«Вега-Гидро» — специализированная спутниковая информационная система для решения задач гидрологии суши

М. В. Врублевский[1], М. А. Бурцев[1], Е. А. Захарова[2], Д. А. Кобец[1], И. Н. Крыленко[2,3], Е. А. Лупян[1], В. М. Морейдо[2], В. О. Полянин[2], И. А. Уваров[1]

[1] *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: vrublevsky@d902.iki.rssi.ru

[2] *Институт водных проблем РАН, Москва, 119333, Россия*

[3] *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова Москва, 119991, Россия*

Сокращение наземной наблюдательной гидрологической сети, а также выросшая потребность в разнородных высококачественных и оперативных спутниковых данных о состоянии водно-ресурсных систем в условиях климатических изменений обуславливают необходимость создания спутниковой информационной системы для решения задач гидрологии. Настоящая статья посвящена описанию основных задач, схемы построения и текущих возможностей такой системы — специализированной спутниковой информационной системы (СИС) «Вега-Гидро». Данная работа закладывает основу для развития доступного отечественного сервиса получения, хранения и обработки данных дистанционного зондирования Земли из космоса, ориентированного на учёных-гидрологов, специалистов по водному хозяйству и лиц, принимающих решения в области управления водными ресурсами. Специалистами Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) и Института водных проблем РАН (ИВП РАН) был разработан действующий прототип СИС «Вега-Гидро» (http://hydro.geosmis.ru/). Система обеспечивает доступ как к тематическим данным, полезным для решения задач гидрологии суши, так и к данным спутниковой съёмки сверхбольших распределённых архивов, а также к вычислительным ресурсам Центра коллективного пользования ИКИ РАН (ЦКП «ИКИ-Мониторинг», http://ckp.geosmis.ru/) для хранения, обработки и анализа информации. В настоящей работе на конкретных примерах продемонстрированы реализованные в системе возможности, в том числе специально разработанные в её интересах технологические решения для исследования и оценки состояния водных объектов и околоводных экосистем. Особое внимание уделено инструментам, которые, как правило, не представлены в информационных тематических сервисах или распределены по разным платформам, и их применение в комплексном анализе из-за этого затруднено. К таким инструментам относятся инструментарий объектного мониторинга, работы с данными радиолокационной альтиметрии и аналитические BI-инструменты (*англ.* Business Intelligence), обеспечивающие в том числе анализ временных рядов различных характеристик исследуемой территории, агрегированных в границах водосборов разных уровней.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, спутниковые данные, информационная система, доступ к спутниковым данным, гидрология, «Вега-Гидро»

Одобрена к печати: 01.09.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-211-230

Введение

Спутниковые технологии становятся важным элементом гидрологических исследований. Благодаря значительному пространственному охвату, улучшению точности измерений и росту доступности и оперативности получения спутниковой информации появляется всё больше возможностей использования данных дистанционного зондирования в гидрологии.

Развитие этих технологий и методов их применения открывает новые перспективы для исследований процессов гидрологического цикла на речных водосборах и адаптации водно-ресурсных систем к изменению климата. Особенно востребованы и активно развиваются методы в следующих направлениях гидрологии и смежных с ней дисциплин:

1. Управление рисками наводнений, включая:

а) мониторинг запасов воды в снеге и площади снежного покрова (Dong, 2018; Jonas et al., 2009);

б) анализ развития наводнений, включая формирование баз данных космических снимков для участков рек, подверженных затоплению; выявление участков образования заторов и зажоров льда на реках; классификация типов подстилающей поверхности пойм для задания коэффициентов шероховатости и выделения застроенных территорий в зоне затопления (Bugaets et al., 2018);

в) исследование уровенного и ледового режима и режима на реках методами спутниковой альтиметрии (Семенова и др., 2024; Zakharova et al., 2021);

г) калибровка и верификация гидродинамических моделей по данным дистанционного зондирования (Корнилова и др., 2018),

2. Оценка запасов влаги в пределах речных бассейнов, включая:

а) исследования многолетней динамики площадей водных объектов (длительности заливания пойм в зависимости от водности года и общей увлажнённости территорий, климатических изменений (Зилитинкевич, 2026));

б) оценку ресурсов поверхностных и подземных вод речных бассейнов и их трендов для различных региональных задач, в частности, связанных с изменениями климата и антропогенными факторами (Фролова и др., 2021);

в) оценку и выявление динамики влагозапасов растительного и почвенного покрова, потоков потенциального и фактического суммарного испарения, в том числе в задачах повышения эффективности орошаемого земледелия в сельском хозяйстве (Музылев, 2023; Музылев и др., 2017).

3. Региональные гидрологические и гидроэкологические исследования, включая:

а) изучение динамики ледникового покрова и горных озёр (Павлюкевич и др., 2024);

б) исследование влияния динамики растительного покрова/ландшафтов на величину речного стока (уточнение типов растительности по сравнению с устаревающими картами для уточнения параметров пространственно-распределённых гидрологических моделей (Alexakis et al., 2014; Bennour et al., 2022; Shadmehri Toosi et al., 2025));

в) дистанционные исследования параметров качества воды и экологического состояния водных объектов: мутность, цветение воды (концентрация хлорофилла *a*), нефтяное загрязнение, затопление/осушение прибрежных территорий, зарастание высшей водной растительностью (Chen et al., 2018);

г) оценку степени антропогенной нагруженности речных бассейнов (изменение площадей естественного растительного покрова в результате хозяйственной деятельности), развития эрозионных и русловых процессов (Alexakis et al., 2013).

4. Структурно-гидрографический анализ речных бассейнов, включая*:*

а) динамический анализ структуры речной сети и оценку морфометрических характеристик водных объектов (вид, форма, высотное положение, размеры ложа, объёмы воды) и их водосборов (площадь, форма, пространственное положение, центр тяжести, углы наклона склонов, густота речной и русловой сети, наличие бессточных впадин и пр.);

б) определение границ водосборов рек и построение моделей гидрографической сети по цифровым моделям рельефа (Гарцман и др., 2024).

Темпы развития инструментальных возможностей спутников, повышение качества и объёмов поступающей с них информации формируют потребности создания специальных спутниковых информационных систем (СИС), позволяющих не только обрабатывать и анализировать большие объёмы данных, но и оперативно формировать высокоуровневые информационные продукты, готовые для непосредственного использования профильными специалистами.

Такого рода СИС и сервисы позволяют работать как с данными конкретных спутников (например, Copernicus (https://browser.dataspace.copernicus.eu/) и EarthExplorer (https://earthexplorer.usgs.gov/)), так и с различными тематическими продуктами, в том числе ориентиро-

ванными на решение задач гидрологии суши (например, hydroweb.next (https://hydroweb.next.theia-land.fr) или Planetary Computer (https://planetarycomputer.microsoft.com/)).

