

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

УДК: 528.94/556.5

DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-5-19

С.В. Пьянков¹, Р.К. Абдуллин¹, А.Н. Шихов¹, А.В. Семакина¹

КАРТОГРАФИЧЕСКИЙ ВЕБ-СЕРВИС МОНИТОРИНГА СНЕЖНОГО ПОКРОВА И ОПАСНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В БАССЕЙНЕ Р. КАМЫ: ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ И ИНФОРМАЦИОННОГО НАПОЛНЕНИЯ

АННОТАЦИЯ

Одним из направлений совершенствования мониторинга и прогнозирования опасных гидрологических явлений (ОГЯ) является разработка веб-ГИС для оперативной визуализации и анализа гидрологической обстановки. В настоящей работе рассматривается структура и информационное наполнение картографического веб-сервиса мониторинга снежного покрова и ОГЯ в бассейне р. Камы (<http://hydromonitor.maps.psu.ru/>). Пользователями сервиса могут быть региональные управления гидрометслужбы, Камское бассейновое водное управление и другие организации, заинтересованные в оперативном получении гидрологической информации. В структуре картографического сервиса выделяются базовые и тематические слои. Тематические слои включают данные мониторинга и моделирования (обновляющиеся в ежесуточном режиме) и прочие данные, не требующие регулярного обновления. Информационной основой сервиса являются картографические слои бассейнов рек и наблюдательной сети Росгидромета (метеостанций и гидропостов). На основе анализа научной литературы, данных наблюдений гидропостов, сведений, опубликованных в СМИ и спутниковых снимков, созданы картографические слои паводкоопасных населённых

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Кафедра картографии и геоинформатики, ул. Букирева, д. 15, 614990, Пермь, Россия; *e-mail*: gis@psu.ru

пунктов, мест образования заторов льда на реках, случаев ОГЯ и зон затопления в поймах рек. База данных ОГЯ включает 97 записей (75 случаев), которые наблюдались в 63 населённых пунктах. Большинство случаев ОГЯ со значительным ущербом наблюдалось в бассейне р. Белой. Наибольшие площади затопляемых пойменных земель расположены в этом же бассейне. На картографическом сервисе также публикуются расчётные характеристики снежного покрова: запас воды в снеге, водоотдача и площадь снегового покрытия. Входными данными для расчётов являются суточные прогнозы температуры и влажности воздуха, скорости ветра и количества осадков по моделям атмосферы ICON (Германия) и GFS (США), а также данные метеостанций. Периодичность обновления данных составляет один раз в сутки, пространственное разрешение — 3 км.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: опасные гидрологические явления, весеннее половодье, дождевые паводки, картографическая база данных, картографический веб-сервис

Sergey V. Pyankov¹, Rinat K. Abdullin¹, Andrey N. Shikhov¹, Anastasia V. Semakina¹

ONLINE WEB MAP SERVICE FOR MONITORING OF SNOW COVER AND HAZARDOUS HYDROLOGICAL EVENTS IN THE KAMA RIVER BASIN: THE FEATURES OF DEVELOPMENT AND CONTENT

ABSTRACT

The development of web-GIS for operational visualization and analysis of the hydrological threats is one of the main ways to improve the monitoring and forecasting of hazardous hydrological events (HHE). This paper considers the structure and content of the online web map service for monitoring snow cover and HHE in the Kama river basin (<http://hydromonitor.maps.psu.ru/>). The regional departments of the Russian hydro-meteorological service, Kama Basin Water Administration and other institutions interested in operational obtaining of the hydrological information can successfully use the developed web map service. Basic and thematic layers are distinguished in the structure of the web map service. Thematic layers include daily updated monitoring and modelling outputs and other data (that does not require regular updating). The layers of river basins and observational network (weather stations and gauging stations) of the Russian hydro-meteorological service are the information basis of the service. The GIS layers of flooded settlements, locations of ice jams formation on the rivers, HHE and flood zones in floodplains have been created on the basis of the analysis of scientific publications, hydrological gauges, flood damage reports in media and satellite images. The database of HHE includes 97 records (75 HHE), which happened in 63 settlements. Most of HHE causing significant damage were occurred in the Belaya river basin, and the largest areas of flooded floodplain are also located in the same basin. Also, the simulated characteristics of snow cover (snow water equivalent, meltwater outflow and snow-covered area) are published on the web map service. The input data for calculations are daily forecasts of the air temperature, humidity, wind speed and precipitation by numerical weather prediction models ICON (Germany) and GFS (USA), as well as weather station data. The data are updated daily, and their spatial resolution is 3 km.

KEYWORDS: hazardous hydrological events, spring flood, rain flood, GIS database, online web map service

¹ Perm State University, Department of Cartography and Geoinformatics, Bukirev str., 15, 614990, Perm, Russia;
e-mail: gis@psu.ru

ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг опасных гидрологических явлений (ОГЯ) и предоставление пользователям актуальной информации об их развитии является важной задачей для многих регионов России. Одним из важных элементов комплексного мониторинга ОГЯ является разработка систем прогнозирования наводнений, основанных на веб-ГИС технологиях. В России такие системы были разработаны НИЦ Космической гидрометеорологии «Планета» и Гидрометцентром РФ для бассейнов рек Амура [Frolov *et al.*, 2016] и Кубани [Борщ *и др.*, 2015]. Для этих бассейнов характерны быстроразвивающиеся наводнения, связанные с дождевыми (ливневыми) паводками, которые наносят наибольший ущерб.

В большинстве речных бассейнов России основные риски наводнений связаны не с дождевыми паводками, а с прохождением снегового половодья [Frolova *et al.*, 2017]. Опыт создания систем мониторинга наводнений для рек, на которых основные риски связаны с весенним половодьем, остаётся весьма ограниченным. Первая подобная система разработана только в 2019 г. для бассейна р. Волги [Дерюгина *и др.*, 2019]. Также важно отметить, что все вышеперечисленные системы мониторинга наводнений недоступны для обычных пользователей, а ориентированы в основном на региональные УГМС.

Существенной проблемой является дефицит и отсутствие в открытом доступе некоторых данных, необходимых для краткосрочного гидрологического прогноза в период половодья (в частности, данных снегомерных съёмов). Особенно это актуально для районов со сложным рельефом, где пункты снегомерных наблюдений расположены преимущественно в долинах рек и нерепрезентативны для прилегающей территории. В настоящее время известен только один открытый сервис, предоставляющий данные о пространственном распределении снегозапасов¹. Однако для создания карт снегозапасов здесь применяется простая интерполяция данных снегомерных съёмов с ограниченного числа станций, что ведёт к большим ошибкам для районов с пересечённым рельефом.

Все обозначенные проблемы с доступностью данных о характеристиках снежного покрова актуальны и для бассейна р. Камы. В последние годы авторами настоящей работы проводились эксперименты по моделированию формирования и таяния снежного покрова на основе входных данных численных моделей атмосферы для бассейна Воткинского водохранилища, расположенного в северо-восточной части водосбора р. Камы [Pyankov *et al.*, 2018]. Было подтверждено, что снегозапасы, рассчитанные на основе данных об осадках, полученных по моделям прогноза погоды, как правило, отличаются от данных снегосъёмов менее чем на 25 %. При этом были получены реалистичные оценки как средних снегозапасов по бассейнам рек, так и их пространственного распределения, что и необходимо для последующего прогноза талого стока. Было показано, что правдоподобные результаты расчёта снегозапасов могут быть получены не только с применением данных мезомасштабной модели прогноза погоды WRF (с пространственным разрешением 10 км и менее), но и по данным глобальных моделей атмосферы (в частности, канадской модели GEM и немецкой модели ICON), данные которых находятся в открытом доступе.

