


Веб-приложение «Водный режим рек Европейской территории России»: структура и функциональные возможности

Н.А. Фролова , Т.Е. Самсонов , М.Б. Киреева , В.Н. Семин ,

А.А. Энтин 

 frolova_nl@mail.ru

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Европейская территория России характеризуется разнообразием природных условий и особенностями водопользования. Рассматриваемый регион представляет большой интерес и в связи с тем, что наблюдаемые здесь климатические изменения в значительной степени влияют на водный режим рек. Для интеграции, отображения и анализа данных о водном режиме рек ЕТР и его изменении в научных и образовательных целях силами гидрологов и картографов МГУ имени М.В.Ломоносова разработано веб-приложение «Водный режим рек Европейской территории России». **Методы.** Веб-приложение создано на основе открытых технологий с использованием двухуровневой архитектуры: сервер баз данных (MySQL) и веб-сервер (Apache + OpenLayers). Для построения приведенных в приложении карт использованы данные 625 метеостанций, включающих срочные измерения и суточные величины, данные о запасах воды в снежном покрове по 284 снегомерным маршрутам. В рамках веб-приложения организована возможность выполнения запросов к данным по гидропостам через картографический интерфейс. **Результаты.** Приложение предоставляет доступ к базам данных и картам, характеризующим месячные, годовые и срочные максимальные расходы воды. Отработана функциональность выполнения запросов к данным по гидропостам через картографический интерфейс, возможность выгрузки данных, динамического расчета параметров стока и статистической обработки полученных величин с помощью стандартных критериев, визуализации отдельных параметров в виде графиков. На основе полученных карт выявлен ряд пространственно-временных тенденций, таких, как интенсификация гидрологического цикла; увеличение годового слоя стока в средней полосе Европейской территории России; увеличение абсолютной и относительной неравномерности стока летней межени; снижение максимальных расходов воды; значительное изменение соотношения долей источников питания для большей части рек, наиболее важной особенностью которого является уменьшение снегового питания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водный режим, классификация, база данных, тематическое картографирование, геоинформационные технологии, веб-приложение, Европейская территория России.


Финансирование: Методические подходы апробированы в рамках гранта РФФ № 24-17-00084.

Для цитирования: Фролова Н.А., Самсонов Т.Е., Киреева М.Б., Семин В.Н., Энтин А.А., Веб-приложение «Водный режим рек Европейской территории России»: структура и функциональные возможности // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 2. С. 6–22. DOI:10.35567/19994508-2024-2-6-22.

Дата поступления 18.01.2024.

WEB APPLICATION «WATER REGIME OF THE RIVERS OF THE EUROPEAN PART OF RUSSIA»: STRUCTURE AND FUNCTIONALITY

Natalia L. Frolova  , Timofey E. Samsonov , Maria B. Kireyeva , Vladimir N. Semin , Andrey L. Entin 

 frolova_nl@mail.ru

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Relevance. The European territory of Russia (ETR) is characterised by a variety of natural conditions and diverse water use. The region under consideration is also of great interest due to the fact that the observed climatic changes here also significantly influence changes in the water regime of rivers. To integrate, display and analyze data on the water regime of the rivers of the ETR and its changes for scientific and educational purposes, hydrologists and cartographers of the Lomonosov Moscow State University developed a web application “Water regime of the rivers of the ETR”. **Methods.** The application is based on open technologies with the use of two-level architecture: data base server (MySQL) and web-server (Apache + OpenLayers). To plot the maps cited into the application we used the data of 625 meteorological stations that include dated measurements and daily values, as well as data on water resources in snow cover by 284 snow-gauging routs. The web-application provides the possibility to make queries to the hydrological posts’ data through the mapping interface. **Results.** Based on the maps obtained, a number of spatial and temporal trends were identified, such as intensification of the hydrological cycle; increase in the annual runoff layer in the middle belt of the UTR; increase in the absolute and relative irregularity of summer low-water flow; decrease in the maximum water discharge; significant change in the ratio of the shares of water supply sources for most of the UTR rivers, the most important feature of which is a decrease in the share of snow supply.

Keywords: water regime, classifications, databases, mapping, thematic mapping, geo/information technologies, web applications.

Financing: The methodical approaches have been used within the framework of grant RNF No. 24-17-00084.

For citation: Frolova N.L., Samsonov T.E., Kireyeva M.V., Semin V.N., Entin, A.L. WEB application “Water Regime of the Rivers of the European Part of Russia”: Structure and functionality. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 1. P. 6–22. DOI: 10.35567/19994508-2024-2-6-22.

Received 18.01.2024.

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные исследования последствий современных изменений климата и их влияния на сток рек [1–3] свидетельствуют о том, что в ряде крупных регионов России, в т. ч. на Европейской территории России (ЕТР), стали очевидными существенные изменения водного режима рек. При высокой вероятности продолжения этой тенденции в ближайшие десятилетия на первый план выходит проблема оценки изменений речного стока, тем более что обеспечение решения задач водохозяйственного и гидротехнического проектирования требует надежного определения параметров режима речного стока.

Водный режим рек – важнейшая характеристика поверхностных вод суши, как компонента природной среды и активного фактора формирования ландшафта. Численные показатели водного режима имеют непосредственный прак-

тический интерес для любой отрасли экономики, связанной с использованием речных вод или подверженной их воздействию. В настоящее время одной из актуальных задач является адаптация водного хозяйства к существующим современным тенденциям изменения характеристик водного режима рек.

Создание специализированных баз данных, содержащих информацию о характеристиках климата и стока рек, тематических электронных ГИС-проектов и карт – современное и весьма актуальное направление развития гидрологии. Учет большого объема гидрометеорологической информации, автоматизация средств обработки и интерпретации данных о характеристиках речного стока, технологии баз данных и геоинформационных систем дают возможность перейти к количественным, построенным на основе точных расчетов параметрам стока и к разработке новых критериев, характеризующих для различных отраслей экономики особенности формирования водного режима рек.

Значительным вкладом в формирование единого информационного пространства на основе объединения информационных ресурсов, получаемых при проведении государственного мониторинга водных объектов организациями различной ведомственной принадлежности, является «Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов Российской Федерации» (АИС ГМВО)¹. Открытый после соответствующей регистрации доступ к размещенным данным позволяет получить целый ряд важных научных и практических результатов во многих областях гидрологии.