В России также достаточно активно развиваются СИС, предназначенные в основном для решения оперативных (производственных) гидрологических задач, в первую очередь, в интересах Росгидромета и МЧС, которые позволяют интегрировать и анализировать информацию, поступающую как от российских, так и зарубежных группировок спутников. К таким специализированным системам можно, в частности, отнести такие геоинформационные системы (ГИС), как «ГИС Амур» (Фролов и др., 2016), «ГИС Волга» (Дерюгина и др., 2022) и «ГИС Гидрология» (https://hydro.meteoinfo.ru/).

При этом в области гидрологии суши существует ряд научных направлений, для которых важна не столько оперативность при обработке и визуализации данных, сколько возможность создания и одновременной работы с широким спектром тематических продуктов, получаемых на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), обработки метеоданных и характеристик подстилающей поверхности, результатов гидрологического моделирования и наземных наблюдений, а также иной пространственной информации.

Создание СИС «Вега-Гидро» (http://hydro.geosmis.ru/), отвечающей перечисленным выше требованиям, было начато в 2024 г. Институтом космических исследований РАН (ИКИ РАН) совместно с Институтом водных проблем РАН (ИВП РАН). В 2025 г. была начата опытная эксплуатация этой системы. Настоящая работа посвящена описанию основных задач, схемы построения и текущим возможностям СИС «Вега-Гидро» и закладывает основу для развития доступного отечественного сервиса получения, хранения и обработки данных ДЗЗ из космоса, ориентированного на гидрологов, специалистов по водному хозяйству и лиц, принимающих решения в области управления водными ресурсами.

Основные задачи системы «Вега-Гидро»

Исходя из актуальных гидрологических проблем и возможностей современных спутниковых систем можно сформулировать следующие задачи «Веги-Гидро». Создаваемая СИС должна обеспечить специалистам в области гидрологии и смежных дисциплин эффективную среду не только для доступа к данным ДЗЗ и продуктам их обработки, но и возможности анализа данной информации, в том числе и комплексного.

Основная задача системы — обеспечение возможности работы с информацией по всей территории РФ и сопредельных стран. При этом при построении системы обеспечивалась возможность расширения покрытия и состава информации, доступной в ней. Для решения поставленной задачи СИС «Вега-Гидро» должна обеспечить:

1. Формирование информационной основы системы (сбор, обработка, ведение архивов) на основе специализированных архивов данных различного пространственного и временного разрешения, получаемых на основе ДЗЗ.
2. Создание различных интерфейсов для программного (API (*англ.* Application Programming Interface)) и интерактивного доступа к данным. При этом должны быть обеспечены возможности поиска, выбора и визуализации данных и информационных продуктов, получаемых на их основе (в том числе виртуальных, т.е. формируемых по запросу в режиме реального времени).
3. Предоставление инструментария для анализа данных, как уже классического для ГИС-систем, так и специального. Примерами таких инструментов могут служить:
   - специализированные инструменты, позволяющие вести объектный мониторинг (Константинова и др., 2021);
   - инструменты работы с данными радиолокационных альтиметров (Врублевский и др., 2026);
   - инструменты, созданные на основе BI-технологий (*англ.* Business Intelligence) для анализа изменчивости характеристик водосборов в их границах (Кобец и др., 2015);
   - инструменты построения и анализа временных рядов (Балашов и др., 2023).

Следует также отметить, что одной из функций системы должно быть предоставление пользователям вычислительных ресурсов для проведения анализа данных и ведения специализированных архивов данных.

С точки зрения поддержки и администрирования системы должны быть обеспечены механизмы учёта сбоев для их оперативного устранения и сбора обратной связи от пользователей с целью развития СИС и обеспечения исследователей наиболее востребованными информационными продуктами и инструментами для работы с ними.

Техническая база, архитектура и технологии построения системы «Вега-Гидро»

Техническую базу системы «Вега-Гидро» составляет программно-аппаратная инфраструктура Центра коллективного пользования ИКИ РАН (ЦКП «ИКИ-Мониторинг», http://ckp.geosmis.ru/) (Лупян и др., 2019), включающая сверхбольшие распределённые архивы спутниковых данных и результатов их обработки и вычислительные ресурсы для обработки и анализа информации, а также уникальную научную установку «Вега-Science» (http://sci-vega.ru/) (Лупян и др., 2021), выступающую в качестве базовой программной платформы для СИС «Вега-Гидро».

Система «Вега-Гидро» реализована на базе технологий дистанционного мониторинга, разработанных в ИКИ РАН (Лупян и др., 2015а, б, 2019; Прошин и др., 2016, 2020, 2023). Их краткое описание приведено ниже. Архитектура системы, представленная на *рис. 1*, содержит три основных логических блока: источники данных, сервисы доступа к данным и пользовательские интерфейсы СИС «Вега-Гидро».

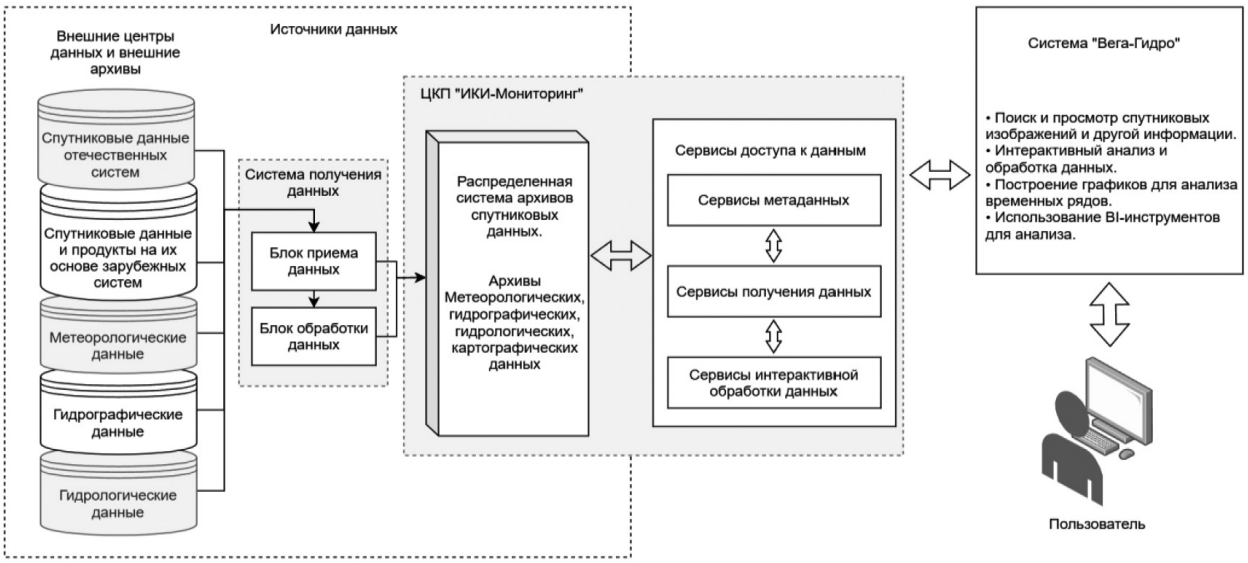


Рис. 1. Архитектура системы «Вега-Гидро»

