

УДК: 528.94+528.88

С.В. Пьянков¹, Е.Ж. Гармаев², Р.К. Абдуллин¹,
А.Н. Шихов¹, А.А. Аюржанаев², В.Н. Черных²,
Т.В. Судницына¹

ГИС ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ БАССЕЙНА Р. СЕЛЕНГИ: СТРУКТУРА, ИНФОРМАЦИОННОЕ НАПОЛНЕНИЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

АННОТАЦИЯ

Территория трансграничного бассейна р. Селенги — главного притока Байкала — характеризуется широким распространением опасных явлений климатической, гидрологической и геоморфологической природы. Для интеграции, отображения и анализа разнородных данных об этих явлениях, а также предоставления данных научному сообществу была разработана веб-ГИС «Гидроэкологическая безопасность бассейна р. Селенги». Структура веб-ГИС включает картографические слои и базы данных, которые характеризуют среднесезонные и экстремальные климатические и гидрологические условия в бассейне р. Селенги, опасные природные процессы гидролого-геоморфологической природы, а также их негативное воздействие на ландшафты, населенные пункты и инфраструктуру. Для информационного наполнения веб-ГИС использовались как внешние базы данных и сервисы (многолетние ряды наблюдений метеостанций и гидропостов, данные проекта WorldClim, реанализ ERA5-Land), так и материалы, полученные в результате исследований авторов, которые ранее не публиковались. Программная реализация ГИС основана на открытых технологиях. Особенностью созданного веб-сервиса в сравнении с ранее опубликованными бассейновыми ГИС является развитый климатический блок, который позволяет оценивать различные проявления современного изменения климата в пределах бассейна р. Селенги. Также на сервисе впервые опубликованы данные о некоторых опасных природных процессах (таких, как сели или наледи). Перспективы развития и совершенствования веб-ГИС связаны с публикацией новых картографических слоев и баз данных, созданных авторами, с разработкой оценочных карт опасности и риска различных видов опасных гидрологических явлений, а также климатических характеристик на базе современного реанализа ERA5 и прогнозов будущего климата на XXI в. по различным сценариям.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: веб-ГИС, бассейн р. Селенги, опасные гидрологические явления, изменения климата, картографирование

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, д. 15, Пермь, Россия, 614990,
e-mail: pyankovsv@gmail.com

² Байкальский институт природопользования СО РАН, ул. Сахьяновой, д. 6, г. Улан-Удэ, Республика Бурятия, Россия, 670047,
e-mail: garend1@yandex.ru

Sergey V. Pyankov¹, Endon Zh. Garmaev², Rinat K. Abdullin¹, Andrey N. Shikhov¹, Alexander A. Aurzhanaev², Vladimir N. Chernykh², Tatyana V. Sudnitsyna¹

GIS OF HYDROLOGICAL AND ENVIRONMENTAL SAFETY OF THE SELENGA RIVER BASIN: STRUCTURE, CONTENT AND FUNCTIONALITY

ABSTRACT

The transboundary basin of the Selenga river (the main tributary of Lake Baikal) is characterized by widespread and frequent hazardous events of climatic, hydrological and geomorphological nature. To integrate, display and analyze various data on these events, as well as provide them to the scientific community, a web GIS “Hydrological and environmental safety of the Selenga river basin” has been developed. The structure of the web GIS includes layers and databases that characterize the average long-term and extreme climatic and hydrological conditions in the basin, hazardous processes of hydrological and geomorphological nature, as well as their negative impact on landscapes, settlements and infrastructure. Both external databases and services (long-term weather and hydrological data series, WorldClim 2.0 database, ERA5-Land reanalysis and other) and previously unpublished result of the authors’ studies were used for web GIS content. The web-GIS development is based on open source software and libraries. A feature of the web GIS in comparison with previously published analogues for other river’s basins is an information rich climate section, which allows to assess various manifestations of the observed climate change in the Selenga river basin. Also, the data on several potentially hazardous natural processes like mudflows or aufeis formation are published on the service for the first time. Prospects for the development and improvement of the web GIS are associated with the publication of new GIS layers and databases compiled by the authors, with the development of hazard and risk assessment maps for various types of hazardous hydrological events. In addition, climatic characteristics based on modern ERA5 reanalysis and future climate projections for the 21st century are planned to be published.

KEYWORDS: web-GIS, Selenga river basin, hazardous hydrological events, climate change, mapping

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивость экосистемы крупнейшего пресноводного озера планеты — Байкала во многом определяется режимом крупнейшей реки, впадающей в него — Селенги, которая дает до 50 % водного и более 50 % химического стока в озеро [Гармаев, Христофоров, 2010]. Современное потепление климата оказывает существенное влияние на гидрологические процессы в бассейне Селенги [Фролова и др., 2017]. Как и в других регионах России, на фоне потепления здесь отмечается снижение объема стока весеннего половодья и некоторое увеличение стока в зимний период [Sinyukovich, Chernyshov, 2019]. Также в Байкальском регионе (как и по всей России) растет вклад ливневых осадков в общее количество осадков, что может привести к повышению риска наводнений, вызванных ливневыми паводками [Chernokulsky et al., 2019].

В период с 1996 по 2018 гг. в бассейне р. Селенги отмечался дефицит осадков, что привело к значительному снижению уровня воды в Байкале [Фролова и др., 2017; Sinyukovich, Chernyshov, 2019]. В последние годы, наоборот, отмечается существенное увеличение количества осадков и притока воды в Байкале [Чернышов, 2022]. В связи с этим

¹ Perm State University, 15, Bukireva str., Perm, 614990, Russia, e-mail: gis@psu.ru

² Baikal Institute of Nature Management SB RAS, 6, Sakhyanovoy str., Ulan-Ude, Republic of Buryatiya, 670047, Russia, e-mail: garend1@yandex.ru

в бассейне Селенги после 2018 г. произошло увеличение частоты наводнений и связанных с ними эрозионных и оползневых процессов, которые в большинстве случаев связаны с интенсивными осадками в летний период [Pyankov et al., 2022]. Под угрозой наводнений в бассейне р. Селенги находятся свыше 100 населенных пунктов, в т. ч. г. Улан-Удэ, а также 236.3 тыс. га сельскохозяйственных угодий [Борисова, 2010; Kichigina, 2018]. Помимо наводнений, в бассейне р. Селенги распространены и другие опасные гидролого-геоморфологические процессы и явления, такие как наледи, эрозия почв и оврагообразование [Tsydyrov et al., 2020], сели и оползни [Bazhenova et al., 2020].

Особенностью бассейна р. Селенги также является трансграничное положение (2/3 площади бассейна р. Селенги находится на территории Монголии). Для монгольской части бассейна сложнее получить доступ к многолетним рядам данных наземных метеорологических и гидрологических наблюдений, а плотность сети наблюдений существенно ниже, чем в российской части бассейна [Garmaev et al., 2022]. Интерес к монгольской части бассейна обусловлен еще и обсуждением проектов строительства ГЭС на крупных притоках Селенги, реализация которых может оказать существенное влияние на сток [Фролова и др., 2017; Чернышов, 2022].