В 2018–2019 гг. был разработан онлайн-картографический сервис для мониторинга характеристик снежного покрова и ОГЯ в бассейне р. Камы. Целью его создания является отображение в оперативном режиме характеристик снежного покрова в бассейне р. Камы и информационная поддержка мониторинга и прогноза ОГЯ в интересах региональных УГМС и других заинтересованных пользователей. Картографический сервис доступен в сети Интернет по ссылке². В настоящей статье рассматривается структура сервиса, особенности его создания и информационного наполнения, а также некоторые особенности

¹ Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России. Электронный ресурс: <http://gis.vodinfo.ru/> (дата обращения 30.11.2019)

² Мониторинг весеннего половодья в бассейне Камы. Электронный ресурс: <http://hydromonitor.maps.psu.ru/> (дата обращения 30.11.2019)

пространственно-временного распределения ОГЯ в бассейне р. Камы. Методы моделирования, реализованные для оперативного картографирования характеристик снежного покрова с публикацией выходных данных на веб-сервисе, рассматриваются в других работах [Пьянков и др., 2019; Pyankov et al., 2019].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аппаратная и программная реализация картографического сервиса

Для организации хранения данных и управления ими создана многопользовательская база данных под управлением СУБД PostgreSQL. Для публикации пространственных данных в сети Интернет, а также организации доступа к ним пользователей применяется установленный на веб-сервер ГИС-сервер ArcGIS Server 10.x, публикация данных выполняется из настольного программного обеспечения ArcGIS Desktop 10.x. Доступ пользователей картографического сервиса через сеть Интернет организован при помощи клиентского веб-приложения, реализованного на базе технологий HTML5, CSS3 и JavaScript.

Функциональные возможности сервиса включают стандартные инструменты, просмотр атрибутивных данных с помощью идентификации по картографическим слоям, поиск по атрибутивным таблицам, анимированное отображение характеристик снежного покрова (пространственное распределение снеготазов, водоотдачи по различным исходным данным). Более подробно функциональные возможности сервиса описаны в Руководстве пользователя¹.

Структура и информационное наполнение картографического сервиса

В структуре картографического сервиса традиционно выделяются базовые и тематические слои. В свою очередь, тематические данные подразделяются на данные мониторинга (обновляющиеся в ежесуточном режиме) и прочие данные, не требующие регулярного обновления с высокой частотой. Общая характеристика информационного наполнения сервиса представлена в табл. 1, более подробное описание приведено ниже.

Табл. 1. Информационное наполнение картографического веб-сервиса
Table 1. Content of the online web map service

Базовые слои	Тематические слои		
	Наблюдательная сеть и бассейны	Опасные гидрологические явления	Оперативно обновляемые (мониторинг)
Топографическая основа;	Метеостанции;	Населённые пункты в зоне риска затопления;	Запас воды в снежном покрове, рассчитанный на основе данных об осадках, полученных по метеостанциям и по моделям прогноза погоды ICON, GFS;
Рельеф;	Гидропосты;	Затороопасные участки на реках;	Расчётная водоотдача снега и площадь снегового покрытия;
Растительность	Бассейны рек (до гидропостов)	Случаи ОГЯ и ЧС;	Средний снеготаз и водоотдача по бассейнам рек;
		Зоны затопления по спутниковым данным	Площадь снегового покрытия по данным MODIS

¹ Руководство пользователя картографического сервиса «Мониторинг весеннего половодья в бассейне Камы». Электронный ресурс: <http://hydromonitor.maps.psu.ru/help/help.html> (дата обращения 30.11.2019)

Базовые картографические слои

В качестве картографической основы используются WMS-сервисы OpenStreetMap, карта Росреестра, ArcGIS.World Topo Map (топографические слои), ArcGis Imagery (мозаика космических снимков).

Основной цифровой моделью рельефа является GMTED-2010 с пространственным разрешением 250 м [Danielson, Gesch, 2011], поскольку она покрывает всю территорию бассейна Камы и имеет существенно меньше артефактов, чем ASTER GDEM.

Также на сервисе опубликована карта растительности с пространственным разрешением 350 м, которая описана в работе [Пьянков и др., 2019] и использовалась для моделирования формирования и таяния снежного покрова в бассейне р. Камы.

Тематические слои

Наблюдательная сеть Росгидромета представлена слоями метеостанций и гидрологических постов. Данные о координатах метеостанций получены с сервиса¹, а также по сведениям региональных УГМС. Всего слой включает 103 метеостанции, из них 71 находится в пределах бассейна Камы, а остальные — вблизи его границ. Картографический слой гидропостов создан на основе базы данных, опубликованной на электронном ресурсе АИС ГМВО². Всего он включает 161 действующий гидропост. Для каждого гидропоста приведены следующие атрибутивные данные: идентификатор, название, координаты, принадлежность к УГМС, площадь бассейна, максимальный зафиксированный уровень воды и дата его наблюдения, критическая отметка уровня воды (опасный уровень).

Границы частных бассейнов выделены по ЦМР GMTED-2010. Для 159 бассейнов замыкающими створами являются гидропосты. Также выделены бассейны крупных водохранилищ (на рр. Каме, Косье, Уфе). Для каждого бассейна приведены значения площади, средняя высота и уклон, лесистость в %.

Данные об опасных гидрологических явлениях и зонах затопления представлены несколькими картографическими слоями, которые созданы по материалам многолетних наблюдений, сведениям региональных управлений МЧС, сведениям из средств массовой информации, а также на основе космических снимков

Слой наводкоопасных территорий (населённых пунктов, расположенных в зонах затопления) подготовлен по материалам монографии [Разумов и др., 2018], в основу которой легли сведения региональных управлений МЧС и другие данные из открытых источников. В настоящее время выделено 130 населённых пунктов, производится актуализация информации по данным региональных УГМС. Для каждого населённого пункта приведена доля затопляемой площади при половодье 1 % и 10 % обеспеченности.

Слой затороопасных участков на реках также подготовлен по материалам монографии [Разумов и др., 2018], в которой выделено 48 таких участков в бассейне Камы. По каждому затороопасному участку приведены следующие атрибутивные данные: название, протяжённость участка (км), средняя и максимальная толщина льда (см), средний и максимальный подъём уровня воды при заторах (зажорах), даты возникновения заторов (зажоров) и их повторяемость.

База данных о случаях ОГЯ в бассейне р. Камы

В связи с редкостью наблюдательной сети и отсутствием в открытом доступе многолетних данных наблюдений за уровнями воды за период до 2002 г., для создания базы данных об ОГЯ были проанализированы все доступные информационные ресурсы. Основное внимание было уделено сведениям об ущербе от ОГЯ, опубликованным в СМИ. Отбор случаев ОГЯ производился по следующим критериям: достижение критерия ОГЯ (опасного

¹ Расписание погоды. Электронный ресурс: <https://rp5.ru> (дата обращения 30.11.2019)

² Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). Электронный ресурс: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения 30.11.2019)

уровня воды) по данным ближайшего гидропоста, значительный масштаб ущерба или факт введения режима чрезвычайной ситуации на пострадавшей территории.