В России есть опыт создания и бассейновых ГИС различного целевого назначения и территориального охвата. Первые такие ГИС обеспечивали систематизацию данных многолетних наблюдений и расчет пространственного распределения гидрометеорологических параметров [4]. В последующие годы было разработано множество бассейновых ГИС разного функционального назначения (от визуализации и анализа данных оперативного мониторинга и прогноза наводнений до оценки ландшафтных характеристик, эрозии почв и твердого стока в бассейнах рек). Некоторые из них опубликованы как картографические веб-сервисы в открытом или ограниченном доступе. В частности, ГИС Центра регистра и кадастра², которая может служить источником оперативных данных наблюдений гидрологических постов. Среди наиболее значимых бассейновых ГИС, обеспечивающих визуализацию гидрологических прогнозов, можно выделить ГИС-Амур и ГИС-Волга, разработанные ФГБУ НИЦ «Планета» [5, 6] и систему прогнозирования паводков и раннего оповещения о наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани, разработанную Гидрометцентром России [7].

Среди отечественных разработок следует выделить и геопортал «Речные бассейны Европейской России», разработанный специалистами Института экологии и природопользования Казанского федерального университета³.

¹ Электронный ресурс: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения: 10.01.2024).

² Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России. Режим доступа: <http://gis.vodinfo.ru> (дата обращения 12.07.2023).

³ Речные бассейны Европейской части России / ActiveMap Online, Казанский федеральный университет, Институт экологии и природопользования, 2015. Режим доступа: <http://bassepr.kpfu.ru> (дата обращения 28.04.2020).

Геопортал предоставляет разнообразные гидрометеорологические данные, сгруппированные по малым водосборам ЕТР. Базовый слой «Бассейны» содержит 53 865 бассейнов малых рек и межприточных пространств. Малые водосборы рассчитаны аналитически по ЦМР GMTED2010 [8] с пространственным разрешением 250 м и по цифровой карте гидрографической сети масштаба 1:1 000 000 с привлечением контуров объектов гидрографии с топографических карт [9, 10].

Гидрологически направленный ресурс FluentHydro разработан для Северо-Запада России⁴. Портал работает в тестовом режиме и содержит набор слоев, отражающих гидрологическую изученность и возможность визуализации сеточных поверхностей, рассчитанных на основе сценариев изменений климата. Также предусмотрена возможность выгрузки информации за период с 2008 по 2017 гг. Необходимо также отметить картографическую базу данных опасных гидрологических явлений в бассейне р. Селенги⁵. Данные об опасных гидрологических явлениях в структуре ГИС привязаны к слою населенных пунктов, в которых они наблюдались, структура их атрибутивного описания представлена в работе [11].

Прообраз национальной ГИС, предоставляющей системный обзор наиболее значимых экстремальных погодных и климатических явлений на территории России, создан в ИГРАН⁶. В системе представлена информация не только о характеристиках опасных гидрологических явлений, но и проанализированные данные об изменениях климата, в т. ч. о повторяемости и интенсивности экстремальных событий, а также тенденции будущих изменений согласно модельным расчетам.

Среди региональных баз данных можно отметить Ecrins (European catchments and rivers network system)⁷. Набор векторных пространственных данных представлен по Европе (в т. ч. ЕТР) и Ближнему Востоку, включает реки, озера, элементарные и агрегированные водосборные бассейны, плотины, препятствия, гидропосты.

CatchX – веб-приложение, позволяющее в пределах выбранного водосборного бассейна визуализировать временные изменения за 25 лет по осадкам, температуре, суммарному испарению, стоку и типам почвенно-растительного покрова. Границы водосборов взяты на весь мир по HydroBASINS – всего 57 646 бассейнов⁸.

В последние годы подобные веб-порталы становятся основой мониторинга и прогнозирования опасных гидрометеорологических явлений. Так, к примеру, сервис Google развивает портал по глобальному прогнозу наводнений на

⁴ FluentHydro, 2019. Режим доступа: <http://185.204.0.167/portal/map.html> (дата обращения 28.04.2020).

⁵ Электронный ресурс: <http://selenga.psu.ru> (дата обращения 10.01.2024).

⁶ Электронный ресурс: <http://extremeclimate.ru> (дата обращения 10.01.2024).

⁷ Ecrins (European catchments and rivers network system) / EU Open Data Portal, European Environment Agency, 2019. Режим доступа: https://data.europa.eu/euodp/en/data/dataset/data_european-catchments-and-rivers-network (дата обращения 28.04.2020).

⁸ CatchX – Catchment Water Explorer App / Esri, ESA Climate Change Initiative, 2017, Earth2Observe, 2014. Режим доступа: <https://ewgis.org/catchx-global/> (дата обращения 28.04.2020).

основе алгоритмов машинного обучения [12, 13]. Ресурс может быть запущен в глобальном масштабе в ближайшие 2–3 года. С использованием алгоритмов машинного обучения начала работу система открытого краткосрочного прогнозирования стока для некоторых рек России – OpenForecast⁹, в основе которой лежат данные гидрологического мониторинга и использование физико-математических моделей глобальной циркуляции атмосферы и океана, а также данные по формированию речного стока.

Среди удачно реализованных национальных систем мониторинга режима водных объектов можно выделить eNud (Австрия) и VIGICRUE (Франция). В большинстве развитых стран Европы архивные и оперативные характеристики стока объединены в рамках одного сервиса и доступны любому пользователю. Обычно такие сервисы имеют встроенный картографический блок, позволяющий найти нужную станцию на карте. Подобная схема реализована для архивов в Финляндии, Австрии и США. Для крупных рек создано большое количество региональных баз данных и сервисов, как, например, проект по мониторингу водных ресурсов в бассейне Дуная (DORIS).

В России оперативная информация по уровням воды официально не является общедоступной и не публикуется Росгидрометом открыто. Отдельные территориальные управления частично размещают оперативную информацию на своих сайтах. Так, например, по Северо-Западному УГМС доступны оперативные уровни воды в Неве и Финском заливе¹⁰. Существующая Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО)¹¹ доступна только для учетных записей сотрудников Росгидромета.

На сайте Центра Регистра и Кадастра¹² зарегистрированные ранее пользователи могут получить оперативную информацию по уровням воды на части гидрологических постов в пределах Российской Федерации. Единственной открытой системой оперативных уровней воды на реках России является портал AllRivers¹³. Однако информация здесь носит ознакомительный характер и не является официальной, основная цель портала – поддержка водного туризма в регионах России.

Новым веб-сервисом является портал «Водный режим рек ЕТР»¹⁴, разработанный специалистами кафедры гидрологии суши и картографии и

⁹ OpenForecast: веб-портал по общедоступному гидрологическому прогнозированию. Режим доступа: <https://openforecast.github.io> (дата обращения 28.04.2020).

