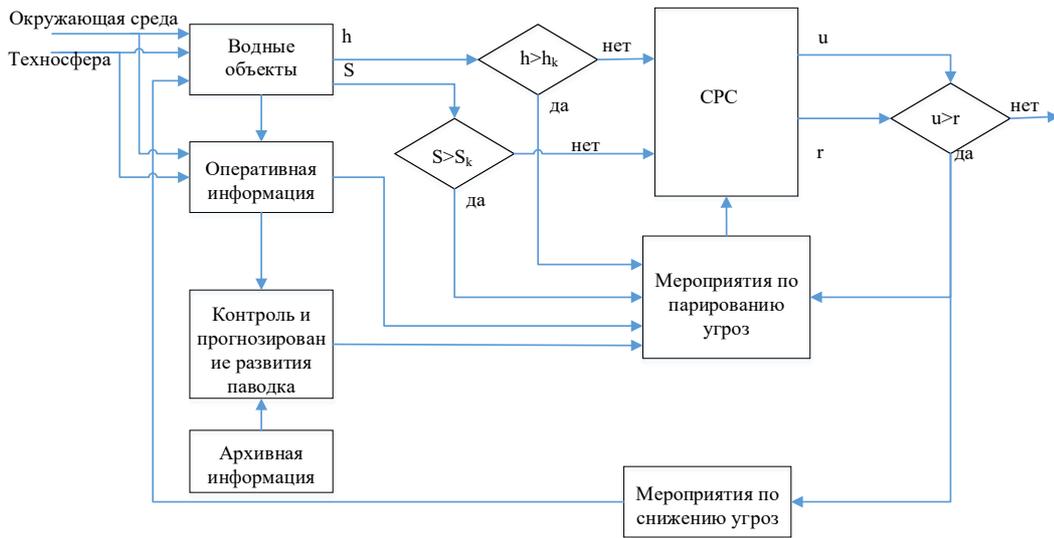


Рис. 2. Схема контроля, прогнозирования развития и парирования угрозы паводка для CPC

Зона затопления Z представляет собой множество точек территории

$$Z = \{(x_i, y_i)\}, i = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

высота которых над уровнем моря $H_i^0 = H^0(x_i, y_i)$ находится ниже уровня воды в этой точке $H_i^p = H^p(x_i, y_i)$, то есть $H_i^0 \leq H_i^p, i = 1, 2, 3, \dots$ (2)

Если высота над уровнем моря в каждой точке суши известна и представлена на топографических картах и моделях рельефа, то уровень воды измеряется только в определенных точках: стационарных постах Росгидромета, временных постах и автоматических постах наблюдения. В этих точках известен (для стационарных постов – всегда, для других постов – редко) так называемый нуль поста – высота над уровнем моря русла в этой точке, обозначим ее HGP_i^0 , и производится измерение уровня подъема воды h_i относительно этого значения. Исходя из этого абсолютное значение подъема воды HGP_i^p в точке нахождения поста измерения определяется следующим образом

$$HGP_i^p = HGP_i^0 + h_i, i = \overline{1, n} \quad (3)$$

здесь n – количество точек измерения (постов). Величина уровня воды H_i^p в любой другой точке вычисляется на основании этих измеренных значений с помощью некоторых интерполяционных алгоритмов, один из которых предложен в [3].

Фактически, наличие опасности – попадание некоторого объекта из CPC в зону затопления, или угрозы возникновения этой опасности – возможность (прогнозируемая) попадания объекта в зону затопления определяется принадлежностью координат этого объекта (их может быть одна или множество пар, в зависимости от размеров объекта) множеству Z . Зона затопления Z характеризуется ее границей Γ

$$\Gamma = \Gamma(Z). \quad (4)$$

В каждом конкретном случае возникновения паводковой ситуации, в особенности при не очень большом подъеме уровня воды, зона затопления может состоять из нескольких отдельных частей

$$Z = Z_1 \cup Z_2 \cup \dots \cup Z_m = \bigcup_{i=1}^m Z_i. \quad (5)$$

Соответственно и граница зоны затопления представляет собой совокупность границ ее отдельных частей

$$\Gamma_i = \Gamma(Z_i), i = \overline{1, m}; \quad (6)$$

$$\Gamma = \{\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_m\}. \quad (7)$$