Табл. 2. Структура атрибутивной таблицы случаев ОГЯ в бассейне р. Камы
Table 2. The structure of the attribute table of hazardous hydrological events
in the Kama river basin

Имя поля	Тип (длина) поля	Описание
Settlement_ID	Short integer	Идентификатор населённого пункта, в котором наблюдалось ОГЯ
Settlement_name	Text, 30	Населённый пункт, в котором наблюдалось ОГЯ
Flood_type	Text, 25	Тип наводнения
Cause	Text, 255	Описание гидрометеорологических условий возникновения ОГЯ
Dead_and_missed	Short integer	Число погибших и пропавших без вести
Number_of_people_evacuated	Short integer	Число эвакуированных людей в зоне ЧС
Number_of_flooded_houses	Short integer	Число затопленных домов
Damage_description	Text, 255	Описание ущерба, вызванного ОГЯ
Emergency_date	Text, 255	Даты ЧС (начало и конец)
Emergency_ID	Short integer	Идентификатор ЧС
URL	Text, 100	URL-адрес описания ЧС
Video_file	Text, 50	Ссылка на видеофайл
Year	Short integer	Год возникновения ОГЯ
Month	Short integer	Месяц возникновения ОГЯ*
Related_hydropost	Short integer	Название ближайшего гидропоста
Max_level	Short integer	Максимальный зафиксированный уровень воды в относительных отметках (см)
Max_level_date	Date	Дата максимального уровня
Water_level_file	Text, 25	Ссылка на графический файл с изображением динамики уровня воды на гидропосту

*В случае, если ОГЯ продолжалось в течение двух месяцев, указывается первый месяц

В рамках настоящей работы создана база данных об ОГЯ в бассейне р. Камы за период с 1990 г. по н.в. Ограничение периода для анализа связано с проблемой доступности данных. Так, в базе данных об опасных гидрометеорологических явлениях, нанесших

социально-экономический ущерб¹, приведена информация за период с 1991 г. В монографии [Разумов и др., 2018] рассматриваются случаи наводнений за 1990–2005 гг. Электронные архивы новостных СМИ также имеются в открытом доступе с 1990-х гг. Получение данных о случаях ОГЯ за период до 1990 г. более проблематично.

Структура атрибутивного описания случаев ОГЯ приведена в табл. 2. На рис. 1 приведён пример отображения данных на картографическом сервисе. Особенности пространственно-временного распределения случаев ОГЯ в бассейне Камы за период с 1990 по 2019 гг. рассмотрены в разделе «Результаты».

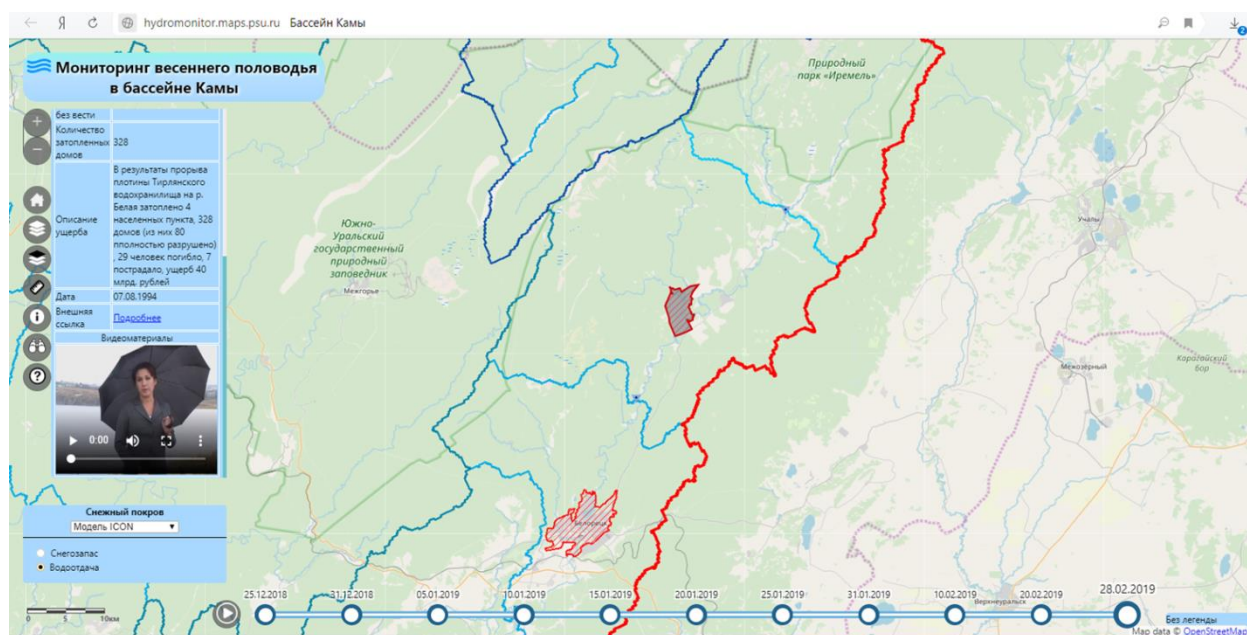


Рис. 1. Отображение данных о случае ОГЯ на картографическом веб-сервисе
 Fig. 1. The data on hazardous hydrological events on the online web map service

Картографический слой зон затопления в поймах крупных рек

Для создания слоя зон затопления в поймах крупных рек в бассейне Камы использован архив спутниковых данных Landsat за 1984–2019 гг., полученный с сервиса Геологической службы США². На сегодняшний день архив данных Landsat практически не имеет альтернативы для картографирования зон сезонного затопления — например, [Qi et al., 2009; Olthof, 2017]. В то же время существенными ограничениями данных Landsat являются зависимость от облачности и сравнительно низкая повторяемость съёмки, что в совокупности не позволяет зафиксировать максимальные площади затопления.

Для выделения зон затопления были получены снимки с облачностью менее 20 %, соответствующие датам прохождения пиков весеннего половодья (с середины апреля до начала июня), а также за период летней межени (с конца июля до середины сентября). Методика картографирования зон затопления по снимкам Landsat достаточно хорошо разработана [Преснякова и др., 2017]. В настоящей работе выделение водной поверхности на снимках производилось по двум пороговым критериям: отрицательным значениям нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI и пороговому значению

¹ Единая государственная система информации об обстановке в Мировом Океане (ЕСИМО). Стихийные бедствия. Электронный ресурс: <http://data.oceaninfo.ru/applications/disaster/index.jsp?&sortBy=region> (дата обращения 30.11.2019)

² USGS Earth Explorer. Электронный ресурс: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 30.11.2019)

коэффициента спектральной яркости в среднем ИК-канале. Расчёт производился в пределах буферных зон, которые соответствовали максимальной ширине зоны затопления для каждой реки. Для выделения зон сезонного затопления из площади водной поверхности, выделенной по весеннему снимку, вычиталась площадь водной поверхности в период межени. Затем производилась корректировка созданного векторного слоя в ручном режиме. Она включала, в частности, удаление участков разлива некоторых пойменных озёр, не имеющих соединения с основным руслом даже в период пика половодья. В случае, если значительное затопление в пойме одной и той же реки фиксировалось по снимкам Landsat неоднократно в разные годы, рассчитывались зоны затопления за каждый год и затем определялась максимальная по площади.