Значимость бассейна р. Селенги как основного источника поступления воды в Байкал, а также недостаточная изученность многих природных процессов, влияющих на формирование водного, твердого и химического стока, обусловила необходимость создания бассейновой ГИС «Гидроэкологическая безопасность в бассейне р. Селенги» [Pyankov et al., 2022]. ГИС была разработана в 2022 г. и опубликована как картографический веб-сервис¹. Основным ее назначением является обеспечение интеграции, отображения и анализа разнородных данных о гидрологических и климатических процессах в бассейне р. Селенги, а также предоставление этих данных научному сообществу. Конечной же целью создания ГИС является поддержка принятия научно-обоснованных решений в области обеспечения гидроэкологической безопасности.

Следует отметить, что в России накоплен значительный опыт создания бассейновых ГИС разного целевого назначения и территориального охвата. Первые такие ГИС обеспечивали систематизацию данных многолетних наблюдений и расчет пространственного распределения различных гидрометеорологических параметров [Калинин, Пьянков, 2010]. 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» [Frolov et al., 2016; Borsch et al., 2022]; систему прогнозирования паводков и раннего оповещения о наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани, разработанную Гидрометцентром России [Борщ и др., 2015]; а также ГИС для визуализации открытых автоматизированных прогнозов уровней и расходов воды, разработанную в рамках проекта OpenForecast [Ayzel et al., 2020]. Наиболее значимой ГИС, в которой анализируется формирование твердого стока рек, является веб-ГИС «Речные бассейны Европейской части России» [Ермолаев и др., 2017].

¹ ГИС «Гидроэкологическая безопасность в бассейне р. Селенги». Электронный ресурс: <http://selenga.psu.ru/> (дата обращения 09.03.2023).

² Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России. Электронный ресурс: <http://gis.vodinfo.ru/> (дата обращения 09.03.2023).

Особенностью созданной ГИС для бассейна р. Селенги в сравнении с перечисленными сервисами является публикация значительного объема данных о климатических характеристиках и их изменениях, а также о некоторых потенциально опасных процессах (таких, как сели или наледи).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Структура базы данных и основные источники информации

Структура бассейновой ГИС традиционно включает базовую и тематическую информацию [Калинин, Пьянков, 2010; Ермолаев и др., 2017]. Базовые данные включают в себя основные топографические слои по данным OpenStreetMap (реки и водоемы, основные дороги и населенные пункты), цифровую модель рельефа (ЦМР) на основе матрицы высот SRTM с пространственным разрешением 90 м, и несколько полученных на ее основе морфометрических параметров (уклон, экспозиция, кривизна). Границы речных бассейнов были извлечены из данных SRTM с использованием инструментов «Гидрология» пакета ArcGIS. Лесистость бассейна оценивалась на основе данных Global Forest Change [Hansen et al., 2013]. Гидрометеорологическая наблюдательная сеть включает 74 метеостанции (из них 36 расположены за пределами бассейна) и 87 гидрологических постов, из них 44 в России и 43 — в Монголии (рис. 1).

Тематические данные характеризуют климатические и гидрологические условия в бассейне р. Селенги, опасные природные процессы гидролого-геоморфологической природы, а также их негативное воздействие на ландшафты, населенные пункты и инфраструктуру. Для информационного наполнения ГИС использовались различные источники данных — как внешние базы данных и сервисы, так и материалы, полученные в результате исследований авторов.

Климатические данные в ГИС включают растровые слои средних многолетних и экстремальных климатических характеристик. Эти же характеристики подготовлены и для отдельных метеостанций (доступны для просмотра в виде графиков). Средние многолетние значения температуры воздуха, количества осадков, солнечной радиации, парциального давления водяного пара и скорости ветра получены по данным WorldClim 2.0¹. В данном проекте доступны два набора климатических данных — Historical Climate Data за 1970–2000 гг. [Fick, Hijmans, 2017] и Historical Monthly Weather Data за 1961–2018 гг. [Harris et al., 2014], с пространственным разрешением 1' и 5' соответственно. В ГИС опубликованы растры, характеризующие пространственное распределение температуры воздуха и осадков, рассчитанное по скользящим 30-летним периодам (от 1961–1990 до 1990–2018 гг.).

Картографирование экстремальных характеристик температуры воздуха и осадков и их многолетней изменчивости основано на стандартных индексах, предложенных группой экспертов по обнаружению и индексам изменения климата (ETCCDI) [Alexander et al., 2006]. Эти индексы и их модификации позволяют оценивать повторяемость, интенсивность и продолжительность климатических экстремумов и широко используются для мониторинга изменения климата [Bulygina et al., 2007]. Характеристики климатических экстремумов в бассейне р. Селенги рассчитаны по метеостанциям на основе набора данных GHCN-Daily² за период 1961–2020 гг. Перечень рассчитанных индексов приведен в таблице 1.

¹ WorldClim. Maps, graphs, tables, and data of the global climate. Электронный ресурс: <https://worldclim.org/> (дата обращения 09.03.2023).

² NOAA National Center for Environmental Information. Электронный ресурс: <https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/search?datasetid=GHCND> (дата обращения 09.03.2023).