Основной источник данных для системы — распределённые архивы данных ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Центр коллективного пользования создаёт условия работы с постоянно пополняющимися архивами информации, получаемой на основе различных спутниковых систем, и предоставляет возможности для их распределённой обработки и анализа. Также с помощью сквозных программных шлюзов обеспечена работа с данными внешних ресурсов. В частности, предоставлен оперативный доступ к данным отечественных спутниковых систем из геопортала Роскосмоса (http://next.gptl.ru/). Информация об основных доступных в системе данных и тематических продуктах приведена в разд. «Основные типы данных, доступные в системе «Вега-Гидро».

На программном уровне для доступа к данным в СИС «Вега-Гидро» реализованы сервисы метаданных, сервисы получения данных, сервисы интерактивной обработки по запросу пользователя.

Перечисленные сервисы доступа к данным лежат в основе пользовательских интерфейсов системы, предоставляющих возможности поиска, визуализации, анализа и обработки данных. Подробнее см. в разд. «Инструменты и возможности работы с данными в СИС «Вега-Гидро».

Для создания системы был использован как ряд технологий и программных решений, разработанных в ИКИ РАН, ориентированных на создание информационных систем дистанционного мониторинга (см., например, (Балашов и др., 2023; Кобец и др., 2015; Константинова, 2022; Константинова и др., 2021; Мухамеджанов и др., 2022; Толпин и др., 2011)), так и ряд решений, специально разработанных в интересах СИС «Вега-Гидро». К таким технологиям и решениям, в частности, относятся:

Система получения данных. С помощью API осуществляется подключение к репозиториям метаданных и каталогам данных. Блоки загрузки проводят опрос каталогов на наличие интересующих данных и осуществляют их выгрузку на сервера ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019). Полученная информация обрабатывается для унифицированного хранения в распределённых архивах специально разработанными для каждого типа продуктов программными комплексами интеграции данных, включая тематические продукты.

Технология UNISAT. Стандартизация работы с данными, получаемыми от различных спутниковых систем, и информационными продуктами, формируемыми на их основе, ведётся с помощью унифицированных технологий хранения спутниковых данных UNISAT, обеспечивающих единообразный подход к ведению сверхбольших распределённых архивов в системе архивации (Прошин и др., 2016). Также она предоставляет механизм расчёта динамически формируемых виртуальных продуктов, основанных на автоматизированных вычислениях по алгоритмическим правилам на основе исходной спутниковой информации. Хранение только алгоритмов вычисления позволяет существенно экономить объёмы памяти хранилищ данных и легко расширять состав таких продуктов.

Технология динамического блочного доступа. С целью применения наиболее эффективного механизма обработки различных типов спутниковых данных — обработки не с исходным, а с оптимальным для решения текущей задачи пространственным разбиением — для «Вега-Гидро» использована технология динамического блочного доступа к архивам спутниковых данных ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Прошин и др., 2020).

Технология GEOSMIS. Отображение данных и результатов их обработки в «Вега-Гидро» обеспечивается с помощью картографического веб-интерфейса, реализованного с помощью технологии GEOSMIS (Толпин и др., 2011). Стандартные функциональные возможности интерфейсов на основе GEOSMIS достаточно подробно описаны в работах (Балашов и др., 2020; Кашницкий и др., 2015; Лупян и др., 2012; Толпин и др., 2011, 2019).

Технология предоставления доступа к временным сериям данных сверхбольших распределённых архивов. Она позволяет отображать в виде графиков временные ряды различных характеристик в заданных пользователем координатах земной поверхности. Ряды формируются «на лету» по запросу на основе обработки разновременных спутниковых наблюдений. Этот инструмент даёт возможность анализировать динамику изменения разных характеристик (Балашов и др., 2023).

Система контроля функционирования распределённого программно-аппаратного комплекса. Она обеспечивает стабильное и качественное функционирование программно-аппаратного комплекса с помощью многоуровневого контроля работы всех входящих в его состав компонент от отдельных программ до целых программных подсистем, оперативного оповещения специалистов о возникающих неполадках и отслеживания процесса их устранения (Прошин и др., 2023).

Технологии BI. В «Вега-Гидро» они предоставляют возможность работы с данными интегральных показателей в границах водосборов для комплексного анализа гидрологических систем речных бассейнов и наблюдения водного баланса. Инструменты BI обеспечивают

проведение статистического анализа многолетних временных рядов данных тематических продуктов и гидрометеорологической информации и их графического представления, такого как интерактивные отчётные формы в виде таблиц, графиков и карт, которые отображают динамику и распределение заданных параметров по требуемым разрезам (Кобец и др., 2015).

Унифицированная технология дистанционного объектного мониторинга. Она реализует объектный подход к работе с данными ДЗЗ для мониторинга природных и антропогенных процессов и явлений, который предполагает работу с обобщёнными на однородные области (объекты) спутниковыми данными (Константинова и др., 2021). Технология включает автоматическую фильтрацию облачных данных (Константинова, 2022). На основе описанной технологии в системе «Вега-Гидро» реализован инструментарий для исследования в автоматическом режиме различных природных и природно-антропогенных объектов как в ретроспективе, так и режиме мониторинга.

Технология площадных гидропостов (ПГП). Реализация автоматизированного мониторинга площади водного зеркала в системе обеспечивается с помощью механизма ПГП (Мухамеджанов и др., 2022), реализованных на базе технологии объектного мониторинга. Площадные гидропосты — это привязанные к определённым участкам реки полигоны, в границах которых на основе спутниковых наблюдений проводится оценка площади водной поверхности в конкретные моменты времени. В системе доступна возможность пользовательского задания границ ПГП, визуализации объектов сети ПГП, а также просмотра и анализа измерений площади водного зеркала в границах ПГП.