Таким образом, были созданы картографические слои зон максимального затопления в поймах 27 крупных рек бассейна Камы. Не рассматривались крупные реки, в поймах которых возможно значительное затопление, но отсутствуют населённые пункты.

Атрибутивная таблица созданного картографического слоя включает сведения об использованном снимке (дата съёмки, строка и столбец в системе WRS2), название реки, площадь затопления в пойме данной реки, название ближайшего гидропоста и уровень воды на гидропосту в день съёмки. В настоящее время недоступность данных об уровнях воды за 1990-е гг. не позволяет заполнить последние два поля полностью. Кроме того, на некоторых реках гидропосты вовсе отсутствуют. Пример отображения полученного слоя на картографическом веб-сервисе приведён на рис. 2.

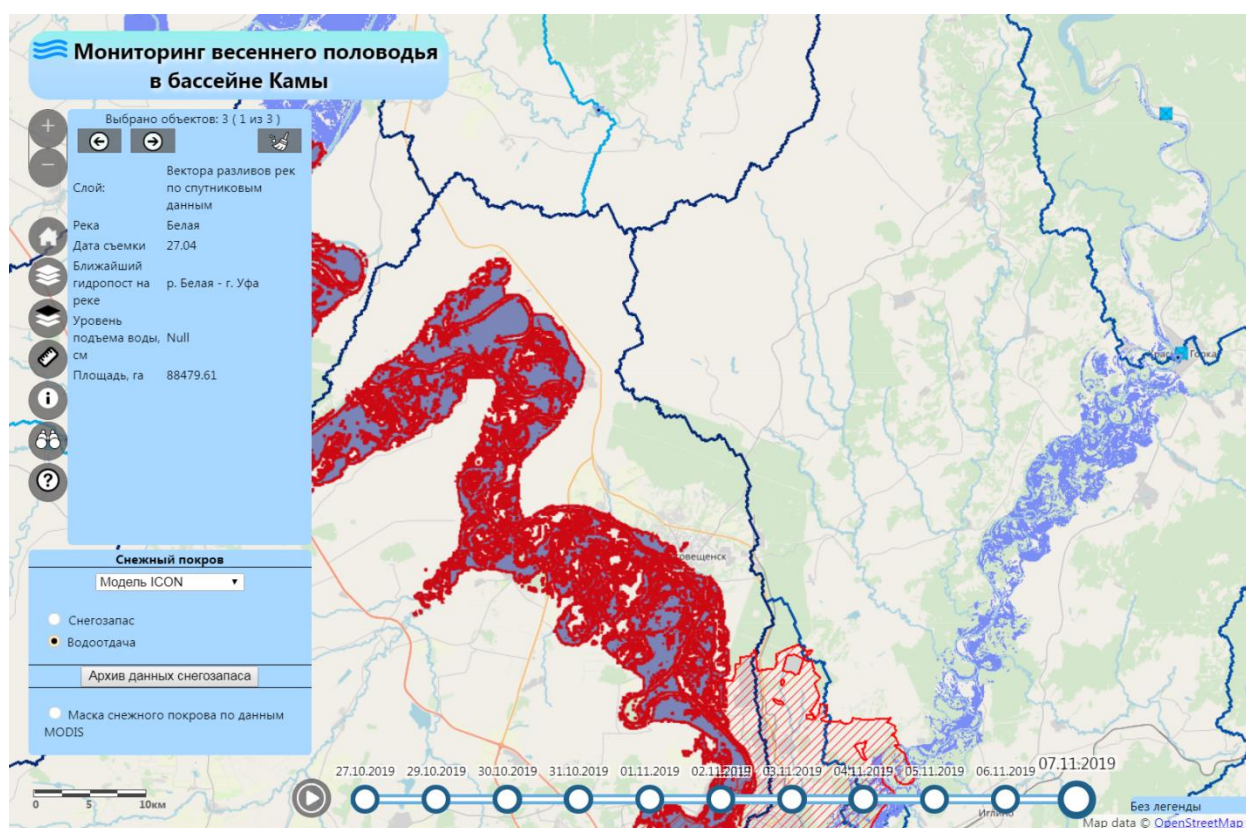


Рис. 2. Отображение зон затопления в поймах рек Белая и Уфа (выделенных по снимкам Landsat) на картографическом веб-сервисе
 Fig. 2. The flooded areas in the floodplains of Belaya and Ufa rivers (delineated by Landsat images), displayed on the online web map service

Оперативно обновляемые данные

На картографическом сервисе публикуются результаты расчёта пространственного распределения снегозапасов на основе данных глобальных моделей прогноза погоды ICON (Германия) и GFS (США). Более подробные сведения об этих моделях приведены в работе [Толстых, 2016]. Выходные данные моделей прогноза погоды (прогноз на срок 27 ч) загружаются в режиме реального времени с серверов национальных метеослужб. Для загрузки данных (температура и влажность воздуха, количество осадков и скорость ветра) в коде GRIB2 и их конвертации в формат Geotiff разработаны скрипты на языке Python. Загрузка данных и их конвертация в режиме реального времени выполняется с помощью вычислительных мощностей, предоставляемых сервисом Yandex Compute Cloud.

Выходные данные моделей имеют пространственное разрешение от 13 до 25 км, однако моделирование снегонакопления производится с шагом сетки 3 км, т.к. при расчётах проводится коррекция на рельеф. Методика расчёта снегонакопления и снеготаяния в основных чертах описана в работах [Pyankov et al., 2018; 2019]. Также моделирование снегонакопления производится на основе фактических данных о количестве выпавших осадков по данным с 94 метеостанций.