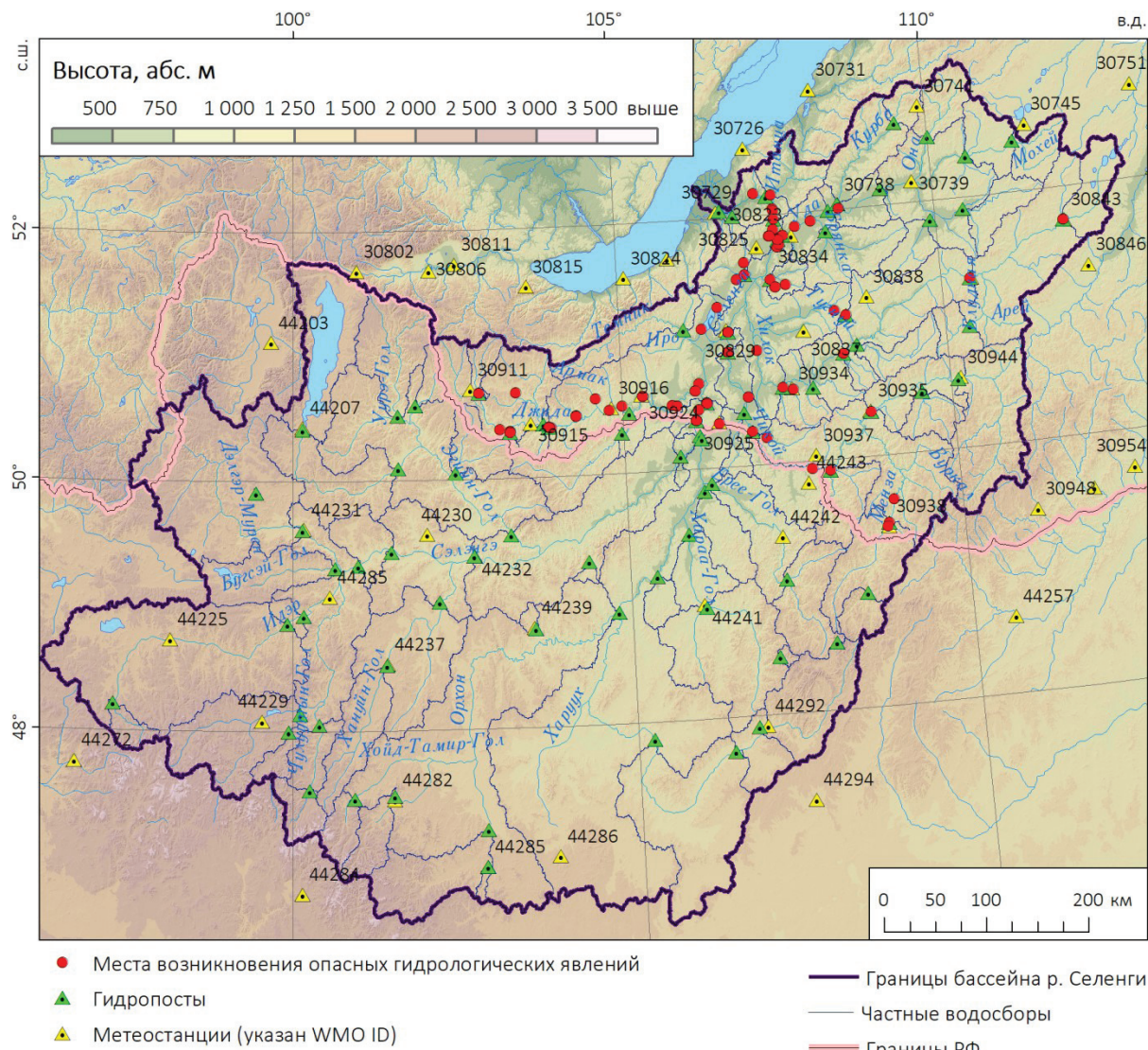


Рис. 1. Обзорная карта бассейна р. Селенги. Показаны пункты гидрометеорологической сети наблюдений и места возникновения опасных гидрологических явлений
Fig. 1. Overview map of the Selenga river basin. Hydrometeorological observation network and points reports of hazardous hydrological events are shown

Построение карт характеристик климатических экстремумов основано на интерполяции данных с метеостанций. Для большинства экстремальных характеристик интерполяция выполнена методом сплайна с учетом линейной зависимости от соответствующих значений среднемноголетней климатической характеристики, полученных по данным WorldClim. При интерполяции экстремальных характеристик температуры воздуха в качестве независимой переменной использовались соответствующие средние многолетние значения температуры воздуха, а при интерполяции экстремальных характеристик осадков — соответствующие средние многолетние характеристики осадков [Garmaev et al., 2022]. Выбор данной методики обусловлен тем, что в данных WorldClim уже учтены основные факторы подстилающей поверхности, определяющие пространственное распределение как средних, так и экстремальных характеристик температуры воздуха и осадков (высота местности, расстояние до ближайшего крупного водоема и пр.).

Табл. 1. Характеристики экстремумов температуры воздуха и осадков, рассчитанные по данным метеостанций
 Table 1. Characteristics of temperature and precipitation extremes calculated based on weather stations data

Краткое наименование*	Полное наименование (англ.)	Характеристика индекса
Индексы экстремальности для температуры воздуха		
SU	Number of summer days	Среднегодовое число дней с максимальной температурой воздуха 25 °С и выше
–	–	Среднегодовое число дней с минимальной температурой воздуха –30 °С и ниже
TXx	Maximum value of daily maximum temperature	Среднегодовой максимум температуры воздуха, °С
TNn	Minimum value of daily minimum temperature	Среднегодовой минимум температуры воздуха, °С
–	–	1-й процентиль (1p) минимальной температуры воздуха в зимний сезон, °С
–	–	99-й процентиль (99p) максимальной температуры воздуха в летние месяцы, °С
Индексы экстремальности для осадков		
Rx1day	Maximum 1-day precipitation	Среднегодовой суточный максимум осадков, мм
Rx5day	Maximum consecutive 5-day precipitation	Среднегодовой максимум осадков, за 5 сут, мм
R20mm	Annual count of days when PRCP ≥ 20mm	Число дней с суточной суммой осадков ≥ 20 мм
CDD	Maximum number of consecutive days with RR < 1mm	Число последовательных сухих дней (с суточной суммой осадков < 1 мм)
–	–	99p суточной суммы осадков, мм
R99pTOT	Contribution to total precipitation from extremely wet days	Вклад очень сильных осадков в годовую сумму осадков, %

Карты экстремальных характеристик осадков построены также по данным реанализа ERA5-Land, которые отличаются наиболее высоким пространственным разрешением (9 км) среди всех доступных данных реанализов [Muñoz-Sabater et al., 2021]. Применение данных реанализа потенциально позволяет устранить недостатки, которые возникают при интерполяции данных станционных наблюдений в условиях сложного рельефа и редкой наблюдательной сети. На основе данных ERA5-Land были рассчитаны основные характеристики экстремумов осадков, перечисленные в табл. 1. Для расчета данные ERA5 были загружены для области, полностью включающей бассейн р. Селенги, суммированы по суткам, затем на основе полученного массива с помощью скриптов на языке программирования Python были выполнены расчеты. Результаты получены в формате Geotiff и сопоставлены с результатами интерполяции по данным метеостанций, представленными в работе [Garmaev et al., 2022].

Карты режимных гидрологических характеристик построены на основе двух массивов данных. По данным гидропостов в пределах российской и монгольской части бассейна, не имеющих существенных разрывов в рядах наблюдений за период с 1971 по 2020 гг. (всего 45 постов) построены карты основных характеристик стока. К ним относятся годовой слой стока, модуль максимального стока весеннего половодья, модуль минимального стока за период открытого русла и минимального зимнего стока, а также средние даты начала и окончания половодья. Для построения карт характеристик ледового режима рек доступны данные только по российской части бассейна из информационной системы АИС ГМВО¹ (за 2008–2020 гг., с 38 гидропостов). На их основе построены карты средней и максимальной толщины ледового покрова на реках, продолжительности залегания ледового покрова, дат его установления и разрушения.

Для построения карт гидрологических характеристик производилась их интерполяция из точек-центроидов бассейнов, с учетом зависимостей от ландшафтных или климатических факторов (средней высоты, среднего уклона и среднего количества осадков по данным Worldclim). Для большинства переменных наиболее выраженной оказалась зависимость от уклона местности.

В ГИС также разработаны инструменты построения интерактивных графиков ежесуточной динамики расхода и уровня воды за период 2008–2020 гг. (в соответствии с доступными данными на АИС ГМВО). Для каждой точки графиков возможна идентификация значений уровня или расхода воды.

База данных о случаях опасных гидрологических явлений (ОГЯ) собрана и опубликована для российской части бассейна р. Селенги за период с 2001 г. по настоящее время. Для сбора информации об опасных явлениях использовались ряды наблюдений гидрологических постов, а также сообщения очевидцев и СМИ, подтвержденные фото и видео событий или связанных с ними повреждений. Всего в базу данных включено 112 отчетов о случаях ОГЯ, которые относятся к 60 различным населенным пунктам и 4 местоположениям, расположенным за пределами населенных пунктов. Для каждого отчета определены причины возникновения явления (дождевой паводок, сель, весеннее половодье, образование наледи, ледового затора или зажора) и дано краткое описание явления. Также при наличии данных определены характеристики ущерба (число поврежденных домов, пострадавших и эвакуированных граждан, величина экономического ущерба). Приведены гиперссылки на информацию, опубликованную об этих явлениях в СМИ, включая фотографии и видеозаписи явлений и их последствий. На основе созданной базы данных построена комплексная карта ОГЯ в российской части бассейна р. Селенги (рис. 2).