Система мониторинга уровня воды на основе данных радиолокационной альтиметрии. Она была разработана в ИКИ РАН на основе данных миссий Sentinel-3 и Sentinel-6 и интегрирована в «Вегу-Гидро» для обеспечения наблюдения уровней воды в водоёмах РФ (Врублевский, Бурцев, 2023). Система позволяет оценивать сезонность изменения уровня воды, проводить мониторинг в почти реальном времени, а также оценивать последствия засух или половодий. Измерения уровня воды происходят в определённых орбитой спутника местах — участках водоёма, пересечённых спутниковым треком. Такие виртуальные объекты, в границах которых происходят измерения среднего уровня воды за пролёт спутника, называются гидропостами альтиметрии (АГП). Для взаимодействия с системой в СИС «Вега-Гидро» был подготовлен и реализован специальный инструментарий для работы с данными спутниковой радиоальтиметрии (Врублевский и др., 2026).

При дальнейшем развитии СИС «Вега-Гидро» предполагается более широкая интеграция спутниковых продуктов в разрабатываемые и эксплуатируемые в ИВП РАН модели, а также возможность загрузки в «Вегу-Гидро» модельных продуктов, основанных на следующих технологиях:

Технологии моделирования процессов формирования стока (Информационно-моделирующий комплекс ECOMAG (Motovilov et al., 1999), ставший в настоящее время ядром Национальной гидрологической моделирующей системы (Гельфан и др., 2025)). На основе данных о подстилающей поверхности и входной метеорологической информации эти технологии позволяют воспроизводить основные процессы формирования стока — поступление воды на поверхность водосбора, инфильтрацию, испарение, термический и водный режим почв, формирование снежного покрова и снеготаяние, формирование поверхностного, внутрипочвенного, грунтового и общего речного стока. В настоящее время ведётся разработка подходов для задания типов ландшафтных классов в модели ECOMAG с использованием спутниковых карт растительности и технологии BI (Стребкова и др., 2025). Также ряд спутниковых продуктов (снегозапасы, суммарные влагозапасы) агрегируются в пределах речных бассейнов с применением BI-технологий для дальнейшего сравнения с результатами моделирования (калибровки и верификации модели).

Технологии гидродинамического моделирования (гидродинамическая модель STREAM_2D (Belikov et al., 2023)). Они базируются на численном решении системы уравнений Сен-Венана в приближении мелкой воды на основе детальных данных о рельефе пойм и батиметрии русел и позволяют рассчитывать основные характеристики водного потока и зоны затопления. Применение технологий ПГП и АГП даёт возможность сформировать необходимые

наборы данных для калибровки и верификации моделей, при этом рассчитанные с помощью модели характеристики затопления также могут использоваться для кросс-валидации спутниковых продуктов.

Так, совместное применение спутниковых данных различных типов и современных гидрологических моделей может обеспечить труднодоступные и недостаточно охваченные сетью наземных наблюдений подбассейны и участки речного русла гидрологической информацией, необходимой для долговременного пространственно-временного анализа характеристик водного режима.

Основные типы данных, доступные в СИС «Вега-Гидро»

Архивы спутниковых данных ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

Данные измерений и съёмки отечественных и зарубежных спутников, доступные пользователю в системе, агрегированы в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» и содержат информацию о территории РФ и трансграничных бассейнов. Среди доступных данных результаты съёмки таких спутниковых миссий, как Sentinel-1/-2/-3/-5P/-6, Landsat, «Метеор-М», Aqua, Terra, NOAA (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration), Suomi NPP (*англ.* National Polar-orbiting Partnership), JPSS (*англ.* Joint Polar Satellite System), Fengyun-3 и др. Актуальная, постоянно автоматически обновляющаяся информация о данных, доступных пользователям ЦКП «ИКИ-Мониторинг», представлена на информационном сервере центра в разделе «Архивы данных» (http://ckp.geosmis.ru/default.aspx?page=6).

Информационные спутниковые продукты, представляющие интерес при решении задач гидрологии суши

В интересах системы «Вега-Гидро» формируются архивы различных специализированных информационных продуктов, востребованных для решения задач гидрологии суши. Данные продукты как формируются в ЦКП «ИКИ-Мониторинг», так и получаются из различных российских и зарубежных источников. В *таблице* приводится информация об основных группах таких продуктов.

Список продуктов, доступных пользователям системы, регулярно расширяется. Наиболее полную информацию см. по ссылке (http://hydro.geosmis.ru/?/products/).

Следует отметить, что в системе реализованы различные продукты, которые формируются либо на основе автоматизированной обработки данных по мере их поступления в архивы ЦКП (например, (Кашницкий, Лупян, 2025; Кашницкий и др., 2022)), либо динамически по запросу пользователя (так называемые виртуальные продукты) (Прошин и др., 2016). Для решения ряда гидрологических задач, например для обнаружения открытых водных поверхностей, применяют такие виртуальные продукты, как водные спектральные индексы. В частности, для картирования водных объектов в городских условиях в «Веге-Гидро» доступен индекс MNDWI (*англ.* Modified Normalized Difference Water Index), а для автоматического тенеустойчивого выделения открытой воды в горных районах — AWEI (*англ.* Automated Water Extraction Index). Список специализированных спектральных индексов, доступных пользователям системы, может быть легко расширен. Актуальную информацию о доступных в «Веге-Гидро» индексах см. по ссылке (http://hydro.geosmis.ru/?/products/).

Гидрографические данные

Гидрографические данные служат структурной основой для интерпретации спутниковых данных и верификации результатов их обработки, обеспечивая корректную привязку к речной сети, границам водоёмов и водосборов.

Группы тематических спутниковых продуктов, востребованных для решения задач гидрологии суши, и их примеры

Название группы	Примеры продуктов	Источники
Продукты наблюдения открытой воды	Глобальный атлас поверхностных вод GSW, 1984–2021 гг. (Pekel et al., 2016)	Веб-сайт GSW (https://global-surface-water.appspot.com/)
	Число и доля (в %) наблюдений класса «вода», 2016 г. – наст. время (Кашницкий, Лупян, 2025)	«Вега-Science» (http://sci-vega.ru/)
Карты типов подстилающей поверхности	Dynamic World, 2016 г. – наст. время (Brown et al., 2022)	GEE (https://earthengine.google.com)
	Растительный покров по данным MODIS, 2000–2025 гг. (Барталев и др., 2011, 2016)	«Вега-Science» (http://sci-vega.ru/)
Продукты гравитационных аномалий	JPL GRACE and GRACE-FO Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height Coastal Resolution Improvement Filtered Release 06.3 Version 04, 2002 г. – наст. время (Watkins et al., 2015)	Распределённый активный архив физической океанологии PODAAC (https://podaac.jpl.nasa.gov/)
Информация о снежном покрове	Запас воды в снежном покрове SWE, 2006–2024 гг. (https://doi.org/10.2909/58ca9f01-a526-418d-8862-b4be43ef4738)	Сервис мониторинга суши «Коперник» CLMS (https://land.copernicus.eu/en)
	Карты распространения снега SCE, 2018 г. – наст. время (https://doi.org/10.2909/7f2eb891-cadb-4aa0-8b43-2c18e2a442e9)	
Распространение льда на внутренних водоёмах	Карты распространения льда LIE, 2021 г. – наст. время (https://doi.org/10.2909/ed144dd3-a54b-41bc-a449-af8f0e01c7e9)	
Температура поверхности воды	Продукты о температуре водной поверхности озёр v. 1 (*англ.* Lake Surface Water Temperature version 1), 2002–2012 гг. (https://doi.org/10.2909/cb08effe-de02-402e-8680-9b191f50df11)	
Биооптические характеристики водоёмов	Продукты о качестве воды озёр v. 1 (*англ.* Lake Water Quality version 1), 2002–2012 гг. (https://doi.org/10.2909/b93df0ed-c128-4984-ab1d-6f8f49b7ee68)	