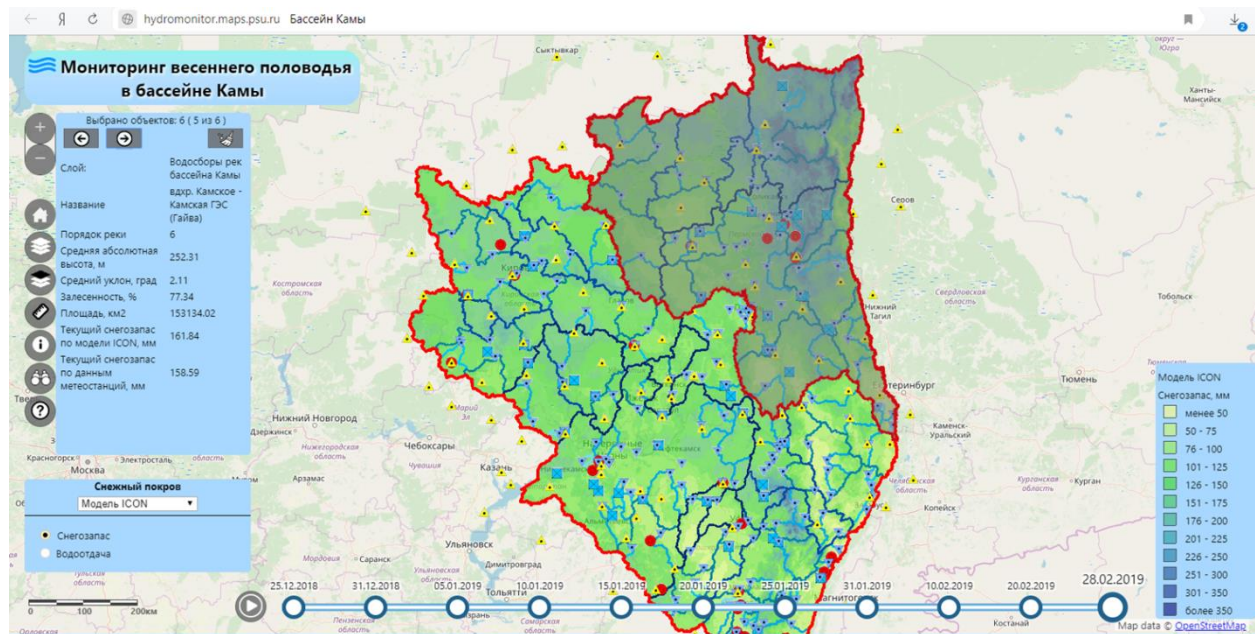


Рис. 3. Отображение данных о пространственном распределении снегозапасов (расчёт по данным модели ICON) на картографическом сервисе
Fig. 3. The spatial distribution of snow water equivalent (calculated based on ICON model data) displayed on the online web map service

Помимо снегозаписа, в период снеготаяния рассчитываются площадь снегового покрытия и поступление воды на водосборы рек. Результаты расчётов снегозаписа и водоотдачи представлены как в растровом формате, так и в виде средних значений по бассейну (рис. 3). Обновление данных на сервисе в период снегонакопления производится с частотой один раз в 10 суток, а в период снеготаяния — ежесуточно. Верификация результатов расчётов снегонакопления выполняется на основе данных маршрутных снегомерных съёмок (более 50 снегомерных маршрутов по всей площади бассейна). Методика верификации и некоторые результаты описана в статье [Pyankov et al., 2019]. В холодный период 2018–2019 гг. наиболее правдоподобное распределение снегозаписов было получено на основе

данных модели ICON. При этом в северной части водосбора существенных систематических ошибок не было, в южной части наблюдалось занижение снегозапаса, в сравнении с данными снегомерных съёмки, наиболее значительное в степной части бассейна р. Белой.

Помимо характеристик снежного покрова, полученных по результатам моделирования, в период снеготаяния на сервисе публикуются также данные о площади снегового покрытия (маски снежного покрова), полученные по снимкам Terra/Aqua MODIS. Площади, покрытые снегом, выделяются по пороговым значениям нормализованного разностного индекса снега для лесопокрытых территорий (Normalized Difference Forest Snow Index, NDFSИ), который наиболее эффективен для лесопокрытых территорий [Wang *et al.*, 2018]. В весенний период 2019 г. было подготовлено 15 масок снежного покрова, в остальные дни более 50 % площади бассейна находилось под облачностью. Спутниковые данные используются не только для оценки фактической площади снегового покрытия, но и для верификации результатов моделирования. Пример отображения на сервисе маски снежного покрова за 17.04.2019 г. приведён на рис. 4.

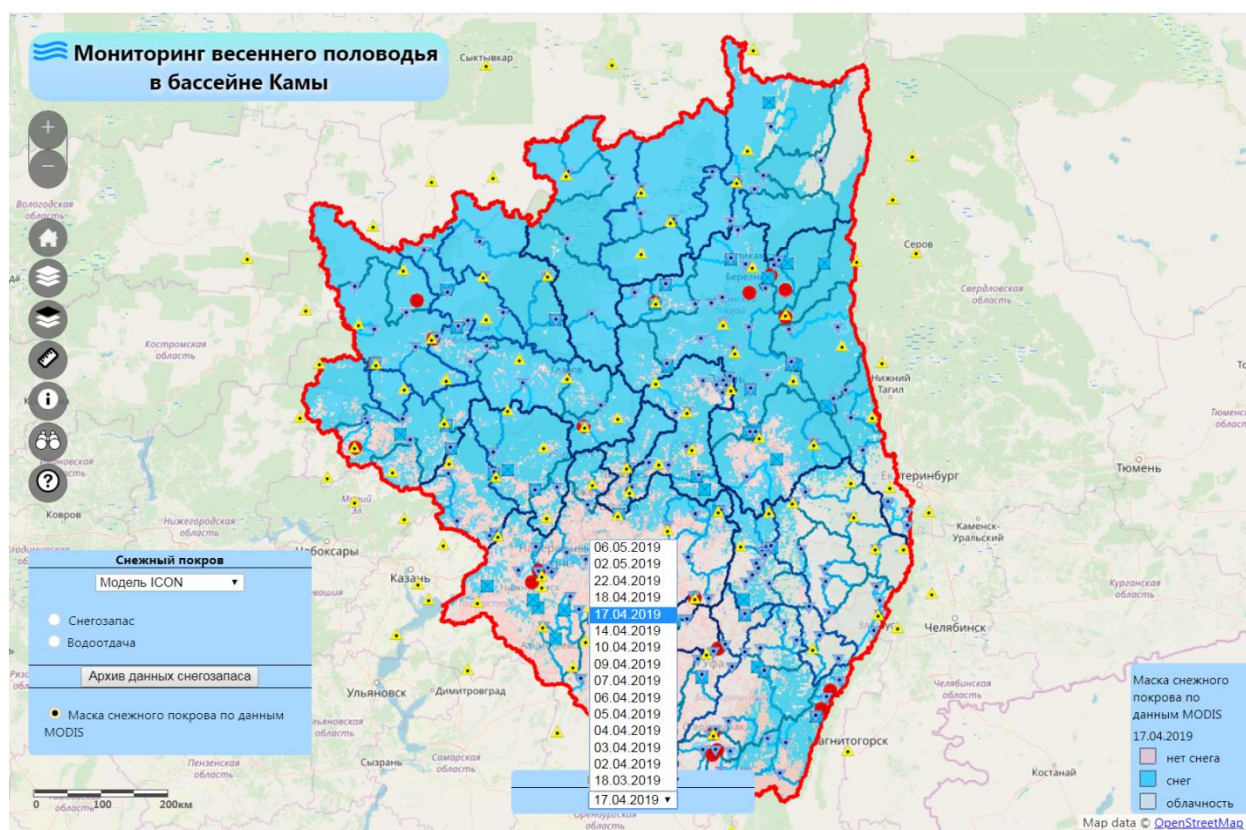


Рис. 4. Отображение площади снегового покрытия в бассейне р. Камы по спутниковым данным MODIS/Terra на картографическом веб-сервисе

Fig. 4. The snow-covered area in the Kama river basin according to MODIS/Terra images displayed on the online web map service

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пространственно-временное распределение случаев ОГЯ в бассейне р. Камы

Основные характеристики случаев ОГЯ в бассейне Камы, оцененные по созданной базе данных, приведены на рис. 5, их пространственное распределение показано на рис. 6. Созданная база данных ОГЯ содержит 97 записей, которые относятся к 75 случаям ОГЯ. Расхождение связано с тем, что каждая запись привязана к определённому населённому

пункту, в то время как некоторые ОГЯ нанесли существенный ущерб в нескольких населённых пунктах. Случаи ОГЯ зафиксированы в 63 различных населённых пунктах (рис. 6). Наиболее паводкоопасными из них можно считать гг. Уфу и Стерлитамак (8 и 5 случаев ОГЯ соответственно). Наибольшее количество объектов, попадающих в зону затопления, также расположено в г. Уфе (свыше 3 500 жилых домов). В целом по бассейну Камы большинство случаев ОГЯ со значительным ущербом было зафиксировано в бассейне р. Белой. Все случаи гибели людей при наводнениях за последние 30 лет также отмечены в бассейне р. Белой.