Прочие характеристики опасных процессов гидролого-геоморфологической природы, опубликованные в ГИС, включают данные о наледях, овражно-балочной сети, селеопасных участках и зонах затопления речных пойм по спутниковым данным. Так, для российской части бассейна р. Селенги создана картографическая база данных о наледях [Черных и др., 2022]. На ее основе была рассчитана наледность частных бассейнов. Также выделены 136 потенциально опасных наледей, расположенных в пределах населенных пунктов или в непосредственной близости от них. Эти наледи при интенсивном развитии могут вызывать подтопление зданий и дорожного полотна, что зафиксировано в т. ч. и в созданной базе данных об ОГЯ в бассейне р. Селенги. Для каждой такой наледи указана площадь, название ближайшего населенного пункта, а также дата снимка Landsat-8, по которому наледь была идентифицирована.

Слои плотности овражно-балочной сети, а также типов селей и частоты их проявления созданы для отдельных речных бассейнов (т. е. в него включены частные

¹ Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. Электронный ресурс: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения 09.03.2023).

бассейны, в которых наблюдались эти явления). Зоны затопления по спутниковым данным выделены в основном по снимкам, полученным 29–31 августа 2021 г., когда на р. Селенге проходил мощный дождевой паводок, вызванный сильными дождями на западе монгольской части бассейна (для гидропоста Наушки паводок соответствовал примерно 5 % обеспеченности).

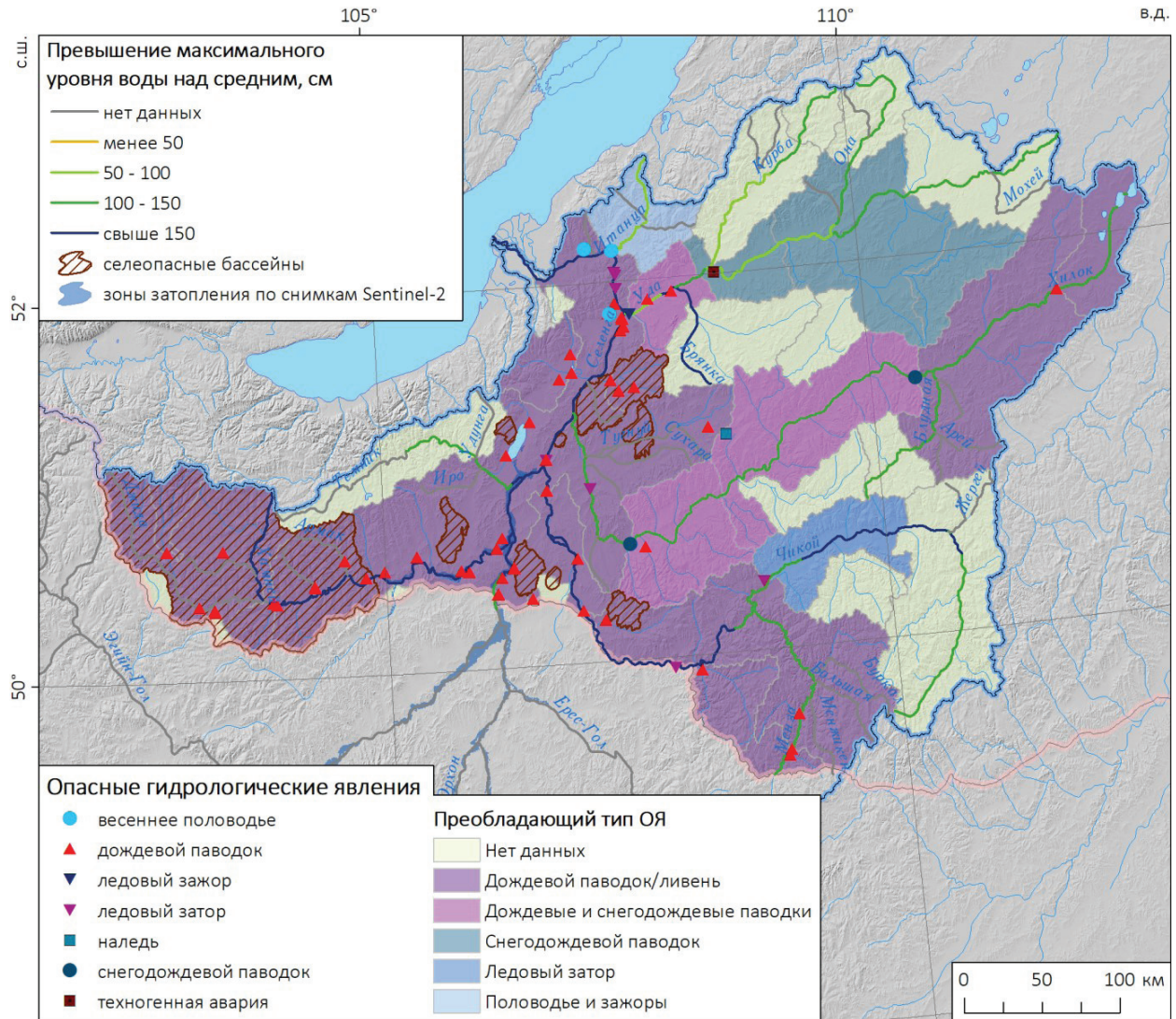


Рис. 2. Комплексная карта опасных гидрологических явлений в российской части бассейна р. Селенги

Fig. 2. A comprehensive map of hazardous hydrological events in the Russian part of the Selenga River basin

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности программной реализации, информационного наполнения и функциональности ГИС

Информационной основой веб-ГИС является картографическая база данных, для управления и редактирования которой используется свободная объектно-реляционная СУБД PostgreSQL с установленным расширением PostGIS. Данное расширение обеспечивает возможность хранения пространственных данных в реляционной базе

данных. При разработке интерфейса пользователя и функциональных возможностей картографического веб-сервиса используется стек технологий HTML5, CSS3, JavaScript. Для публикации пространственных данных используется открытый картографический сервер GeoServer, а для их отображения в веб-приложении — JavaScript-библиотека Leaflet. Вид стартовой страницы веб-ГИС представлен на рис. 3. Основные ее функциональные возможности включают просмотр на интерактивной карте различных тематических слоев в растровом и векторном представлении и их атрибутивных характеристик, а также некоторые дополнительные инструменты визуализации и анализа.