Примечание: GSW (*англ.* Global Surface Water), GEE (*англ.* Google Earth Engine), MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), JPL (*англ.* Jet Propulsion Laboratory), GRACE (*англ.* Gravity Recovery And Climate Experiment), GRACE-FO (*англ.* GRACE Follow-On), PODAAC (*англ.* Physical Oceanography Distributed Active Archive Center), SWE (*англ.* Snow Water Equivalent), SCE (*англ.* Snow Cover Extent), LIE (*англ.* Lake Ice Extent), CLMS (*англ.* Copernicus Land Monitoring Service).

Использование гидрографической подосновы позволяет преобразовывать разрозненные измерения в достоверные количественные оценки, необходимые для понимания гидрофизических процессов. Для этого в «Веге-Гидро» применяются следующие гидрографические данные:

- границы озёр и водохранилищ глобальной базы гидрографических данных HydroSHEDS (*англ.* Hydrological data and maps based on SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales) (https://www.hydrosheds.org/);
- центральные линии рек базы данных речных сетей SWORD (*англ.* SWOT (Surface Water and Ocean Topography) River Database) (Altenau et al., 2021), а также из HydroSHEDS;
- границы ледников глобального цифрового каталога ледников RGI (*англ.* Randolph Glacier Inventory) (https://glims.org);
- границы водосборов разных уровней HydroSHEDS;
- положение наземных гидропостов.

Метеорологические данные

Поскольку гидрологический режим водных объектов находится в тесной связи с климатическими факторами, в современных СИС должны быть наборы данных метеорологической информации. С этой целью в «Вегу-Гидро» интегрированы метеорологические данные (температура, осадки, влажность воздуха, ветер и т.п.) различных моделей реанализа (Уваров и др., 2013). В настоящее время в системе используются данные следующих моделей:

- NCEP-NCAR (*англ.* National Centers for Environmental Prediction — National Center for Atmospheric Research) (https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html) Национального центра атмосферных исследований США NCAR с шагом сетки 0,5° по пространству и 6 ч. по времени;
- ERA5-Land (*англ.* ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) ReAnalysis 5-Land) (https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac), полученные из хранилища климатических данных (https://cds.climate.copernicus.eu/), на сетке 0,1° и 1 ч.

Различные дополнительные данные

Также в «Веге-Гидро» доступны другие данные, например измерения спутниковой альтиметрии миссий Sentinel-3/-6, цифровые модели рельефа, картографическая подоснова с границами территориально-административного деления, городов, дорог и т.п.

Инструменты и возможности работы с данными в СИС «Вега-Гидро»

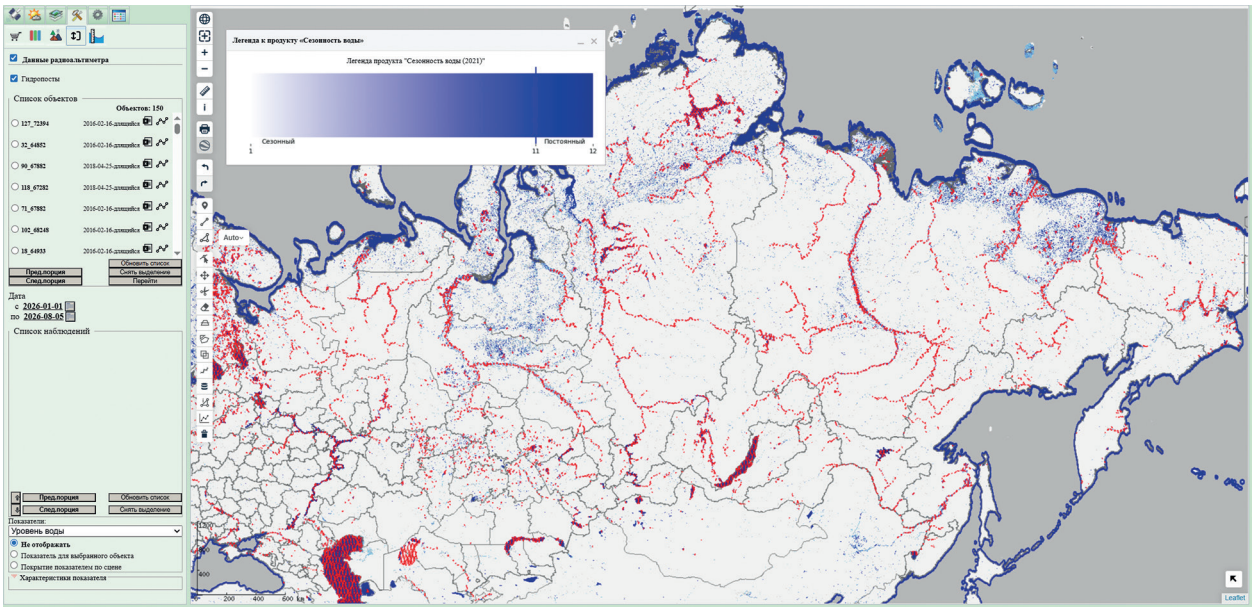
В СИС «Вега-Гидро» для пользователя предоставлены различные инструменты для работы с данными и результатами их обработки. В системе реализованы как классические ГИС-инструменты, унаследованные от базовой для «Веги-Гидро» платформы «Вега-Science», так и специализированные инструменты, ориентированные на решение различных задач гидрологии суши. Краткое описание возможностей некоторых из таких инструментов приведено в настоящем разделе.