Большинство случаев ОГЯ в бассейне Камы были вызваны весенним половодьем, однако вклад дождевых и снегодождевых паводков также значителен (рис. 5 а). В 5 случаях зафиксированы факты гибели людей от наводнений, из которых 4 случая связаны с дождевыми паводками. Наибольшее число жертв (по разным данным от 26 до 29 чел.) зафиксировано при прорыве плотины в пос. Тирлянском 07.08.1994 г., который был вызван редким по интенсивности дождевым паводком в верхнем течении р. Белой.

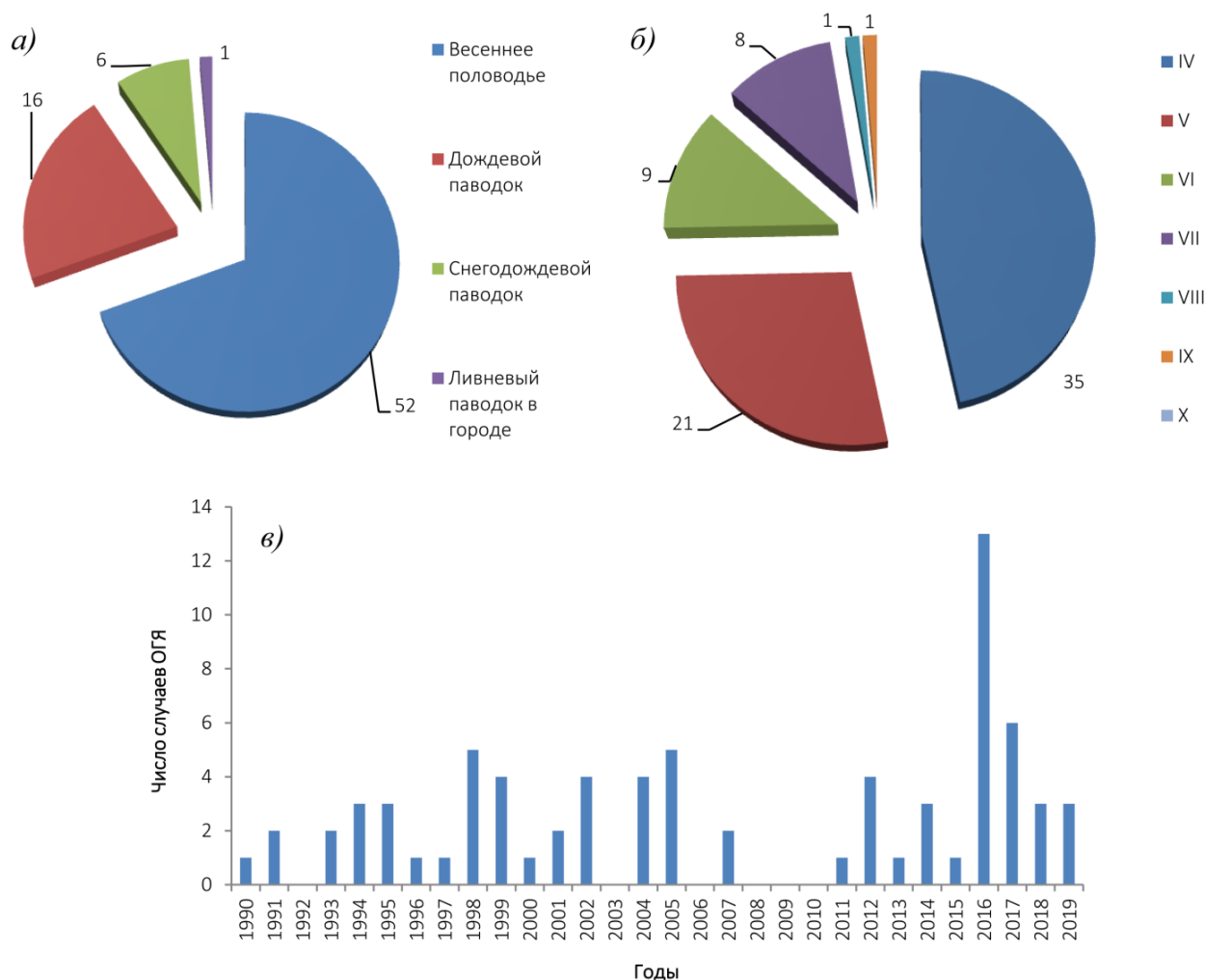


Рис. 5. Распределение числа случаев ОГЯ по причинам возникновения (а), внутригодовое (б) и межгодовое (в) распределение
 Fig. 5. Distribution of the number of hazardous hydrological events by genesis types (а), monthly (б) and inter-annual (в) distribution

Поскольку большинство случаев ОГЯ вызваны весенним половодьем, наибольшее число их отмечалось в апреле и мае (рис 5 б). В межгодовом распределении максимум приходится на 2016 г., когда высокое половодье наблюдалось во всей северной половине бассейна р. Камы.