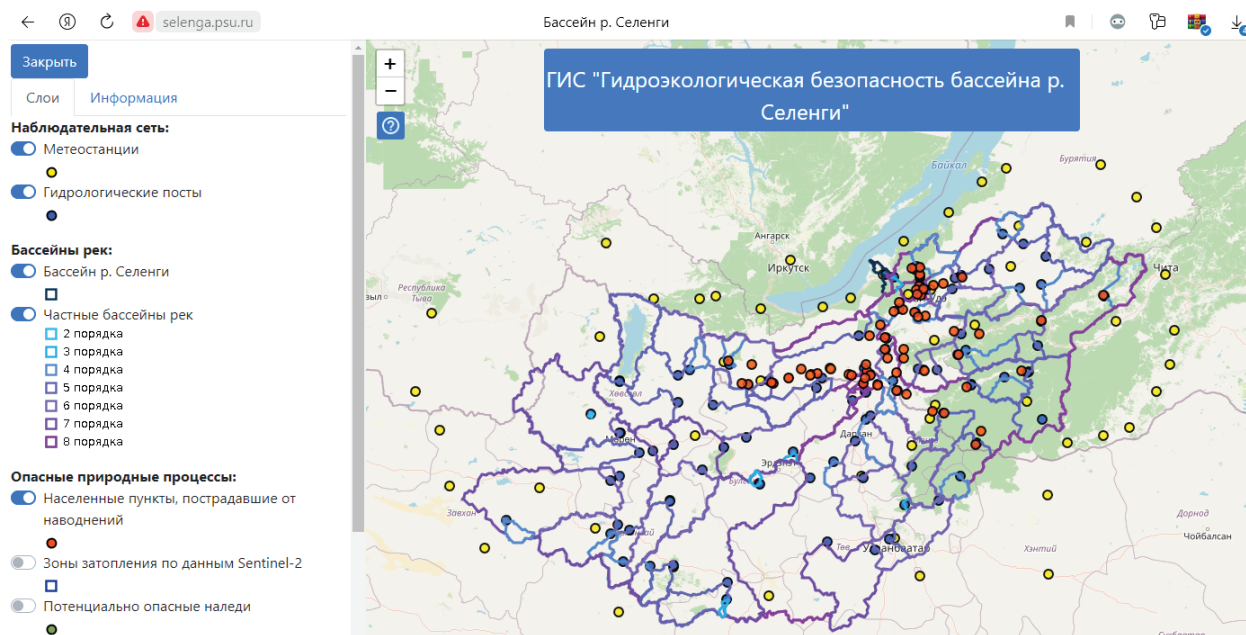


Рис. 3. Стартовая страница веб-ГИС «Гидроэкологическая безопасность бассейна р. Селенги»

Fig. 3. The main page of the web GIS “Hydrological and environmental safety of the Selenga River basin”

Так, пространственное распределение климатических и гидрологических параметров представлено в виде растров с пространственным разрешением 1000 м. Эти показатели разбиты на 5 групп: средние многолетние климатические характеристики по данным WorldClim, экстремальные климатические характеристики, расчетные характеристики снежного покрова, характеристики речного стока и ледовых явлений. Для климатических характеристик доступны данные за 4 скользящих 30-летних периода осреднения (с 1961 по 2020 гг.), что позволяет оценить их изменения на фоне современного потепления климата. Реализована возможность идентификации (просмотра значений) в ячейках растра. Для каждого растра подобрана оптимальная цветовая шкала и реализовано автоматическое построение легенды (рис. 4).

Реализовано также построение интерактивных графиков средних и экстремальных климатических характеристик по метеостанциям (рис. 5) и суточных значений расхода и уровня воды (рис. 6) по гидропостам. Климатические данные доступны за весь период наблюдений (например, по метеостанции Улан-Удэ — с 1900 г.), а гидрологические данные — за период с 2008 по 2020 г., в соответствии с доступностью архива АИС ГМВО.

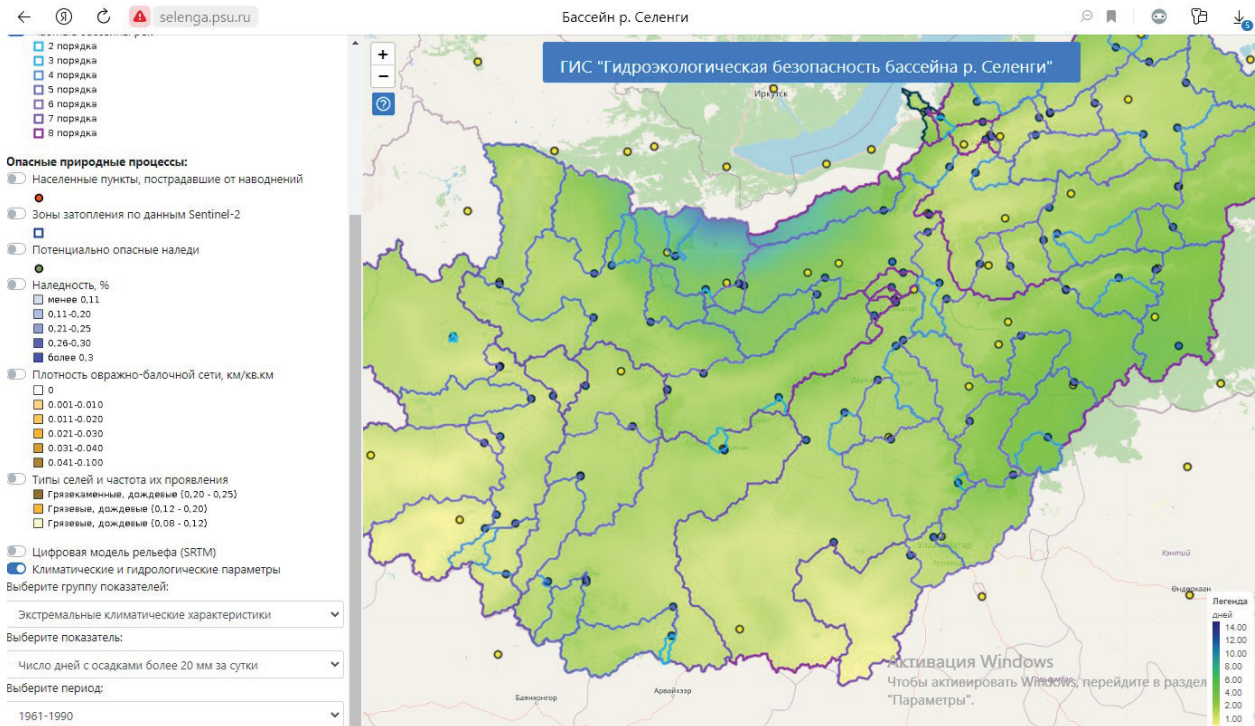


Рис. 4. Визуализация пространственного распределения экстремальных климатических характеристик
Fig. 4. Visualization of the spatial distribution of extreme climatic characteristics