Инструменты для работы с данными радиолокационной альтиметрии

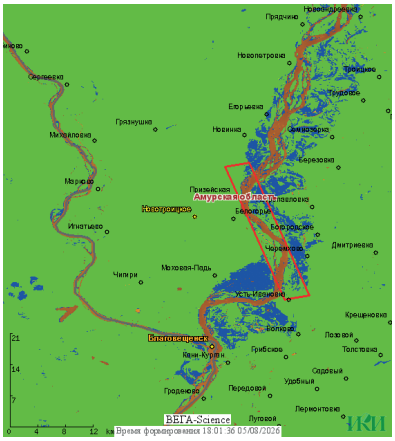
Современные системы спутниковой радиолокационной альтиметрии, такие как Sentinel-3/-6, обеспечивают регулярный всепогодный мониторинг уровней воды внутренних водоёмов, что особенно важно для районов, не охваченных наземными наблюдениями. Для корректной интерпретации таких данных необходим специализированный инструментарий, предназначенный для формирования продолжительных временных рядов, калибровки гидрологических моделей, оперативного выявления опасных гидрологических явлений и т.п.

Для работы с такими данными в «Веге-Гидро» реализован комплекс инструментов, обеспечивающий решение, в частности, следующих задач:

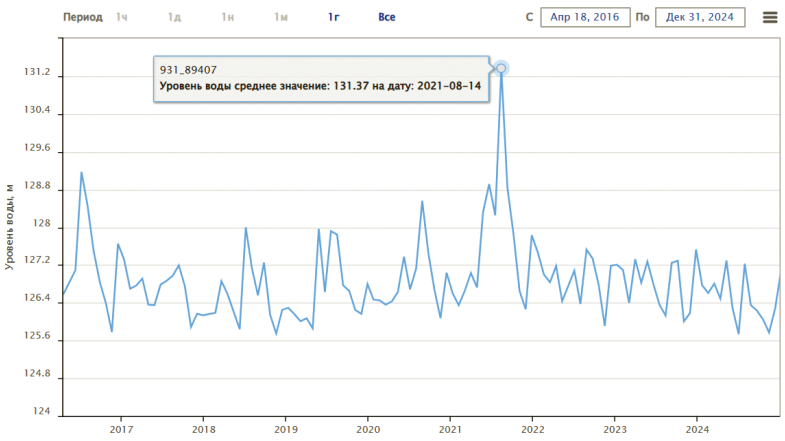
- отображение в картографическом интерфейсе сети АГП (*рис. 2а*), в том числе совместно со специальной картографией или выбранными спутниковыми и/или другими продуктами (см. *рис. 2б*);
- построение и анализ графиков временных рядов измерений уровня воды для отображения общей и межгодовой динамики (см. *рис. 2в*);
- экспорт данных для последующего статистического анализа или применения в задачах гидрологического моделирования.



а



б



в

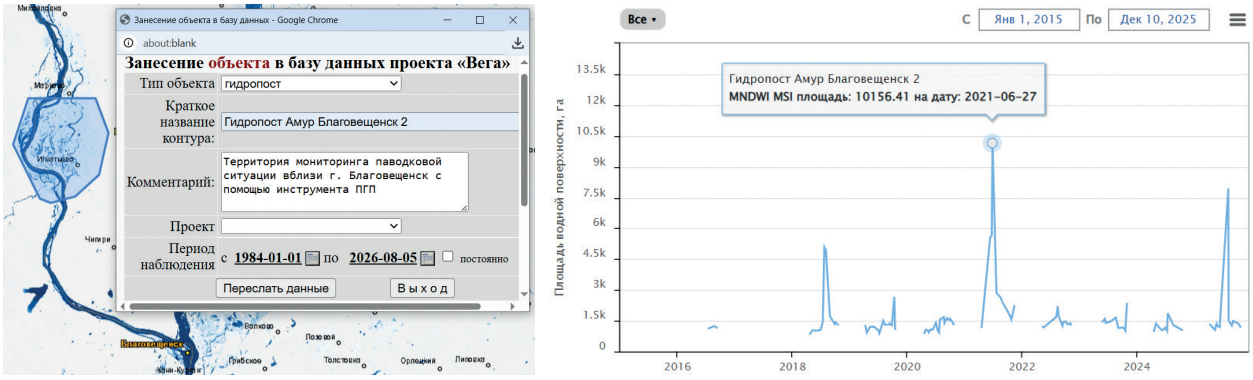
Рис. 2. Система работы с данными радиоальтиметров в СИС «Вега-Гидро»: *а* — сеть АГП для водоёмов России в интерфейсе системы (подложка — продукт «Сезонность воды» (Pekel et al., 2016)); *б* — границы АГП № 931 вблизи г. Благовещенска (подложка — совмещённые маски воды: на основе MNDWI во время половодья в 2021 г. от 16.08.2021, 02:43:30, Sentinel-2A (зелёным цветом показана суша, синим — вода) и на основе AWEI от 29.10.2021, 02:26:26, Landsat-8 (после половодья) (вода — коричневым)); *в* — динамика уровня воды на АГП № 931, отображающая аномальное значение уровня воды, вызванное половодьем 2021 г.

Инструменты для работы с данными площадных гидропостов

Для непрерывного отслеживания пространственной динамики водных объектов, гидрологического моделирования малоизученных бассейнов, а также расчёта кривых связи «уровень/расход воды – площадь» используют технологии мониторинга площади водного зеркала. Одной из таких технологий считаются ПГП (Мухамеджанов и др., 2022). Площадные гидропосты обеспечивают автоматический спутниковый мониторинг площади водного зеркала в заданных границах для количественной оценки морфометрического состояния водоёмов. Вследствие неразрывной связи площади водного зеркала с гидрологическими параметрами (уровень и расход воды), ПГП выступает важным инструментом, обеспечивающим возможность получения уровней воды на трансграничных участках рек или участках, не охваченных сетью наземных гидропостов (см. подробнее работы (Мухамеджанов и др., 2025а, б)).

В СИС «Вега-Гидро» был реализован специализированный инструментарий работы с ПГП, обеспечивающий решение следующих задач:

- интерактивное задание границ ПГП с помощью специального интерфейса (*рис. 3а*);
- вычисление площади водного зеркала по данным спутниковой съёмки высокого разрешения (Sentinel-2, серия Landsat) с автоматической фильтрацией выбросов, вызванных облачностью;
- визуализация долговременных рядов изменения площади водного зеркала (см. *рис. 3б*);
- экспорт для дальнейшего анализа и/или гидрологического моделирования.



а *б*

Рис. 3. Инструменты работы с данными ПГП: *а* — подготовка контура (показано синим цветом) ПГП вблизи г. Благовещенска, подложка — «Доля (в %) наблюдений класса вода» в 2021 г.; *б* — динамика площади водного зеркала в границах ПГП. Данные ПГП также подтверждают масштаб половодья 2021 г. на р. Амур вблизи г. Благовещенска

Инструменты BI для анализа характеристик водосборов

Для комплексного анализа состояния речных бассейнов, а также для формирования обучающих и/или валидационных выборок для гидрологического моделирования необходима непрерывная оценка интегральных показателей среды в границах водосборов. Использование технологий BI-аналитики, в частности, позволяет решать задачи автоматического пространственного агрегирования разнородных данных в границах различных геометрий, в том числе водосборов.