¹⁰ Карта фактического уровня воды в Финском заливе и реке Неве / ФГБУ Северо-Западное УГМС / Росгидромет. Google, 2020. Режим доступа: http://www.meteo.nw.ru/weather/lo_levelsd.php (дата обращения 28.04.2020).

¹¹ ЕСИМО (Единая Система мониторинга Мирового океана) / Центр океанографических данных ФГБУ ВНИИГМИ-МЦД. Режим доступа: <http://esimo.ru/portal/> (дата обращения 28.04.2020).

¹² Центр Регистра и Кадастра: информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России, 2014. Режим доступа: <http://gis.vodinfo.ru/> (дата обращения 28.04.2020).

¹³ AllRivers: уровень воды онлайн. Режим доступа: <https://allrivers.info> (дата обращения 28.04.2020).

¹⁴ Водный режим рек ЕТР. Режим доступа: <https://carto.geogr.msu.ru/water-regime-etr/index.html>. (дата обращения 13.01.2024).

кафедры геоинформатики МГУ имени М.В.Ломоносова. На портале реализована привязка данных не только к гидрологическим постам, но и к их бассейнам, предусмотрена возможность выгрузки данных, динамического расчета параметров стока и статистической обработки полученных величин с помощью стандартных критериев, визуализации отдельных параметров в виде графиков. Отдельный блок включает созданные авторами карты. Структуре и особенностям этого веб-приложения и посвящена данная статья.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Доступ к приложению осуществляется через веб-браузер, адрес сайта: <https://carto.geogr.msu.ru/water-regime-etr/index.html>. Веб-приложение создано на основе открытых технологий с использованием двухуровневой архитектуры: сервер баз данных (MySQL) и веб-сервер (Apache + OpenLayers). В рамках веб-приложения организована возможность выполнения запросов к данным по гидропостам через картографический интерфейс.

Пользователям доступны месячные и срочные максимальные расходы воды по более чем 600 гидрологическим постам 237 бассейнов рек Европейской территории России (ЕТР) с 1945 по 2020 годы. Местоположение гидропостов, координаты которых изначально известны с точностью до сотых долей градуса, было уточнено путем привязки к ближайшей точке соответствующего водотока на цифровой топографической карте масштаба 1:1 000 000. Границы бассейнов гидропостов выделены автоматически по цифровой модели GMTED2010 с разрешением 15" с последующей ручной верификацией. Для этого была использована ранее разработанная методика, позволяющая выполнить согласование ЦМР и гидрографической сети, представленной векторными объектами (использовали данные картографических основ ВСЕГЕИ) [15].

Для построения приведенных в приложении карт использованы данные 625 метеостанций, включающие срочные измерения и суточные величины, сведения о запасах воды в снежном покрове по 284 снегомерным маршрутам по данным ВНИИГМИ – МЦД. Кроме того, в представленной работе для исследования изменений режима температуры воздуха и осадков использованы пространственно-временные модели метеорологических характеристик на регулярной сетке (реанализы) ERA-40, EObs и ERA Interim [16]. Общий временной охват данных, благодаря пополнению реанализов после их выхода, включает период 1959–2018 гг.

В базе, составляющей основу приложения, хранятся следующие данные:

- гидрологические посты (два точечных набора данных: отдельно для отображения месячных расходов и для максимальных расходов);
- границы водосборных бассейнов гидрологических постов, для которых известны месячные расходы (полигональный набор данных);
- таблица метаданных постов и водосборов;
- таблицы месячных расходов;
- таблицы максимальных расходов.

Геометрические объекты не содержат значимой семантики, кроме уникального идентификатора поста. Соединение таблиц для выборки, визуализации и расчета производных параметров осуществляется по этому идентификатору.

На основе разработанной базы данных составлена серия из более чем 60 карт параметров водного режима, а также связанных с ними климатических параметров. Единицами картографирования на гидрологических картах являются водосборные бассейны, а также точки гидропостов. Поскольку большинство рассчитанных параметров характеризуют в относительных величинах суммарный сток с водосбора, приуроченного к каждому гидропосту, привязка этих параметров к площадным объектам имеет под собой географические основания и позволяет повысить читаемость карт, выделить характер распределения картографируемых величин по территории. Картографирование по точкам гидропостов осуществлялось в тех случаях, когда распределение расчетных параметров по площади бассейна неправомерно, либо на комплексных картах, где картографируется несколько характеристик и площади бассейнов уже «заняты» отображением другого параметра. Метеорологические параметры картографируются на основе данных реанализов в градусной сетке, единицей картографирования на них является, соответственно, ячейка криволинейного раstra.

Разработанная на основе обозначенных выше принципов серия карт включает аналитические, синтетические и комплексные карты среднемноголетних величин за два периода: «исторический» (до 1977 г.) и «современный» (с 1978 г. по настоящее время). Дополнительно также приводятся карты параметров водосборов: заболоченности, залесенности, распаханности, доли лугов. Карты составлялись в конической равновеликой проекции с параллелями касания 45° с.ш. и 65° с.ш. и центральным меридианом 30° в.д. в масштабе 1:14 000 000. Эта проекция характеризуется отсутствием искажений площадей и умеренными искажениями углов, а масштаб позволяет поместить территорию ЕТР на листе формата А4 при подготовке статичных карт [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При загрузке приложения отображаются две компоненты интерфейса: карта и панель выборки. На карте представлены гидрологические посты, данные о которых есть в базе. Выбор гидропоста можно осуществить с помощью карты (нажатием левой кнопки мыши на точке, соответствующей посту) или в панели выборки посредством выбора из выпадающего списка «Гидропост». При выборе гидропоста отображаются границы его водосборного бассейна (рис. 1). Если при этом навести курсор на другой гидропост, его бассейн также будет показан. В правом нижнем углу отображаются метаданные гидропоста: дата открытия и закрытия; река, на которой расположен пост; створ; расстояние от устья реки; принадлежность поста; географические координаты (с точностью до 1 минуты) и высота поста в Балтийской системе высот. Здесь же показаны характеристики водосборного бассейна – площадь, средняя высота, озерность, залесенность.

Опции управления картой стандартны для веб-сервисов такого рода: увеличение/уменьшение масштаба (зуммирование), перемещение (панорамирование).