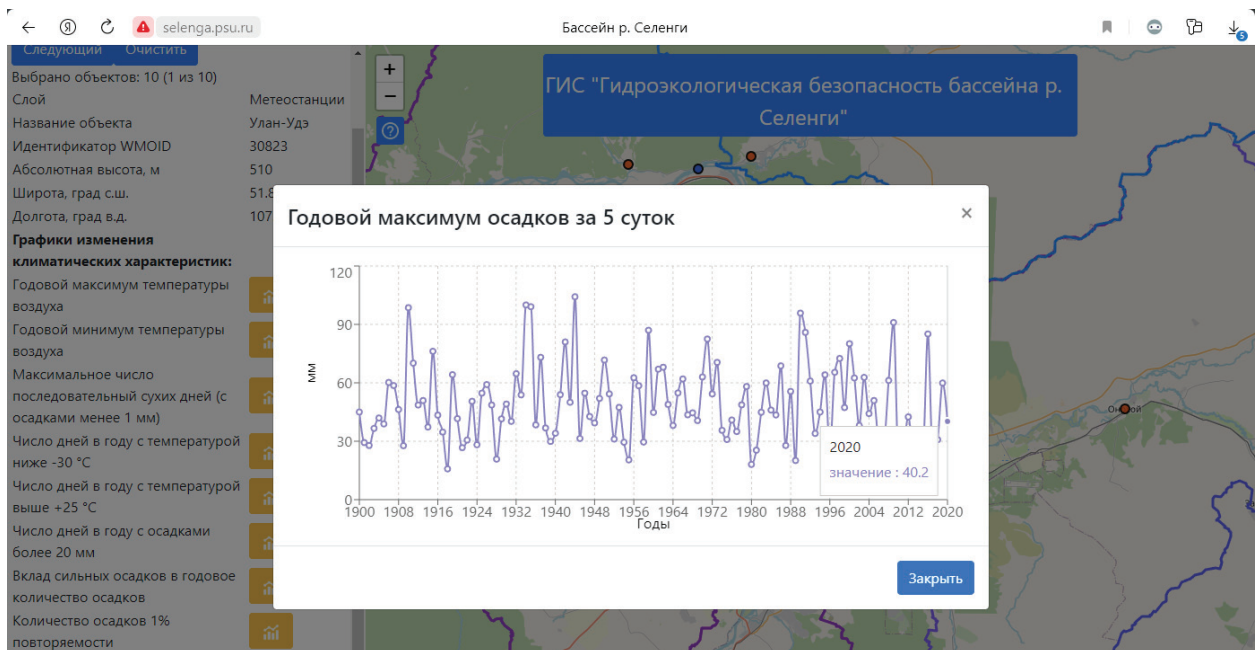


Рис. 5. Интерактивный график максимального годового количества осадков за 5 сут ($Rx5day$) за период 1900–2020 гг. по метеостанции Улан-Удэ
Fig. 5. Interactive graph of the highest five-day precipitation amount ($Rx5day$) for the period 1900–2020 according to Ulan-Ude weather station

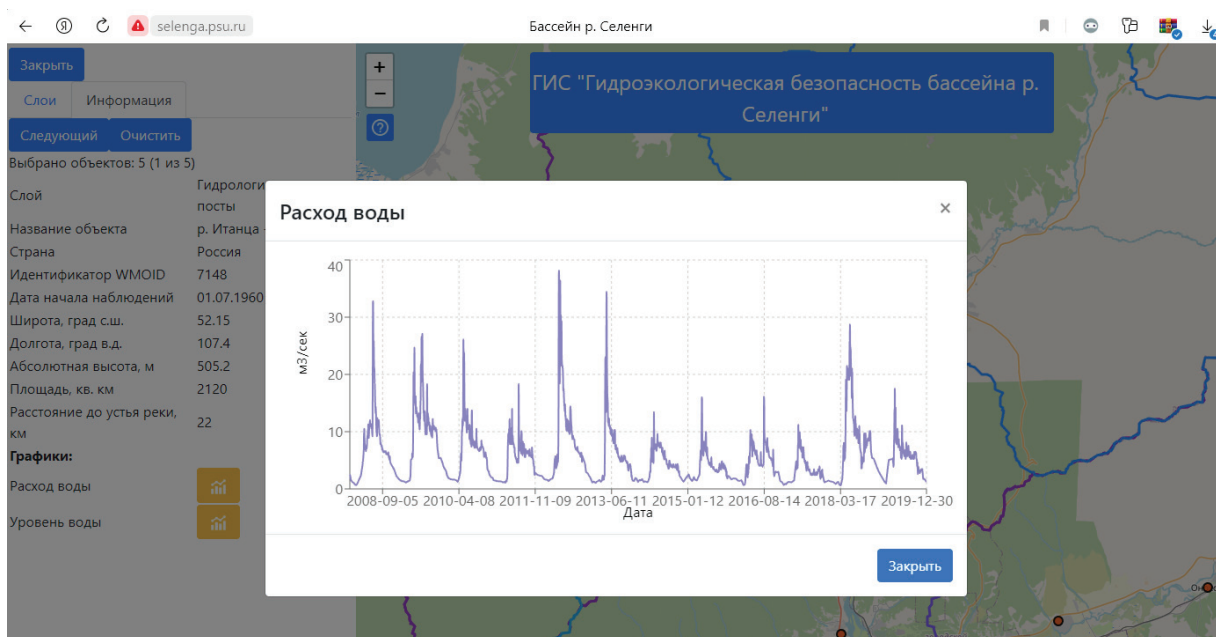


Рис. 6. Интерактивный график суточной динамики расхода воды на гидропосту р. Итанца — пос. Турунтаево за 2008–2019 гг.

Fig. 6. Interactive graph of daily water discharge at the gauging station Itanza River — Turuntaevo for 2008–2019

Установлено также, что реанализ ERA5 существенно недооценивает как среднегодовую сумму осадков, так и значения экстремальных характеристик. В среднем по бассейну годовая сумма осадков составляет 333 мм по данным наблюдений и 253 мм по данным реанализа. Максимальные различия (более чем в 2 р.) отмечены на севере бассейна вблизи южных склонов Хамар-Дабана. На западе монгольской части бассейна среднегодовое количество осадков по данным реанализа больше, чем по данным наблюдений, на 10–60 мм. Среднее число дней с осадками ≥ 20 мм (R20) в бассейне р. Селенги по данным наблюдений составляет 2,7, а по данным реанализа — 1,5, при этом пространственное распределение данного показателя по данным наблюдений и по данным реанализа существенно различается (рис. 7). Значения суточной суммы осадков 1 % повторяемости (R99p) по данным наблюдений в среднем по бассейну составляет 15,4 мм, а по данным реанализа — 8,2 мм. Несмотря на существенные различия между данными наблюдений и реанализа, нужно иметь в виду, что в связи с редкостью сети наблюдений (особенно в монгольской части бассейна) оценка пространственного распределения экстремальных осадков по данным реанализа может быть физически более обоснованной, чем по результатам интерполяции.

Характеристики опасных гидрологических явлений в бассейне р. Селенги на основе созданной базы данных детально рассмотрены в работе [Pyankov et al., 2022]. Из 112 случаев, внесенных в базу данных, 87 связаны с дождевыми паводками, также существенный вклад вносят ледовые заторы и зажоры (12 случаев). Более половины всех случаев, внесенных в базу данных (64 из 112), отмечалось в 2019–2021 гг., что обусловлено как объективными факторами (увеличением количества осадков в эти годы и частыми дождевыми паводками), так и повышением доступности информации. В наиболее засушливом 2015 г. не отмечалось вообще ни одного случая. Во внутригодовом распределении более трети всех случаев приходится на август, что соответствует периоду максимальной частоты возникновения дождевых паводков. Наиболее паводкоопасными

населенными пунктами являются г. Улан-Удэ, пос. Новоселенгинск и с. Наушки (все расположены на р. Селенге), где за период 2001–2021 гг. отмечалось по 7–8 случаев ОГЯ.