В СИС «Вега-Гидро» данный функционал реализован на базе специализированных BI-инструментов, обеспечивающих решение следующих задач:

- сбор и агрегация в границах водосборов данных различных источников;
- предоставление пользователю информации в виде таблиц, графиков (*рис. 4*), гистограмм и картограмм (*рис. 5*) с возможностью динамической фильтрации;
- экспорт для дальнейшего анализа или гидрологического моделирования.

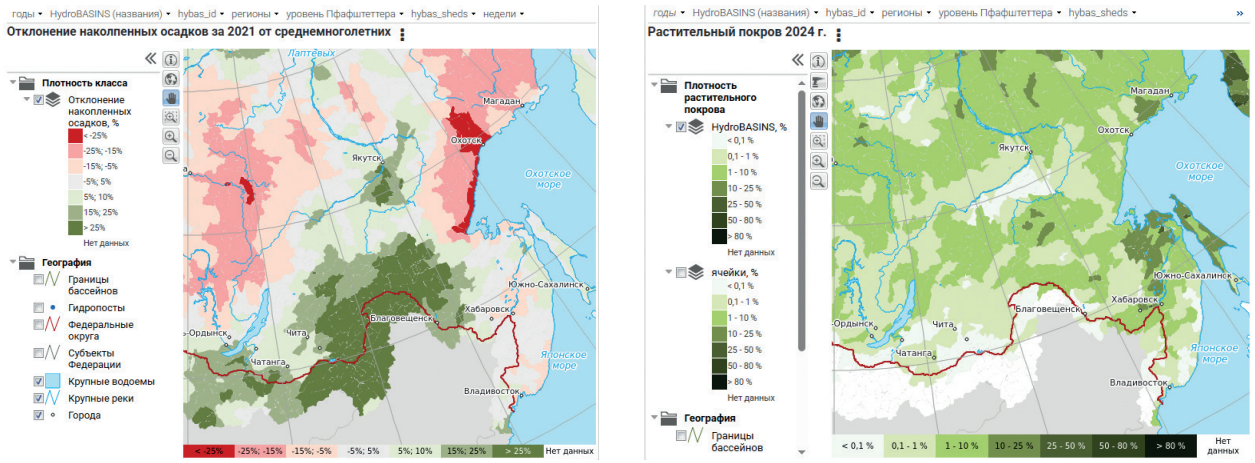
В настоящее время инструменты BI-аналитики «Веги-Гидро» позволяют работать с долговременными сериями параметров, агрегированных в границах водосборов, по данным следующих продуктов:

- метеоданные реанализа (NCEP-NCAR);
- преобладающие типы подстилающей поверхности (Барталев и др., 2011, 2016);
- продукты наблюдения открытой воды (Кашницкий, Лупян, 2025; Pekel et al., 2016).

Набор данных, доступных в системе для анализа инструментами BI-аналитики, постоянно расширяется.



Рис. 4. Построение временных серий наблюдений в пределах водосбора в интерфейсе BI: суммарная площадь классов открытой воды, полученная по продукту «Частота наблюдений класса вода» (Кашницкий, Лупян, 2025). График иллюстрирует масштаб половодья на р. Амур (водосбор 406014890 показан на карте цветом) в 2021 г.



а *б*

Рис. 5. Интерактивные отчётные формы BI-анализа в пределах водосборов: *а* — отклонение накопленных осадков за 2021 г. от среднемноголетних за 2015–2025 гг. (зелёным цветом показаны водосборы с профицитом осадков, вызвавшим половодье около г. Благовещенска), *б* — доля (в %) площади, занимаемая типом подстилающей поверхности (в качестве примера показан класс «болота» в 2024 г. на юго-востоке России)

Заключение

Созданная в 2024 г. для решения задач гидрологии суши с помощью методов и технологий ДЗЗ спутниковая информационная система «Вега-Гидро» (http://hydro.geosmis.ru/) с 2025 г. находится в опытной эксплуатации. Программно-аппаратная инфраструктура и вычислительные ресурсы для обработки и анализа информации ЦКП «ИКИ-Мониторинг» стали технической основой системы, что позволило обеспечить пользователей СИС «Вега-Гидро» информацией из сверхбольших распределённых архивов спутниковых данных и результатов

их обработки. Так, в системе доступен широкий набор данных: архивы исторических и оперативных спутниковых данных, получаемых различными приборами (в настоящий момент в системе доступны данные более 70 приборов), виртуальные и тематические информационные продукты на основе спутниковых данных (в настоящее время около 200) и другая информация, которая может быть полезна при анализе различных процессов гидрологии суши.

При создании системы помимо ранее разработанных в ИКИ РАН технологических и программных решений, ориентированных на создание информационных систем дистанционного мониторинга, использовались и технологии, специально разработанные в интересах решения задач гидрологии суши. Это позволило обеспечить пользователей системы широким набором инструментов для проведения комплексного, пространственного и временного анализа. Так, инструментарий «Веги-Гидро» представлен как классическими ГИС-инструментами, так и специальными: инструментами объектного мониторинга, анализа и построения временных рядов, работы с данными альтиметрии и BI-технологий.

На настоящем этапе «Вега-Гидро» позволяет решать широкий круг задач в области гидрологии суши, включая непрерывный спутниковый автоматизированный мониторинг различных гидрологических показателей. При этом в ИКИ РАН и ИВП РАН ведутся активные работы по развитию СИС «Вега-Гидро». Эти работы выполняются в первую очередь по следующим направлениям:

- расширение состава информации, доступной пользователям для работы;
- развитие функциональности системы представления и анализа данных;
- адаптация результатов обработки спутниковых продуктов системы «Вега-Гидро» для использования в задачах моделирования процессов формирования стока и гидродинамического моделирования.

Несмотря на то, что система находится в опытной эксплуатации, «Вега-Гидро» уже имеет ряд пользователей, представляющих такие организации, как ИКИ РАН, ИВП РАН, Институт прикладной физики РАН, Институт биологии внутренних вод РАН, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского и Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

Планируется, что СИС «Вега-Гидро» в перспективе станет доступной различным исследователям и специалистам в области гидрологии суши и тематического образования.

С текущими возможностями СИС «Вега-Гидро» можно ознакомиться по адресу: http://hydro.geosmis.ru/.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки (тема «Мониторинг», госрегистрация № 126031818938-6) с использованием ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг», включая возможности и инструментарий информационной системы «Вега-Гидро», тестирование системы на примере гидрологических задач в ИВП РАН выполняется при поддержке темы госзадания ИВП РАН «Разработка и внедрение геоинформационных моделирующих комплексов для обеспечения водной безопасности регионов России» (FMWZ-2025-0003).