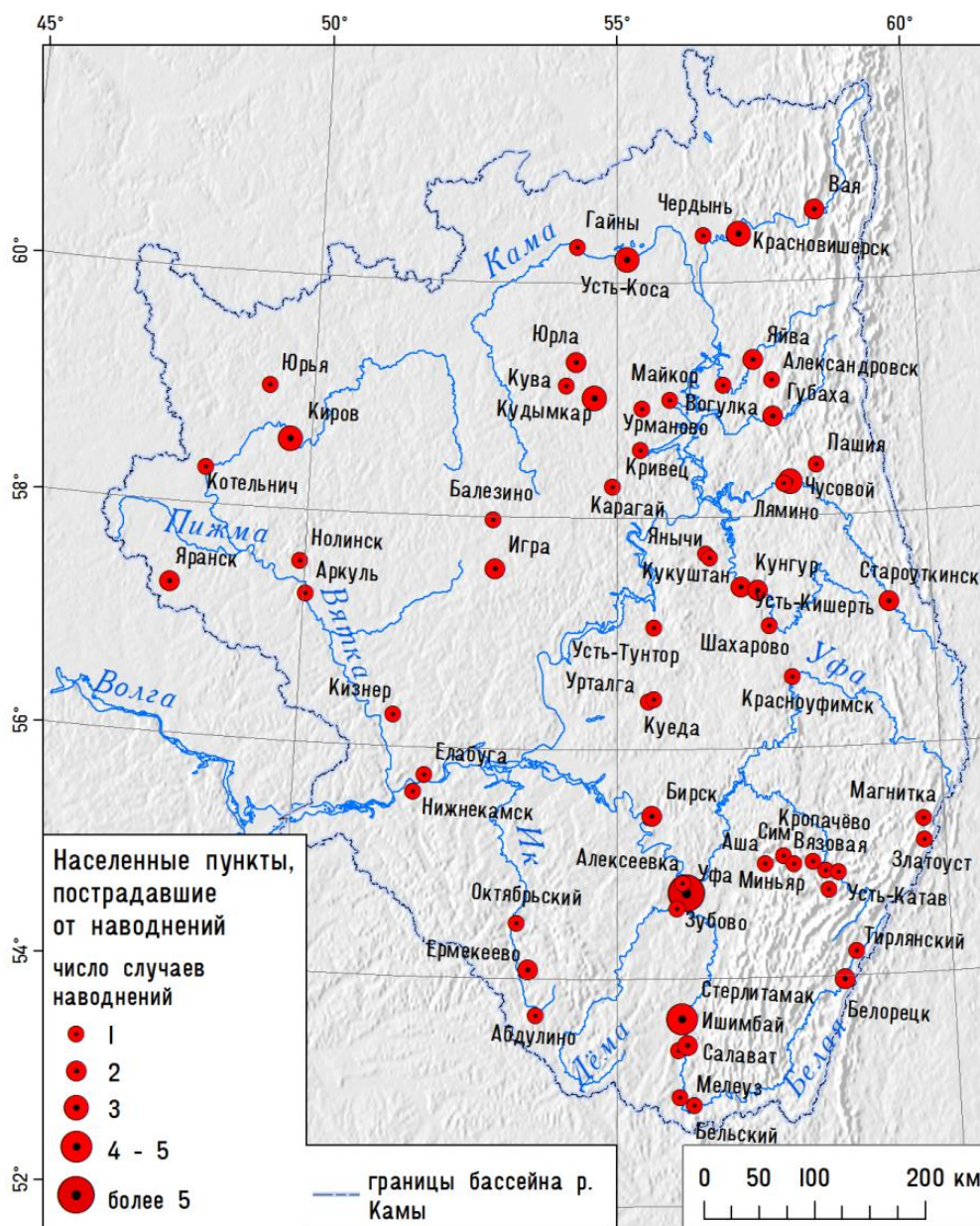


Рис. 6. Населённые пункты в бассейне Камы, в которых наблюдались ОГЯ
 Fig. 6. Settlements in the Kama river basin, where hazardous hydrological events were observed

Характеристика зон затопления в поймах крупных рек бассейна Камы, выделенных по снимкам Landsat

Максимальные площади сезонного затопления выявлены в поймах рр. Белой (1730 км² по снимкам за 27.04. и 04.05.1991), Чепцы (497 км² по снимку за 23.04.1991) и Вятки (1068 км² по снимкам за 25–27.04.2016). Эти данные согласуются с экстремальными характеристиками весенних половодий 1991 и 2016 гг. Половодье 1991 г. в южной части бассейна

Камы было одним из самых высоких за последние 40 лет [Разумов и др., 2018]. Половодье 2016 г. в бассейне Вятки было самым высоким с 1998 г.

Также значительные площади затопления фиксировались по спутниковым данным Landsat весной 1985 г. (рр. Сылва, Чепца), 1987 г. (рр. Сылва, Чусовая), 1998 г. (все реки центральной и южной части Пермского края), 2001 г. (центральная, южная часть Пермского края, Удмуртия и Башкортостан). В последние полтора десятилетия в целом по бассейну Камы наблюдалась тенденция к снижению повторяемости высоких половодий; исключением стало аномально высокое половодье 2016 г.

Полученные оценки площади зон затопления по спутниковым снимкам пока являются недостаточно репрезентативными. Редкая повторяемость высоких половодий, а также наличие облачности в момент съёмки не позволяет зафиксировать по спутниковым данным максимальные площади разливов для многих рек. Так, для бассейнов рек центральной и южной части Пермского края, в которых самыми высокими за период действия съёмочной системы Landsat были половодья 1987, 1998 и 2016 гг., не удалось получить ни одного малооблачного снимка за соответствующие периоды.

ВЫВОДЫ

Разработанный картографический сервис является одним из первых в России открытых информационных ресурсов, предоставляющих данные об опасных гидрологических явлениях и характеристиках снежного покрова в бассейнах рек. Его пользователями могут быть региональные УГМС, а также Камское бассейновое водное управление и другие организации, заинтересованные в оперативном получении гидрологической информации.

Дальнейшее развитие сервиса предполагается в нескольких направлениях:

- реализация прогноза расходов и уровней воды по выбранным гидропостам, расположенным в зонах максимального риска возникновения ОГЯ. Для этого планируется использовать концептуальную модель формирования стока НВУ;

- разработка новых инструментов картографической визуализации данных;

- дополнение созданной базы данных о случаях ОГЯ в бассейне р. Камы. Предполагается модификация структуры базы данных в соответствии с рекомендациями, предложенными в работе [Napolitano et al., 2018], что позволит структурировать информацию оптимальным образом и более детально отобразить условия возникновения каждого случая ОГЯ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант № 17-05-01001-а.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, grant No 17-05-01001-a.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Система прогнозирования паводков и раннего оповещения о наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани. Труды Гидрометцентра РФ. Спец. вып. 356, 2015. 247 с.
2. Дерюгина В.В., Борщ С.В., Кровотынцев В.А., Симонов Ю.А. Веб-ГИС системы мониторинга и прогнозирования гидрологической обстановки в бассейнах крупных рек России с использованием наземных и спутниковых данных. Тезисы докладов XVII Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса». М.: ИКИ РАН, 2019. С. 84.
3. Преснякова А.Н., Писарев А.В., Храпов С.С. Исследование динамики затопления территории Волго-Ахтубинской поймы по данным космического мониторинга. Вестник

Волгоградского государственного университета. Серия 1. Математика. Физика, 2017. № 1 (38). С. 66–74.

4. Пьянков С.В., Шихов А.Н., Михайлюкова П.Г. Моделирование снегонакопления и снеготаяния в бассейне р. Кама с применением данных глобальных моделей прогноза погоды. Лёд и снег, 2019. Т. 59. № 4. С. 494–508. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-4-423.

5. Разумов В.В., Качанов С.А., Разумова Н.В., Чуриков А.Г., Шагин С.И., Беккиев М.Ю., Глушко А.Я., Пчёлкин М.И., Фролко С.В. Масштабы и опасность наводнений в регионах России. М.: ВНИИ ГОЧС, 2018. 364 с.

6. Толстых М.А. Глобальные модели атмосферы: современное состояние и перспективы развития. Труды Гидрометцентра России, 2016. № 1. С. 5–33.

7. Danielson J.J., Gesch D.B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010). Open-File Report 2011–1073. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2011. 26 p.