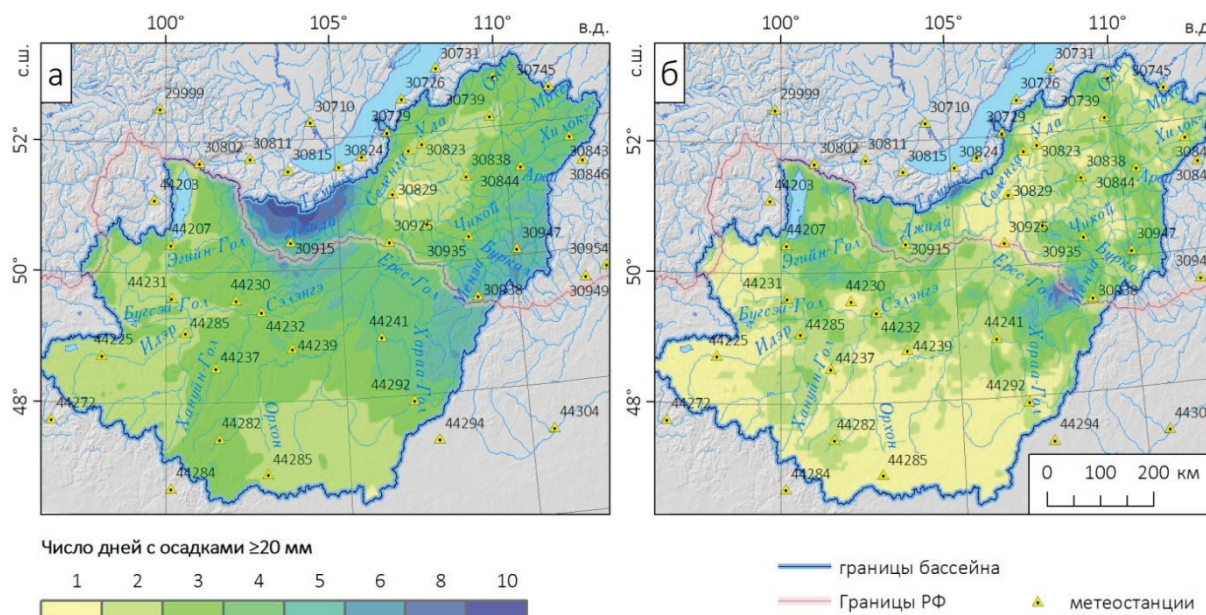


Рис. 7. Число дней с осадками ≥ 20 мм: а — по данным метеостанций, б — по данным ERA5

Fig. 7. Number of days with precipitation ≥ 20 mm (R20): a — according to weather stations data, b — according to the ERA5 data

ВЫВОДЫ

Веб-ГИС гидроэкологической безопасности в бассейне р. Селенги является первым подобным информационным ресурсом для Байкальского региона. Она уже сейчас обеспечивает пользователям достаточно широкие возможности анализа климатических и гидрологических характеристик, а также опасных процессов гидролого-геоморфологической природы. Веб-ГИС интегрирует разнородные данные, значительная часть которых ранее не публиковалась или была доступна только в табличном виде (без географической привязки). Таким образом, она может быть полезна для широкого круга специалистов, работающих в области изучения бассейна Байкала в целом.

Дальнейшие перспективы развития и совершенствования веб-ГИС связаны с публикацией ранее созданных и новых картографических слоев и баз данных в Байкальском институте природопользования СО РАН (в частности, в рамках продолжающихся исследований наледных процессов в бассейне Селенги). Блок климатических характеристик может быть дополнен за счет новых данных, полученных на основе современного реанализа ERA5 и прогнозов будущего климата на XXI в. по различным сценариям, а расширение наполнения гидрологического раздела возможно как за счет увеличения продолжительности рядов наблюдений, так и оценочного картографирования опасностей и рисков, связанных с разными видами ОГЯ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФ (грант № 20-17-00207).

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Scientific Foundation (Project No. 20-17-00207).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Борисова Т.А. Геоэкологическая оценка природно-антропогенного риска в бассейне р. Селенга. Автореферат диссертации... кандидата географических наук. Улан-Удэ, 2010. 23 с.

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. Спец. вып. 356. 247 с.

Гармаев Е.Ж., Христофоров А.В. Водные ресурсы рек бассейна озера Байкал: основы их использования и охраны. Новосибирск: ГЕО, 2010. 227 с.

Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Мухарамова С.С., Харченко С.В., Веденеева Е.А. Картографическая модель речных бассейнов Европейской России. География и природные ресурсы, 2017. № 2. С. 27–36. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-2(27-36).

Калинин В.Г., Пьянков С.В. Применение геоинформационных технологий в гидрологических исследованиях: монография. Пермь: Алекс-Пресс, 2010. 2017 с.

Фролова Н.Л., Белякова П.А., Григорьев В.Ю., Сазонов А.А., Зотов Л.В. Многолетние колебания стока рек в бассейне Селенги. Водные ресурсы, 2017. Т. 44. № 3. С. 243–255. DOI: 10.7868/S0321059617030105.

Черных В.Н., Аюржанаев А.А., Жарникова М.А., Содномов Б.В., Шихов А.Н., Цыдыпов Б.З., Гармаев Е.Ж., Пьянков С.В. Картографирование наледей в трансграничном бассейне р. Чикой. Географический вестник, 2022. № 62 (3). С. 169–179. DOI: 10.17072/2079-7877-2022-3-169-179.

Чернышов М.С. Природно-климатические и антропогенные факторы формирования уровня режима озера Байкал. Автореферат диссертации... кандидата географических наук. Иркутск, 2022. 22 с.

Alexander L.V., Zhang X., Peterson T.C., Caesar J., Gleason B., Klein Tank A.M.G., Haylock M., Collins D., Trewin B., Rahimzadeh F., Tagipour A., Rupa Kumar K., Revadekar J., Griffiths G., Vincent L., Stephenson D.B., Burn J., Aguilar E., Brunet M., Taylor M., New M., Zhai P., Rusticucci M., Vazquez-Aguirre J.L. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. Journal of Geophysical Research, 2006. V. 111. D05109. DOI: 0.1029/2005JD006290.

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. V. 11. No. 1546. DOI: 10.3390/w11081546.

Bazhenova O.I., Bardash A.V., Makarov S.A., Opekunova M.Y., Tukhta S.A., Tyumentseva E.M. The functioning of erosion-channel systems of the river basins of the south of Eastern Siberia. Geosciences, 2020. V. 10. No. 176. DOI: 10.3390/geosciences10050176.

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. V. 9. No. 1. DOI: 10.3390/hydrology9010001.

Bulygina O., Razuvaev V., Korshunova N., Groisman P. Climate variations and changes in extreme climate events in Russia. Environmental Research Letters, 2007. V. 2 (4). No. 045020. DOI: 10.1088/1748-9326/2/4/045020.

Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I., Semenov V. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades. Environmental Research Letters, 2019. V. 14 (4). No. 045001. DOI: 10.1088/1748-9326/aafb82.