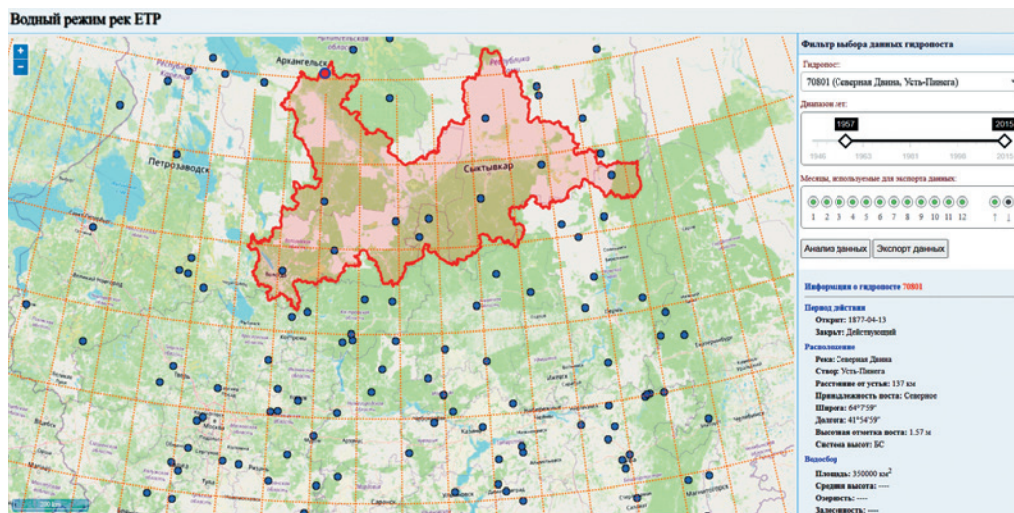


Рис. 1. Общий вид картографического веб-приложения с выделенным гидропостом и границей водосбора.

Fig. 1. General view of the web-mapping application with highlighted gauging station and catchment boundary.

Пользователю доступны две базы данных гидрологических постов: база данных месячных расходов и база данных максимальных расходов. Переключение между ними выполняется в панели выборки. После выбора гидропоста становится доступной панель выбора необходимых лет (перемещение ползунка на графике) и месяцев (только для месячных расходов), а также кнопки «Получить данные» и «Экспортировать данные». Кнопка «Экспортировать данные» позволяет сохранить данные из базы по посту за выбранный период в формате Microsoft Excel. Кнопка «Получить данные» запускает отрисовку графика, отображающего изменение показателя во времени (рис. 2).

В окне графика доступны опции выбора показателя и диапазона данных для отображения. Возможно перемещение графика внутри окна (при зажатой левой кнопке мыши) и масштабирование (с использованием колеса мыши). Первичными данными являются показатели месячных расходов. Все остальные показатели рассчитываются на их основе.

При необходимости можно открыть несколько панелей на разные посты и перемещать их по экрану (рис. 3). При перемещении курсора в окне графика над графиком отображается значение показателя (V) и дата, к которой он относится (T).

В нижней части окна графика отображается временная шкала с разделителем красного цвета, который используется для выбора диапазонов расчета статистических критериев. Разделение гидрологических рядов наблюдений на два хронологических периода и их сравнение позволяет оценить трансформацию водного режима. Наши исследования, как и результаты других авторов, показывают, что современный период берет свое начало примерно с 1978 г., хотя эта граница несколько меняется по территориям (рис. 4).

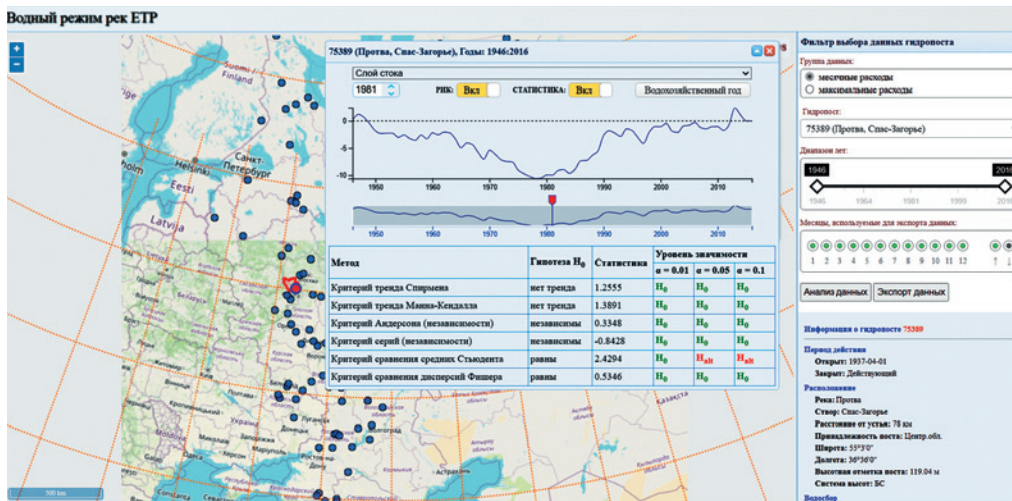


Рис. 2. Панель графиков с отображением данных для выбранного поста.
 Fig. 2. Plots panel showing data for the selected hydrological station

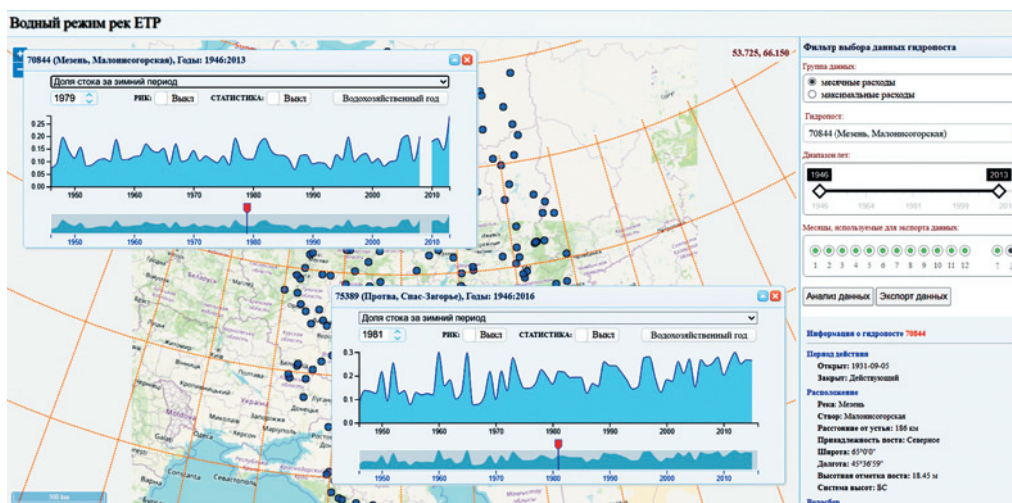


Рис. 3. Несколько графиков в окне браузера.
 Fig. 3. Several plots in the browser window.