Интегральной количественной характеристикой размеров зоны затопления (и как следствие – ее опасности для объектов CPC) может служить площадь зоны затопления

$$S = S(Z), \quad (8)$$

которая по аналогии с (5), (6) и (7) может быть представлена

$$S_i = S(Z_i), i = \overline{1, m}, \quad (9)$$

$$S = \sum_{i=1}^m S_i. \quad (10)$$

Пока площадь зоны затопления меньше некоторой критической величины S_k , функционирование CPC происходит в обычном (штатном) режиме, а при превышении S этой критической величины, то есть при $S > S_k$ необходимо осуществление мероприятий по парированию угрозы. До недавнего времени напрямую количественно контролировать и прогнозировать размер (границы и площадь) зон затопления представляло собой довольно сложную задачу, ввиду сложности проведения геодезических работ на затопленной территории. С появлением и доступностью данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) с космических аппаратов, появилась реальная возможность фиксировать зоны фактического затопления в момент съемки. Однако, в силу известных причин: наличие облачности для снимков в видимом диапазоне или недостаточная частота (а следовательно – оперативность) съемки для радарных снимков этот способ определения зон затопления не всегда применим. Особенно для небольших территорий, так как в этом случае, в качестве ограничения добавляется еще и достаточно высокая стоимость информации [8].

Исходя из физики процесса подъема воды в водном объекте и связанного с ним затопления некоторых территорий теоретически существует некоторая функциональная зависимость $S = f(h)$, вследствие чего на практике для контроля и прогнозирования развития и угрозы паводка используется величина h и при подъеме уровня воды выше некоторого критического значения h_k осуществляются мероприятия по парированию угрозы паводка для CPC. В действительности h это не скалярная величина, а векторная $h = (h_1, h_2, \dots, h_n)$ где n – количество точек измерения. Причем в каждой из этих точек величина уровня подъема воды во время паводка измеряется регулярно, через некоторые промежутки времени Δt (как правило один раз в сутки), так что в каждой i -ой точке измерения за каждый паводковый период имеется несколько измерений

$$h_i = (h_{i1}, h_{i2}, \dots, h_{ik_i}), \quad (11)$$

где k_i – количество измерений в i -ой точке. Несмотря на то, что существует определенный регламент измерений, предусматривающий одновременное измерение величины h в каждой точке (это необходимо для корректности построения зоны затопления и определения площади S), в общем случае $k_i \neq k_j$ при $i \neq j$. (12)

В наиболее простом и чаще всего встречающемся случае задача прогнозирования формулируется следующим образом: в любой текущий момент времени t_n , определить (предсказать, спрогнозировать) значение величины h на некоторый будущий момент времени $t_0 > t_n$, то есть определить величину h_{t_0} . В дальнейшем, на основании вектора спрогнозированных значений $h_0 = (h_{1_0}, h_{2_0}, \dots, h_{n_0})$ каким либо образом осуществляется построение границ зоны затопления и вычисляется

$$S_0 = f(h_0). \quad (13)$$

3. Использование различных видов и источников информации для прогнозирования

В силу сложности формального (математического или алгоритмического) описания физического процесса распространения воды по земной поверхности за пределами русла (что является для определения угрозы наиболее важным) аналитическую зависимость f построить не удастся. Методы прогнозирования уровня воды основаны на использовании (построении) закономерностей притока и расхода воды в точках контроля. Основными факторами притока во время весеннего паводка являются: запасы влаги в почве, запасы воды и влаги в снеге, температура воздуха (влияющая на таяние снега), осадки в виде дождя. Причем наложение дождевой составляющей на таяние снега бывает крайне редко, так как дожди при облачной погоде, а таяние снега при ясной. Но достаточно точно взаимосвязь h с этими факторами не выяснена, точнее формально не может быть отражена в виде аналитической зависимости. Также достаточно точное измерение этих факторов (количественно), особенно регулярное (ежедневное) весьма затруднительно, а с практической точки зрения – невозможно [11]. Поэтому прогнозирование осуществляется на основе выявления статистических закономерностей и возможных будущих значений h_0 от измеренных ранее значений h , с привлечением других регулярно измеряемых параметров, в первую очередь – температуры воздуха, наиболее существенно влияющей не интенсивность таяния снега и притока воды в точке измерения. Более детальный анализ характеристик водных объектов (природных и антропогенных), оказывающих влияние на гидрологические процессы, в том числе – изменение уровня воды, представлен в [2]. Затем построение зоны затопления и расчет ее площади осуществляется по картам местности (традиционным или цифровым) или цифровым моделям рельефа на основе анализа соответствия линий высот уровню подъема воды. Подробно такие алгоритмы приводятся, например, в работах [3,8,10].