- Fick S.E., Hijmans R.J.* WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2017. V. 37. P. 4302–4315. DOI: 10.1002/joc.5086.
- 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.
- Garmaev E.Z., P'yankov S.V., Shikhov A.N., Ayurzhanaev A.A., Sodnomov B.V., Abdullin R.K., Tsydyпов B.Z., Andreev S.G., Chernykh V.N.* Mapping modern climate change in the Selenga River basin. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2022. V. 47 (3). P. 113–122. DOI: 10.3103/S1068373922020054.
- Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. et al.* High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 2013. V. 342. P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H.* Updated high-resolution grids of monthly climatic observations — the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 2014. V. 34. P. 623–642. DOI: 10.1002/joc.3711.
- Kichigina N.V.* Flood hazard on the rivers of the Baikal Region. *Geography and Natural Resources*, 2018. V. 39 (2). P. 120–129. DOI: 10.1134/S187537281802004X.
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D.G., Piles M., Rodríguez-Fernández N.J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.-N.* ERA5-land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 2021. V. 13 (9). P. 4349–4383. DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.
- Pyankov S., Shikhov A., Ayurzhanaev A., Chernykh V., Abdullin R., Shabalina T.* Application of GIS technologies to assess hydrological and environmental safety of the Selenga River basin. *Science and Global Challenges of the 21st Century — Science and Technology. Perm Forum 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022. Springer, Cham. V. 342. DOI: 10.1007/978-3-030-89477-1_13.
- Sinyukovich V.N., Chernyshov M.S.* Water regime of Lake Baikal under conditions of climate change and anthropogenic influence. *Quaternary International*, 2019. V. 524. P. 93–101. DOI: 10.1016/j.quaint.2019.05.023.
- Tsydyпов B.Z., Sodnomov B.V., Chernykh V.N., Ilyin Y.M., Gurzhapov B.O., Ayurzhanaev A.A., Semenova M.V., Zharnikova M.A., Alymbaeva Z.B., Batotsyrenov E.A., Li F., Cheng H., Bazarzhapov T., Boldanov T., Dong S., Garmaev E.Z.* Intensity assessment of erosion-accumulative processes in the Selenga middle mountains (case study of the gully network of the Nizhnyaya Bulanka depression, Western Transbaikalia). *Geosciences (Switzerland)*, 2020. V. 10 (10). P. 1–15. DOI: 10.3390/geosciences10100387.

REFERENCES

- Alexander L.V., Zhang X., Peterson T.C., Caesar J., Gleason B., Klein Tank A.M.G., Haylock M., Collins D., Trewin B., Rahimzadeh F., Tagipour A., Rupa Kumar K., Revadekar J., Griffiths G., Vincent L., Stephenson D.B., Burn J., Aguilar E., Brunet M., Taylor M., New M., Zhai P., Rusticucci M., Vazquez-Aguirre J.L.* Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 2006. V. 111. D05109. DOI: 10.1029/2005JD006290.

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. V. 11. No. 1546. DOI: 10.3390/w11081546.

Bazhenova O.I., Bardash A.V., Makarov S.A., Opekunova M.Y., Tukhta S.A., Tyumentseva E.M. The functioning of erosion-channel systems of the river basins of the south of Eastern Siberia. *Geosciences*, 2020. V. 10. No. 176. DOI: 10.3390/geosciences10050176.

Borisova T.A. Geoecological assessment of natural and anthropogenic risk in the Selenga River basin. Abstract of PhD geogr. sci. thesis. Ulan-Ude, 2010. 23 p. (in Russian).

Borshch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Flood forecasting and early flood warning system on the rivers of the Black Sea Coast of the Caucasus and the Kuban Basin. *Hydrometeorological Research and Forecasting*, 2015. Special Iss. 356. 247 p. (in Russian).

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. V. 9. No. 1. DOI: 10.3390/hydrology9010001.

Bulygina O., Razuvaev V., Korshunova N., Groisman P. Climate variations and changes in extreme climate events in Russia. *Environmental Research Letters*, 2007. V. 2 (4). No. 045020. DOI: 10.1088/1748-9326/2/4/045020.

Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I., Semenov V. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades. *Environmental Research Letters*, 2019. V. 14 (4). No. 045001. DOI: 10.1088/1748-9326/aafb82.

Chernykh V.N., Ayurzhanayev A.A., Zharnikova M.A., Sodnomov B.V., Shikhov A.N., Tsydypov B.Z., Garmaev E.Zh., Pyankov S.V. Mapping of aufeis in the transboundary basin of the Chikoy River. *Geographical Bulletin*, 2022. No. 62 (3). P. 169–179 (in Russian). DOI: 10.17072/2079-7877-2022-3-169-179.

Chernyshov M.S. Natural-climatic and anthropogenic factors formation of the level regime of Lake Baikal. Abstract of PhD geogr. sci. thesis. Irkutsk, 2022. 22 p. (in Russian).

Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2017. V. 37. P. 4302–4315. DOI: 10.1002/joc.5086.

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.

Frolova N.L., Belyakova P.A., Grigoriev V.Yu., Sazonov A.A., Zotov L.V. Long-term fluctuations in river flow in the Selenga basin. *Water Resources*, 2017. V. 44 (3). P. 243–255 (in Russian). DOI: 10.7868/S0321059617030105.

Garmaev E.Zh., Khristoforov A.V. Water resources of the rivers of the Baikal basin: the basics of their use and protection. Novosibirsk: GEO, 2010. 227 p. (in Russian).

Garmaev E.Zh., Pyankov S.V., Shikhov A.N., Ayurzhanayev A.A., Sodnomov B.V., Abdullin R.K., Tsydypov B.Z., Andreev S.G., Chernykh V.N. Mapping modern climate change in the Selenga River basin. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2022. V. 47 (3). P. 113–122. DOI: 10.3103/S1068373922020054.

Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanov S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 2013. V. 342. P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.

Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations — the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 2014. V. 34. P. 623–642. DOI: 10.1002/joc.3711.

Kalinin V.G., Pyankov S.V. Application of GIS technologies in hydrological studies. Perm: Alex-Press, 2010. 2017 p. (in Russian).

Kichigina N.V. Flood hazard on the rivers of the Baikal Region. *Geography and Natural Resources*, 2018. V. 39 (2). P. 120–129. DOI: 10.1134/S187537281802004X.

Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D.G., Piles M., Rodríguez-Fernández N.J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.-N. ERA5-land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 2021. V. 13 (9). P. 4349–4383. DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.

Pyankov S., Shikhov A., Ayurzhanayev A., Chernykh V., Abdullin R., Shabalina T. Application of GIS technologies to assess hydrological and environmental safety of the Selenga River basin. *Science and Global Challenges of the 21st Century — Science and Technology*. Perm Forum 2021. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022. V. 342. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-89477-1_13.

Sinyukovich V.N., Chernyshov M.S. Water regime of Lake Baikal under conditions of climate change and anthropogenic influence. *Quaternary International*, 2019. V. 524. P. 93–101. DOI: 10.1016/j.quaint.2019.05.023.

Tsydypov B.Z., Sodnomov B.V., Chernykh V.N., Ilyin Y.M., Gurzhapov B.O., Ayurzhanayev A.A., Semenova M.V., Zharnikova M.A., Alymbaeva Z.B., Batotsyrenov E.A., Li F., Cheng H., Bazarzhapov T., Boldanov T., Dong S., Garmaev E.Z. Intensity assessment of erosion-accumulative processes in the Selenga middle mountains (case study of the gully network of the Nizhnyaya Bulanka depression, Western Transbaikalia). *Geosciences (Switzerland)*, 2020. V. 10 (10). P. 1–15. DOI: 10.3390/geosciences10100387.

Yermolaev O.P., Maltsev K.A., Mukharamova S.S., Kharchenko S.V., Vedeneeva E.A. Cartographic model of river basins in European Russia. *Geography and Natural Resources*, 2017. No. 2. P. 27–36 (in Russian). DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-2(27-36).