Для выбранных данных доступен расчет статистических критериев: критерия тренда Спирмена, критерия тренда Манна-Кендалла, критерия Андерсона (независимости), критерия серий (независимости), критерия сравнений средних Стьюдента и критерия сравнения дисперсий Фишера. Чтобы рассчитать статистические критерии, включается переключатель «Статистика». В таблице, открывающейся внизу основного окна, появляется список критериев, нулевые

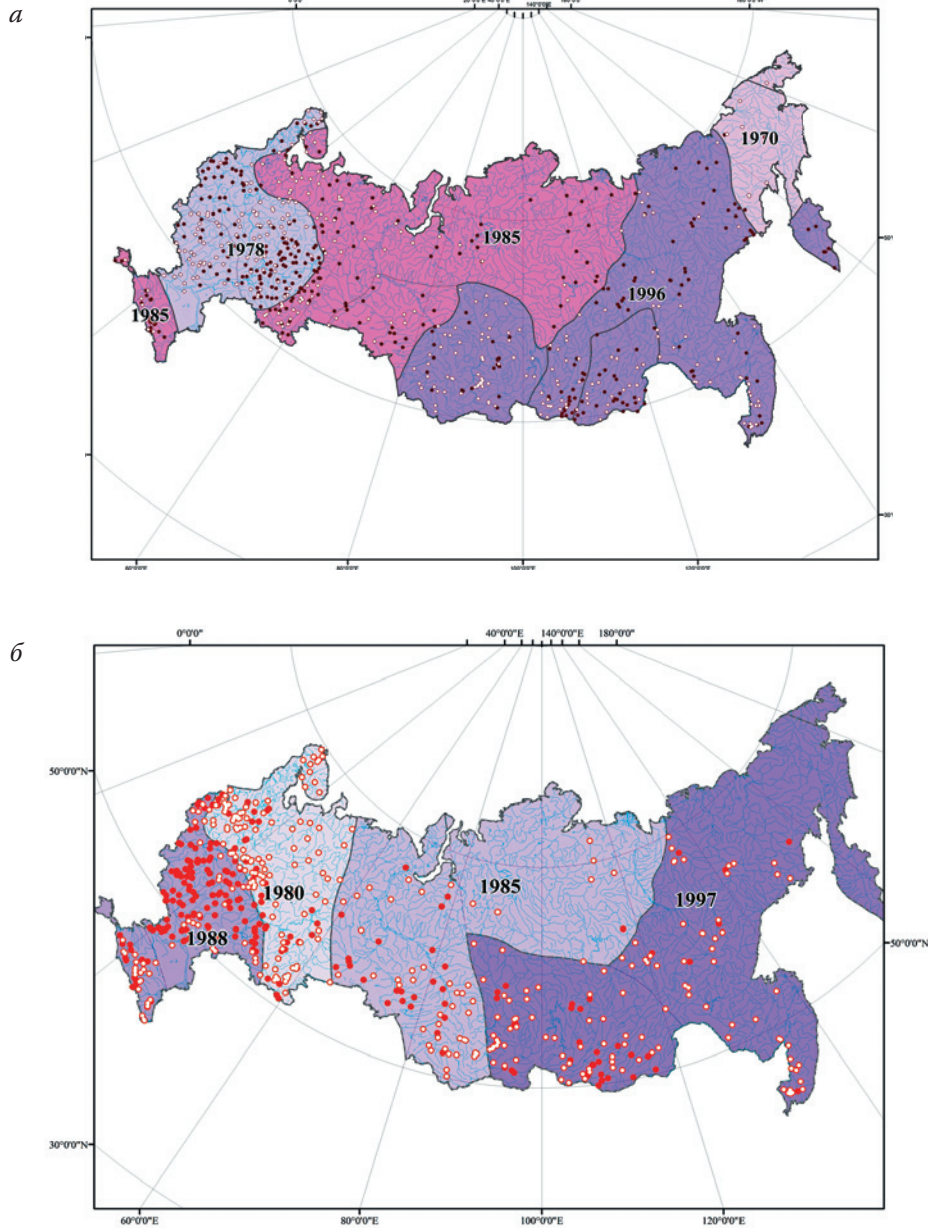


Рис. 4. Распределение даты нарушения стационарности в рядах годового (а) и максимального (б) стоков: точки – используемые гидрологические посты, заливка означает наличие статистической значимости (p -value < 10 %) в обнаружении переломного года [17].

Fig. 4. The distribution of the date of stationarity violation in the series of (a) annual and (b) maximal runoff (the dots show the hydrological gages used, the color means the presence of statistical significance (p -value < 10 %) in the determination of the turning year).

гипотезы, рассчитанное значение статистики, а также решение о принятии или отклонении нулевой гипотезы на разных уровнях значимости (рис. 5).

Для расчета статистических критериев сравнения средних и дисперсий используется разделение выборочной совокупности на два подмножества. Разделение происходит по датам: с помощью поля в левом верхнем углу окна или красного ползунка на шкале времени можно разделить выборочную совокупность на «до» и «после». При изменении даты разделения пересчет статистики выполняется автоматически.