8. Frolov A.V., Asmus V.V., Borshch S.V., Vil'fand R.M., Zhabina I.I., Zatyagalova V.V., Krovotyntsev V.A., Kudryavtseva O.I., Leont'eva E.A., Simonov Y.A., Stepanov Y.A. GIS-Amur system of flood monitoring, forecasting, and early warning. Russian Meteorology and Hydrology, 2016. V. 41 (3). P. 157–169. DOI: 10.3103/S1068373916030018.

9. Frolova N.L., Kireeva M.B., Magrickiy D.V., Bologov M.B., Kopylov V.N., Hal J., Semenov V.A., Kosolapov A.E., Dorozhkin E.V., Korobkina E.A., Rets E.P., Akutina Y., Djamalov R.G., Efremova N.A., Sazonov A.A., Agafonova S.A., Belyakova P.A. Hydrological hazards in Russia: origin, classification, changes and risk assessment. Natural Hazards, 2017. V. 88. P. 103–131. DOI: 10.1007/s11069-016-2632-2.

10. Napolitano E., Marchesini I., Salvati P., Donnini M., Bianchi C., Guzzetti F. LAND-deFeND — An innovative database structure for landslides and floods and their consequences. Journal of Environmental Management, 2018. V. 207. P. 203–218. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.11.022.

11. Olthof I. Mapping seasonal inundation frequency (1985–2016) along the St-John river, New Brunswick, Canada using the Landsat archive. Remote Sensing, 2017. V. 9 (2). Art. No 143. DOI: 10.3390/rs9020143.

12. Qi S., Brown D.G., Tian Q., Jiang L., Zhao T., Bergen K.M. Inundation extent and flood frequency mapping using LANDSAT imagery and digital elevation models. GIScience & Remote Sensing, 2009. V. 46 (1). P. 101–127. DOI: 10.2747/1548-1603.46.1.101.

13. Pyankov S.V., Kalinin N.A., Shikhov A.N., Abdullin R.K., Bykov A.V. Simulation of snow cover formation and melt with publication of the output data on the web map service (on the example of Kama river basin). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. V. 321. Art. No 012009. DOI: 10.1088/1755-1315/321/1/012009.

14. Pyankov S.V., Shikhov A.N., Kalinin N.A., Sviyazov E.M. A GIS-based modeling of snow accumulation and melt processes in the Votkinsk reservoir basin. Journal of Geographical Sciences, 2018. V. 28 (2). P. 221–237. DOI: 10.1007/s11442-018-1469-x.

15. Wang X., Wang J., Che T., Huang X., Hao X., & Li H. Snow cover mapping for complex mountainous forested environments based on a multi-index technique. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018. V. 11 (5). P. 1433–1441. DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2810094.

REFERENCES

1. Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Flood forecasting and early warning system on the rivers of the Black Sea coast of the Caucasus and the Kuban basin. Proceedings of the Hydro-meteorological Center of the Russian Federation. Spec. Issue 356, 2015. 247 p. (in Russian).
2. Danielson J.J., Gesch D.B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010). Open-File Report 2011–1073. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2011. 26 p.
3. Deryugina V.V., Borsch S.V., Krovotyntsev V.A., Simonov Yu.A. Web-GIS system for monitoring and forecasting of the hydrological situation in the basins of large rivers of Russia using ground-based and satellite data. Abstracts of the XVII All-Russian Open Conference “Current

- Problems in Remote Sensing of the Earth from Space”. Moscow: Space Research Institute of RAS, 2019. P. 84 (in Russian).
4. Frolov A.V., Asmus V.V., Borshch S.V., Vil'fand R.M., Zhabina I.I., Zatyagalova V.V., Krovotyntsev, V.A., Kudryavtseva O.I., Leont'eva E.A., Simonov Y.A., Stepanov Y.A. GIS-Amur system of flood monitoring, forecasting, and early warning. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016. V. 41 (3). P. 157–169. DOI: 10.3103/S1068373916030018.
 5. Frolova N.L., Kireeva M.B., Magrickiy D.V., Bologov M.B., Kopylov V.N., Hal J., Semenov V.A., Kosolapov A.E., Dorozhkin E.V., Korobkina E.A., Rets E.P., Akutina Y., Djamalov R.G., Efremova N.A., Sazonov A.A., Agafonova S.A., Belyakova P.A. Hydrological hazards in Russia: origin, classification, changes and risk assessment. *Natural Hazards*, 2017. V. 88. P. 103–131. DOI: 10.1007/s11069-016-2632-2.
 6. Napolitano E., Marchesini I., Salvati P., Donnini M., Bianchi C., Guzzetti F. LAND-deFeND — An innovative database structure for landslides and floods and their consequences. *Journal of Environmental Management*, 2018. V. 207. P. 203–218. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.11.022.
 7. Olthof I. Mapping seasonal inundation frequency (1985–2016) along the St-John river, New Brunswick, Canada using the Landsat Archive. *Remote Sensing*, 2017. V. 9 (2). Art. No 143. DOI: 10.3390/rs9020143.
 8. Presnyakova A.N., Pisarev A.V., Khrapov S.S. The study of the dynamics of flooding of the Volga-Akhtuba floodplain based on space monitoring. *Bulletin of Volgogradsky State University. Series 1. Mathematics. Physics*, 2017. V. 1 (38). P. 66–74 (in Russian).
 9. Pyankov S.V., Kalinin N.A., Shikhov A.N., Abdullin R.K., Bykov A.V. Simulation of snow cover formation and melt with publication of the output data on the web map service (on the example of Kama river basin). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019. V. 321. Art. No 012009. DOI: 10.1088/1755-1315/321/1/012009.
 10. Pyankov S.V., Shikhov A.N., Kalinin N.A., Sviyazov E.M. A GIS-based modeling of snow accumulation and melt processes in the Votkinsk reservoir basin. *Journal of Geographical Sciences*, 2018. V. 28 (2). P. 221–237. DOI: 10.1007/s11442-018-1469-x.
 11. Pyankov S.V., Shikhov A.N., Mikhaylyukova P.G. Simulation of snow accumulation and melting in the Kama river basin using data from global prognostic models. *Ice and Snow*, 2019. V. 59. No 4. P. 494–508. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-4-423 (in Russian).
 12. Qi S., Brown D.G., Tian Q., Jiang L., Zhao T., Bergen K.M. Inundation extent and flood frequency mapping using LANDSAT imagery and digital elevation models. *GIScience & Remote Sensing*, 2009. V. 46 (1). P. 101–127. DOI: 10.2747/1548-1603.46.1.101.
 13. Razumov V.V., Kachanov S.A., Razumova N.V., Chirikov A.G., Shagin S.I., Bekkiev M.Yu., Glushko A.Ya., Pchelkin M.I., Frolko S.V. The extent and hazard of floods in the regions of Russia. Moscow: Civil Defense and Disaster Management All-Russian Science Research Institute, 2018. 364 p. (in Russian).
 14. Tolstykh M.A. Global atmospheric models: current status and development prospects. *Proceedings of the Hydrometeorological Center of Russia*, 2016. V. 1. P. 5–33 (in Russian).
 15. Wang X., Wang J., Che T., Huang X., Hao X., Li H. Snow cover mapping for complex mountainous forested environments based on a multi-index technique. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018. V. 11 (5). P. 1433–1441. DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2810094.
-