Как отмечено выше обработка большого объема информации о СРС и составляющих ее объектов и компонентов при динамическом развитии угрозы паводка и оперативного принятия противопаводковых мер процесс расчета и прогнозирования параметров этой угрозы нуждается в высокой степени автоматизации. Однако ограниченное число точек измерения, недостаточное качество информации о водных объектах, рельефе местности, расположении объектов СРС снижает оперативность и достоверность оценки угрозы текущей и прогнозируемой паводковой ситуации для СРС в целом. Ввиду этого всё большее применение находят космические системы наблюдения, способные оперативно предоставлять оптические и радиолокационные космические снимки с фактическим изображением пространственных ха-

рактеристик СРС: зон затопления, зон снежного покрова, погодные характеристики (распределение осадков, температуры, ветра, облачности). Более подробно вопросы использования ДДЗЗ для определения характеристик СРС для целей парирования угрозы паводка рассмотрены в работах [4,1,7].

В настоящей статье рассмотрены вопросы использования различных видов информации, поступающей из различных источников – сенсоров, для контроля и прогнозирования уровня воды и связанного с ним затопления соответствующих территорий (рис. 3). Использование термина сенсор считаем оправданным, так как для определения основных характеристик паводка всё в большей степени применяются автоматические датчики: как для измерения традиционных числовых параметров: уровня воды – h и температуры воздуха – T , так и для площадных (полигональных) характеристик СРС, определяемых из ДДЗЗ: зоны затопления (S_n и Γ_n) и зоны снежного покрова (P_n). Сама система использования в реальном времени автоматически измеряемых параметров СРС и их дальнейшего применения для цифровой поддержки принятия решений по парированию угроз является сложной высоко компьютеризированной технической системой, относящейся к классу киберфизических систем. В то же время она является одной из цифровых подсистем СРС, оказывающих положительное воздействие на другие компоненты СРС в целом. Здесь необходимо отметить, что вся необходимая информация поступает из различных (технически и ведомственно) неоднородных источников, поэтому для ее оперативного и качественного хранения и использования для целей контроля, прогнозирования и парирования угроз для СРС, она нуждается в специализированных методах анализа, структурирования, распределенного хранения и доступа к большим массивам информации. Эта задача является составной частью современного информационно-технологического направления – облачные технологии, некоторые вопросы реализации которого для СРС уровня субъекта Российской Федерации рассмотрены в работах [4,1].

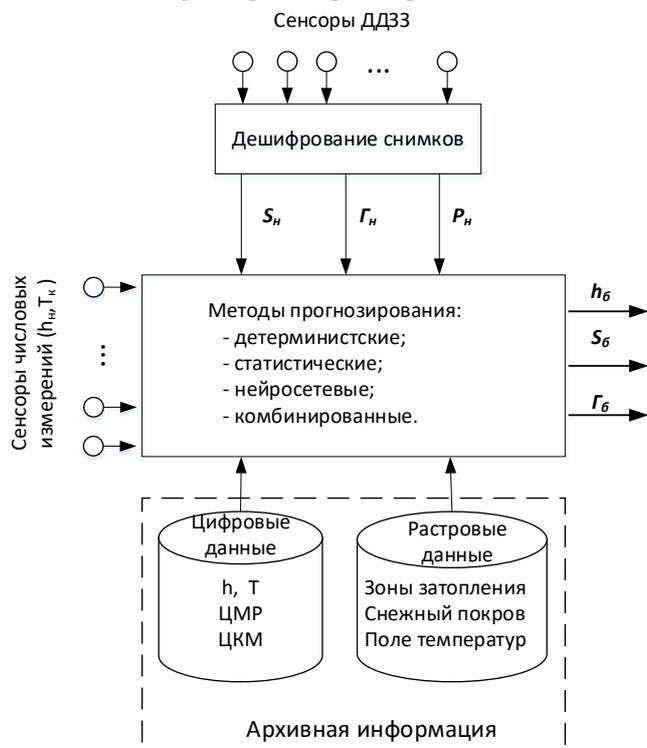


Рис. 3. Схема использования информации от множества сенсоров

4. Заключение

В заключении необходимо отметить, что решение сложных социально и экономически значимых задач по управлению СРС, к которым без сомнения относится и парирование угроз, требует интеграции таких прорывных технологий как интернет вещей (или даже интернет всего), анализ больших данных, облачные технологии и искусственный интеллект, которые являются неразрывными частями единого процесса получения и анализа данных мультисенсорных систем.

5. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-08-00301 «Методологические и теоретические основы управления уязвимостью на основе парирования угроз в сложных распределенных системах»

6. Литература

- [1] Ефремова О.А. Алгоритм построения зон фактического затопления местности при разливах рек на основе радиолокационных космических снимков и анализа характерных точек рельефа / О.А. Ефремова, Ю. Н. Кунаков, С. В. Павлов, А. Х. Султанов // Компьютерная оптика. – 2018. – Том 42. – С. 695–703.
- [2] Крымский В.Г. Информационное обеспечение оценки состояния водных ресурсов и управления ими на основе геоинформационных технологий: Монография. / В.Г. Крымский, С.В. Павлов, О.И. Христуло – Москва: Изд-во «ООО Дата+», 2010 г. – 276 с.
- [3] Павлов С.В. Разработка геоинформационной модели речной сети с учетом картографической, гидрологической и морфометрической информации для определения границ зон подтопления при изменении уровня воды в водных объектах // С.В. Павлов, О.И. Христуло, Р.Р. Шарафутдинов // Вестник УГАТУ: Научный журнал Уфимск. госуд. авиац. техн. ун-та. – 2008. – Т. 11, №1 (28). – С. 18-27.
- [4] Павлов С.В. Построение зон фактического затопления местности при разливах рек на основе обработки радиолокационных космических снимков и анализа характеристик точек рельефа / С.В. Павлов, Ю. К. Кунаков // Вестник УГАТУ: Научный журнал Уфимск. госуд. авиац. техн. ун-та. – 2009 г. – Т. 13, №2(35). – С. 3 – 10
- [5] Павлов С.В. Информационное сопровождение весеннего половодья на территории Республики Башкортостан с использованием ГИС – технологий / С.В. Павлов, Ю.Н. Кунаков, И.У. Ямалов, А.Ф. Атнабаев // Вестник УГАТУ: Научный журнал Уфимск. госуд. авиац. техн. ун-та. – 2011 г – Т. 15, №2(42). – С. 29 – 38
- [6] Barbeta S., Coccia G., Moramarco T., Todini E., «Real-time flood forecasting downstream river confluences using a Bayesian approach», Journal of Hydrology, vol. 565, 2018, pp. 516–523.
- [7] Bonakdri H., Zaji A.H., Binns A.D., Gharabaghi B., «Integrated Markov chains and uncertainty analysis techniques to more accurately forecast floods using satellite signals», Journal of Hydrology, vol. 572, 2019, pp. 75–79.
- [8] Chang C.H., Lee H., Hossain F., Basnayke S., Jayasinghe S., Chishtie F., Saah D., Hanwen Yu., Sothea K., Bui D.D., «A model-aided satellite-altimetry-based flood forecasting system for the Mekong River», Environmental Modelling & Software, 2019, vol. 112, pp. 112–127.
- [9] Kim K., Pant P., Yamashita E., «Integrating travel demand modeling and flood hazard risk analysis for evacuation and sheltering», International Journal of Disaster Risk Reduction, vol. 31, 2018, pp. 1177–1186.

- [10] Noymanee J., Theeramunkong T., «Flood Forecasting with Machine Learning Technique on Hydrological Modeling», Procedia Computer Science, vol. 156, 2019, pp. 377–386.
- [11] Policelli F., Hubbard A., Chul Jung H., Zaitchik B., Ichoku C. «A predictive model for Lake Chad total surface water area using remotely sensed and modeled hydrological and meteorological parameters and multivariate regression analysis», Journal of Hydrology, vol. 568, 2019, pp. 1071–1080.
- [12] Shafizadeh-Moghadam H., Valave R., Shahabi H., Chapi K., «Shirzadi A. Novel forecasting approaches using combination of machine learning and statistical models for flood susceptibility mapping», Journal of Environmental Management, 2018, vol. 217, pp. 1–11.
- [13] Wing O.E.J., Sampson C.C., Bates P.D., «A flood inundation forecast of Hurricane Harvey using a continental-scale 2D hydrodynamic model», Journal of Hydrology X, vol. 4, 2019, P. 1–17.
- [14] Wesemael A.V., Landuyt L., Lievens H., Verhoest N., «Improving flood inundation forecasts through the assimilation of in situ floodplain water level measurements based on alternative observation network configurations», Advances in Water Resources, vol. 130, 2019, pp. 229–243.
- [15] Zhou Y., Guo S., Chang F., «Explore an evolutionary recurrent ANFIS for modelling multi-step-ahead flood forecasts», Journal of Hydrology. 2019. Vol. 570. pp. 343–355.

Об авторах

Павлов Сергей Владимирович д.т.н., профессор кафедры Геоинформационных систем, Уфимский государственный авиационный технический университет. E-mail: psvgis@mail.ru.

Гизатуллин Артур Римович к.т.н., доцент кафедры Геоинформационных систем, Уфимский государственный авиационный технический университет. E-mail: Gizartur@yandex.ru.

Брекоткина Елена Сергеевна к.э.н., доцент кафедры Экономики предпринимательства Института экономики и управления, Уфимский государственный авиационный технический университет. E-mail: brekotkina@mail.ru.

Иванцов Андрей Васильевич к.т.н., доцент кафедры Геоинформационных систем, Уфимский государственный авиационный технический университет. E-mail: Andreyiv0508@gmail.com