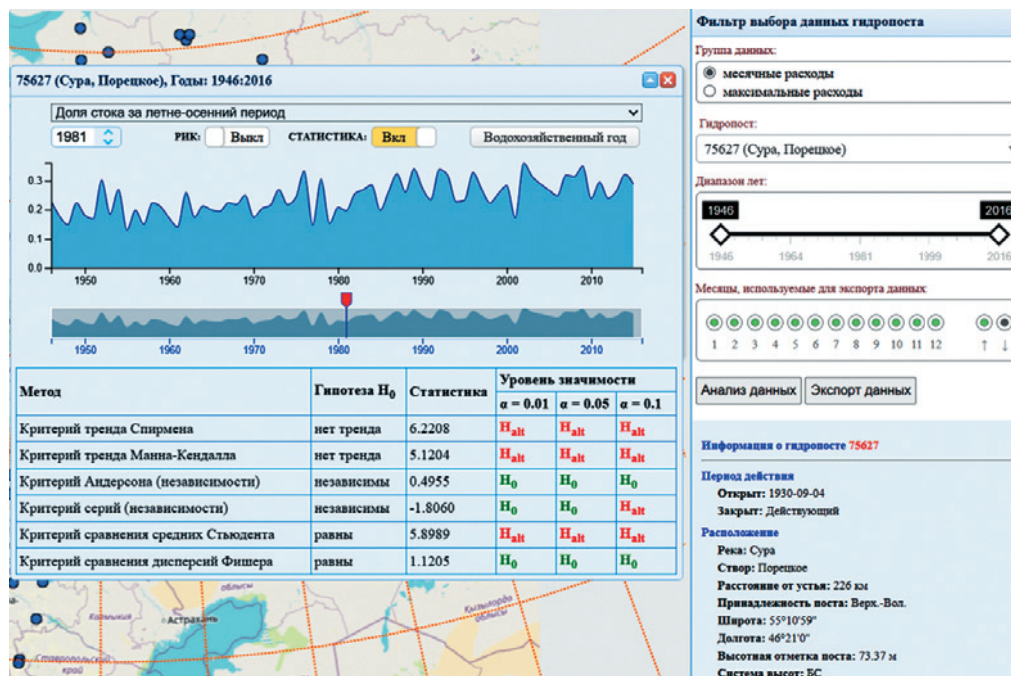


Рис. 5. Список критериев, нулевые гипотезы, рассчитанное значение статистики, а также решение о принятии или отклонении нулевой гипотезы на разных уровнях значимости.

Fig. 5. List of criteria, null hypotheses, calculated value of the statistic, and the decision to accept or reject the null hypothesis at different significance levels.

Переключатель «РИК» служит для включения отображения данных в виде разностной интегральной кривой.

Отдельный блок веб-приложения посвящен картам параметров водного режима, а также связанным с ними климатическим параметрам. Пример карт приведен на рис. 6. Все картографические материалы доступны для скачивания.

Анализ полученных карт показал, что за период 1945–2018 гг., с учетом региональных различий, на ЕТР произошла существенная трансформация водного

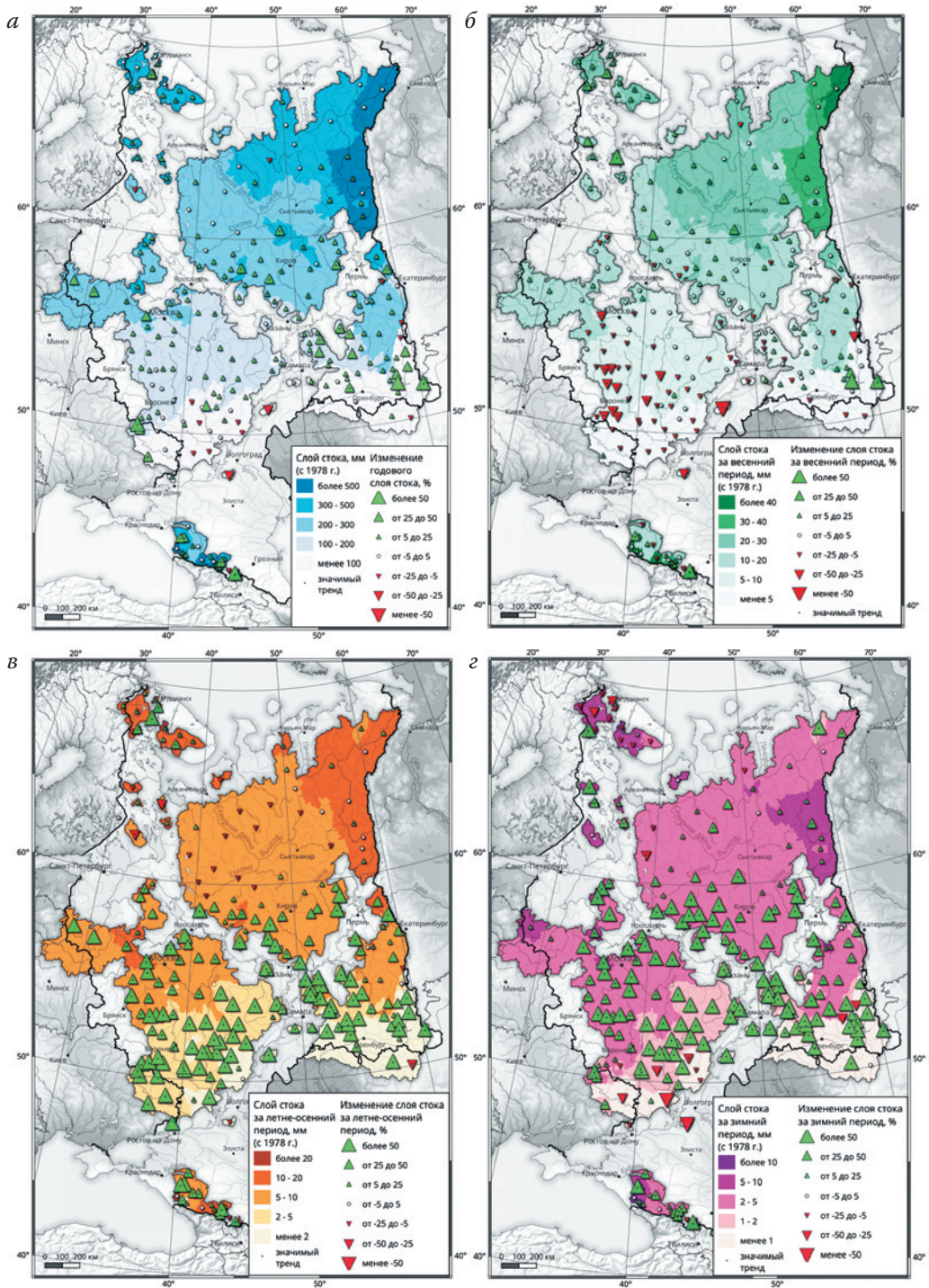


Рис. 6. Изменения слоя стока [17]: а – за год; б – за весенний период; в – за летне-осенний период; г – за зимний период.

Fig. 6. Runoff depth changes: а – year; б – spring period; в – summer-autumn period; г – winter period.

режима, которая стала следствием интенсификации некоторых звеньев гидрологического цикла и проявилась в росте величин и изменении осадков, перераспределении речного стока между сезонами. На большей части ЕТР норма годового слоя осадков за второй период (1978–2018 гг.) по сравнению с первым (1945–1977 гг.) увеличилась незначительно – на 3–9 %. Однако режим выпадения осадков за зимний период претерпел заметную трансформацию. При относительном постоянстве общего количества осадков на большой территории наблюдается существенное увеличение их жидкой компоненты, происходящее во многом за счет сокращения количества твердых осадков. Кроме того, фиксируется значительный рост количества оттепелей (до 20–40 %) и одновременное сокращение числа дней с отрицательными температурами воздуха с запада на восток.

На преобладающем большинстве водосборов водность рек увеличилась на 20–50 % относительно базисного периода. Особенно рост заметен для левобережных притоков Волги и рек северо-западной части Русской равнины. Меньше всего изменения затронули реки Русского Севера и бассейн Дона. Наиболее интенсивное уменьшение максимальных расходов воды фиксируется в бассейнах Дона и Оки. Здесь с конца 1970-х годов снижение максимальных расходов воды составляет в среднем 46 % и 37 % соответственно. Одновременно с этим увеличился разброс дат их прохождения. Заметно снизились весенние максимумы и в нижнем течении Волги. В западной части Русской равнины также фиксируется снижение максимумов весеннего половодья, но здесь оно имеет характер тенденции. На средних и крупных реках северных и восточных районов Европейской территории России тенденция снижения максимумов весеннего половодья практически не выражена. Снижение максимальных расходов воды выявлено для высокогорных водосборов в бассейне Терека (от –5 до –50 %), в то время как для высокогорных водосборов бассейна Кубани заметен рост (25–50 %). Предгорные водосборы в целом испытывают рост максимальных расходов.

На основе проведенных расчетов, связанных с оценкой степени трансформации водного режима и его дальнейшего картографирования, проведена переоценка границ гидрологических сезонов для рек региона, а также многолетних тенденций изменения максимальных суточных расходов воды и времени их прохождения, выявлены пространственные закономерности. Совместный анализ гидрологических и метеорологических данных позволил выделить в общем объеме стока за каждый год составляющие, связанные с грунтовым, сезонным (половодье), паводковым и оттепельным питанием. Анализ полученных данных за два периода свидетельствует о значительном изменении соотношения долей источников питания для большей части рек. Для рек бассейнов Русского Севера по-прежнему преобладает снеговое питание, но для рек бассейна Северной Двины значения уже приближаются к пороговым. В бассейне Верхней Волги в среднем, в основном за счет текущих с северо-востока левобережных притоков, все еще сохраняется преобладание снегового питания. В бассейне Оки, Дона и притоков Средней Волги снеговое питание уже составляет менее 50 %, реки имеют смешанный тип питания с преобладанием подземной составляющей [15, 17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На портале «Водный режим рек ЕТР», разработанном на кафедрах гидрологии суши и картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, впервые реализован картографический интерфейс доступа к многолетним рядам расходов по многочисленным гидропостам Европейской территории России. Отображаемые данные привязаны не только к гидрологическим постам, но и к их бассейнам, предусмотрена возможность выгрузки данных, динамического расчета параметров стока и статистической обработки полученных величин с помощью стандартных критериев, визуализации отдельных параметров в виде графиков.

Отдельный блок посвящен созданным картам, на основе которых сделан ряд важных заключений о пространственной картине изменений водного режима. Картографический и статистический анализы совокупности климатических и гидрологических характеристик выявили реакцию режима вод суши на происходящие в климатической системе изменения. Наблюдаемые тенденции проявляются в трендах на потепление и увеличении количества осадков, а также свидетельствуют о нестационарности климата, повышении числа экстремальных событий.

Полученные результаты имеют потенциал для практического использования при управлении водными ресурсами страны, а созданный веб-ресурс позволяет получить комплексное представление об особенностях водного режима анализируемой территории и его многолетней изменчивости, может быть использован в качестве «типового» решения при выполнении аналогичных исследований для других географических регионов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 600 с.
2. Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.А. Гидрологический режим и водные ресурсы. Гл. 2 // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. Гл. 2. М.: Росгидромет, 2012. С. 53–86.
3. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б. и др. Современные ресурсы подземных и поверхностных вод Европейской части России: Формирование, распределение, использование. М.: ГЕОС, 2015. 315 с.
4. Калинин В.Г., Пьянков С.В. Применение геоинформационных технологий в гидрологических исследованиях. Пермь: Алекс-Пресс, 2010. 217 с.
5. 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. Vol. 41 (3). P. 157–169.
6. Borsch S., Simonov Y., Khristoforov A., Semenova N., Koliy V., Ryseva E., Krovotyntsev V., Derugina V. Russian rivers streamflow forecasting using hydrograph extrapolation method. *Hydrology*. 2022. 9. 1. DOI: 10.3390/hydrology9010001.
7. 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 // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2015. № 356. С. 1–247.
8. Danielson J.J., Gesch D.B. Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010). U.S. Geological Survey. 2011. 26 p.

9. Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Иванов М.А. Автоматизированное построение границ бассейновых геосистем для Приволжского федерального округа // География и природные ресурсы. 2014. № 3. С. 32–39.
10. Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Мухарамова С.С., Харченко С.В., Веденева Е.А. Картографическая модель речных бассейнов Европейской России // География и природные ресурсы. 2017. № 2. С. 27–36.
11. Гармаев Е.Ж., Пьянков С.В., Цыдыпов Б.З., Шихов А.Н., Аюджанаев А.А., Содномов Б.В., Абдуллин Р.К. Структура и информационное наполнение ГИС «Гидроэкологическая безопасность бассейна р. Селенги» // ENVIROMIS-2020: избранные труды Межд. конференции и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды. Томск, 2020. С. 336–339.
12. Matias Y. Keeping people safe with AI-enabled flood forecasting / Search – AI – India, 2018. Режим доступа: <https://www.blog.google/products/search/helping-keep-people-safe-ai-enabled-flood-forecasting/> (дата обращения 28.04.2020).
13. Nevo S.A. Summary of the Google Flood Forecasting Meets Machine Learning Workshop / Google AI Blog, 2019. Режим доступа: <https://ai.googleblog.com/2019/03/a-summary-of-google-flood-forecasting.html> (дата обращения 28.04.2020).
14. Ayzel G., Varentsova N., Erina O., Sokolov D., Kurochkina L., Moreydo V. Open Forecast: The First Open-Source Operational Runoff Forecasting System in Russia // Water. 2019. Vol. 11. P. 1546.
15. Фролова Н.А., Киреева М.Б., Харламов М.А., Самсонов Т.Е., Энтин А.А., Лурье И.К. Картографирование современного состояния и трансформации водного режима рек Европейской территории России // Геодезия и картография. 2020. Т. 81. № 7. С. 14–26.
16. Энтин А. А., Самсонов Т. Е., Лурье И. К. Согласование цифровых моделей рельефа и гидрографической сети для определения границ бассейнов // Геодезия и картография. 2019. № 1. С. 94–101. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-943-1-94-101.
17. Frolova N.L., Magritskiy D.V., Kireeva M.B., Grigor'ev V.Yu., Gelfan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I. Streamflow of Russian Rivers under Current and Forecasted Climate Changes: A Review of Publications. 1. Assessment of Changes in the Water Regime of Russian Rivers by Observation Data // Water Resources. 2022. 49. № 3. P. 333-350. DOI: 10.1134/S0097807822030046.

REFERENCES

1. Water resources of Russia and their utilization / edited by I.A. Shiklomanov. SPb.: GGI, 2008. 600 p. [In Russ.].
2. Georgievskiy V.Yu., Shalygin A.L. Hydrological regime and water resources. Chapter 2. Methods of Assessment of Climate Change Consequences for Physical and Biological Systems. Chapter 2. Moscow: Roshydromet, 2012. P. 53–86 [In Russ.].
3. Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireyeva M.B. et al. Modern resources of ground and surface waters of the European part of Russia: Formation, distribution, use. M.: GEOS, 2015. 315 p. [In Russ.].
4. Kalinin V.G., Pyankov S.V. Application of geoinformation technologies in hydrological research. Perm: Alex-Press, 2010. 217 с. [In Russ.].
5. 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. *Meteorology and hydrology*. 2016. Vol. 41 (3). P. 157–169 [In Russ.].
6. Borsch S., Simonov Y., Khristoforov A., Semenova N., Koliy V., Ryseva E., Krovotyntsev V., Derugina V. Russian rivers streamflow forecasting using hydrograph extrapolation method. *Hydrology*. 2022. 9. 1. DOI: 10.3390/hydrology9010001.
7. Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. System of flood forecasting and early warning of floods on the rivers of the Black Sea coast of the Caucasus and the Kuban basin. *Hydrometeorological research and forecasts*. 2015. № 356. P. 1–247 [In Russ.].
8. Danielson J.J., Gesch D.B. Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010). U.S. Geological Survey. 2011. 26 p.

9. Yermolaev O.P., Maltsev K.A., Ivanov M.A. Automated construction of basin geosystem boundaries for the Volga Federal District. *Geography and Natural Resources*. 2014. № 3. P. 32–39 [In Russ.].
10. Yermolaev O.P., Maltsev K.A., Mukharamova S.S., Kharchenko S.V., Vedeneyeva E.A. Cartographic model of river basins in European Russia. *Geography and Natural Resources*. 2017. № 2. P. 27–36 [In Russ.].
11. Garmaev E.J., Pyankov S.V., Tsydypov B.Z., Shikhov A.N., Ayurzhanayev A.A., Sodnomov B.V., Abdullin R.K. Structure and information content of GIS “Hydroecological safety of the Selenga River basin”. ENVIROMIS-2020: Selected Proceedings of the International Conference and School of Young Scientists on Measurements, Modeling and Information Systems for Environmental Studies. Tomsk, 2020. P. 336–339 [In Russ.].
12. Matias Y. Keeping people safe with AI-enabled flood forecasting / Search - AI - India, 2018. Access mode: <https://www.blog.google/products/search/helping-keep-people-safe-ai-enabled-flood-forecasting/> (accessed on 28.04.2020).
13. Nevo S. A. Summary of the Google Flood Forecasting Meets Machine Learning Workshop / Google AI Blog, 2019. Access mode: <https://ai.googleblog.com/2019/03/a-summary-of-google-flood-forecasting.html> (accessed on 28.04.2020).
14. Ayzel G., Varentsova N., Erina O., Sokolov D., Kurochkina L., Moreydo V. OpenForecast: The First Open-Source Operational Runoff Forecasting System in Russia. *Water*. 2019. Vol. 11. P. 1546.
15. Frolova N.L., Kireeva M.B., Kharlamov M.A., Samsonov T.E., Entin A.L., Lurie I.K. Cartography of the current state and transformation of the water regime of the rivers of the European territory of Russia. *Geodesy and Cartography*. 2020. Vol. 81. № 7. P. 14–26 [In Russ.].
16. Entin A. L., Samsonov T. E., Lurie I. K. Coordination of digital elevation models and hydrographic network for determining basin boundaries. *Geodesy and Cartography*. 2019. № 1. P. 94–101. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-943-1-94-101 [In Russ.].
17. Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., Grigor'ev V.Yu., Gelfan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I. Streamflow of Russian Rivers under Current and Forecasted Climate Changes: A Review of Publications. 1. Assessment of Changes in the Water Regime of Russian Rivers by Observation Data. *Water Resources*. 2022. 49. № 3. P. 333–350. DOI: 10.1134/S0097807822030046 [In Russ.].

Сведения об авторах:

Фролова Наталья Леонидовна, д-р геогр. наук, профессор, заведующая кафедрой гидрологии суши географического факультета, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1; ORCID 0000-0003-3576-285X; e-mail: frolova_nl@mail.ru

Самсонов Тимофей Евгеньевич, канд. географ. наук, ведущий научный сотрудник, кафедра картографии и геоинформатики географического факультета, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1; ORCID 0000-0001-5994-0302; e-mail: tsamsonov@geogr.msu.ru

Киреева Мария Борисовна, канд. географ. наук, доцент, кафедра гидрологии суши географического факультета, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1; ORCID 0000-0002-8285-9761; e-mail: kireeva_mb@mail.ru

Семин Владимир Николаевич, научный сотрудник, кафедра картографии и геоинформатики географического факультета, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1; ORCID 0000-0003-4810-6325; e-mail: vnsemin@mail.ru

Энтин Андрей Львович, канд. географ. наук, старший научный сотрудник, кафедра картографии и геоинформатики географического факультета, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1; ORCID 0000-0002-0350-5587; e-mail: aentin@geogr.msu.ru

About the authors:

Natalia L. Frolova, Dr. Geogr. Sci., Professor, Head of Department of Land Hydrology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation. ORCID 0000-0003-3576-285X; e-mail: frolova_nl@mail.ru.

Timofey E. Samsonov, Candidate of Geographic Sciences (PhD), Assistant Professor, Department of Cartography and Geoinformatics, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation. ORCID 0000-0001-5994-0302; e-mail: tsamsonov@geogr.msu.ru.

Maria B. Kireyeva, Candidate of Geographic Sciences (PhD), Geography, Associate Professor, Department of Land Hydrology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation. ORCID 0000-0002-8285-9761; e-mail: kireeva_mb@mail.ru

Vladimir N. Semin, Researcher, Department of Cartography and Geoinformatics, Faculty of Geography, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation. ORCID 0000-0003-4810-6325; e-mail: vnsemin@mail.ru

Andrey L. Entin Candidate of Geographic Sciences (PhD), Department of Cartography and Geoinformatics, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation. ORCID 0000-0002-0350-5587; e-mail: aentin@geogr.msu.ru