Литература

1. *Балашов И. В.*, *Кашницкий А. В.*, *Барталев С. А. и др.* Информационная система комплексного мониторинга лесов и охотничьих угодий России ВЕГА-Лес // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 73–88. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-73-88.
2. *Балашов И. В.*, *Марченков В. В.*, *Прошин А. А. и др.* Разработка сервисов для эффективного предоставления доступа к временным сериям данных сверхбольших распределённых архивов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 113–122. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-113-122.
3. *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Ершов Д. В.*, *Исаев А. С.*, *Лупян Е. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Уваров И. А.* Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра

MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
4. *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Жарко В. О.*, *Лупян Е. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Хвостиков С. А.*, *Шабанов Н. В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
5. *Врублевский М. В.*, *Бурцев М. А.* Система мониторинга уровня воды внутренних водоемов на основе данных альтиметрии // 8-я Международ. научно-техн. конф. «В. Ф. Уткин — 100 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика»: Материалы докл. Рязань: Рязанский гос. радиотехн. ун-т им. В. Ф. Уткина, 2023. С. 279–280.
6. *Врублевский М. В.*, *Бурцев М. А.*, *Константинова А. М.* Инструменты работы с данными альтиметрии в сервисе «Вега-Гидро» // 6-е Виноградовские чтения. Гидрология нового поколения. Сб. докл. международ. науч. конф. памяти выдающегося русского ученого Ю. Б. Виноградова. СПб.: Изд-во ВВМ, 2026. С. 177–181.
7. *Гарцман Б. И.*, *Энтин А. Л.*, *Шекман Е. А.* Специальные инструменты структурно-гидрографического анализа речных систем в среде ArcMap // Водные ресурсы. 2024. Т. 51. № 3. С. 244–261. DOI: 10.31857/S0321059624030023.
8. *Гельфан А. Н.*, *Мотовилов Ю. Г.*, *Бородин О. О. и др.* Национальная гидрологическая моделирующая система: структура, результаты испытаний, приложения // Метеорология и гидрология. 2025. № 9. С. 45–57. DOI: 10.52002/0130-2906-2025-9-45-57.
9. *Дерюгина В. В.*, *Василенко Е. В.*, *Кровотынцев В. А.*, *Кухарский А. В.* Технологические решения при создании спутникового сегмента информационной системы мониторинга наводнений в бассейне р. Волга // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. Т. 4. С. 40–47. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-4-40-47.
10. *Зилитинкевич Н. С.* Анализ ежедневных площадей заливания районов дельты Волги в половодье с использованием спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2026. Т. 23. № 1. С. 245–259. DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-245-259.
11. *Кашницкий А. В.*, *Лупян Е. А.* Архив информационных продуктов о частоте наблюдения типов поверхности на основе данных спутников Sentinel-2 и возможности его применения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 2. С. 335–342. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-335-342.
12. *Кашницкий А. В.*, *Балашов И. В.*, *Лупян Е. А.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.* Создание инструментов для удаленной обработки спутниковых данных в современных информационных системах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 156–170.
13. *Кашницкий А. В.*, *Бурцев М. А.*, *Прошин А. А.* Технология создания безоблачных композитных изображений по данным спутников серии Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 76–85. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-76-85.
14. *Кобец Д. А.*, *Балашов И. В.*, *Данилов И. Д.*, *Лупян Е. А.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.* Использование BI-технологий для создания инструментов для анализа данных спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 4. С. 17–27.
15. *Константинова А. М.* Алгоритм автоматической фильтрации облачных данных для решения задач объектного дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 88–99. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-88-99.
16. *Константинова А. М.*, *Балашов И. В.*, *Кашницкий А. В. и др.* Унифицированная технология дистанционного мониторинга природных и антропогенных объектов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 41–52. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-41-52.
17. *Корнилова Е. Д.*, *Крыленко И. Н.*, *Головлев П. П. и др.* Верификация двумерной гидродинамической модели р. Лены у г. Якутск по разновременным данным космической съёмки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 169–178. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-169-178.
18. *Лупян Е. А.*, *Матвеев А. М.*, *Уваров И. А.*, *Бочарова Т. Ю.*, *Лаврова О. Ю.*, *Митягина М. И.* Спутниковый сервис See the Sea — инструмент для изучения процессов и явлений на поверхности океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 251–261.
19. *Лупян Е. А.*, *Балашов И. В.*, *Бурцев М. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Кашницкий А. В.*, *Кобец Д. А.*, *Крашенинникова Ю. С.*, *Мазуров А. А.*, *Назиров Р. Р.*, *Прошин А. А.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.*, *Флитман Е. В.* (2015a) Создание технологий построения информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 53–75.

20. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Кашницкий А. В.*, *Мазуров А. А.*, *Матвеев А. М.*, *Суднева О. А.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.* (2015б) Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
21. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А. и др.* Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
22. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А. и др.* Система «Вега-Science»: особенности построения, основные возможности и опыт использования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 9–31. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.
23. *Музылев Е. Л.* Использование данных дистанционного зондирования при моделировании водного и теплового режимов участков суши: обзор публикаций // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 5. С. 561–584. DOI: 10.31857/S0321059623700025.
24. *Музылев Е. Л.*, *Старцева З. П.*, *Успенский А. Б. и др.* Использование данных дистанционного зондирования при моделировании водного и теплового режимов сельских территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 108–136. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-108-136.
25. *Мухамеджанов И. Д.*, *Константинова А. М.*, *Лупян Е. А.*, *Умирзаков Г. У.* Оценка возможностей спутникового мониторинга динамики речного стока на примере анализа состояния реки Амударьи // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 87–103. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-87-103.
26. *Мухамеджанов И. Д.*, *Врублевский М. В.*, *Лупян Е. А.* (2025а) Возможности спутникового мониторинга рек с помощью данных альтиметрии и космических гидропостов на примере реки Амударьи // Регион. проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы 12-й Международ. науч. конф. Красноярск: Сибирский федер. ун-т, 2025. С. 372–376.
27. *Мухамеджанов И. Д.*, *Врублевский М. В.*, *Лупян Е. А.*, *Умирзаков Г. У.* (2025б) Возможности калибровки космических гидропостов по данным альтиметрии на примере рек Центральной Азии // Материалы 23-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2025. С. 309. DOI: 10.21046/23DZZconf-2025a.
28. *Павлюкевич Е. Д.*, *Елагина Н. Э.*, *Крыленко И. Н. и др.* Возможности использования данных дистанционного зондирования в горной гидрологии // Материалы 22-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2024. С. 370. DOI: 10.21046/22DZZconf-2024a.
29. *Прошин А. А.*, *Лупян Е. А.*, *Балашов И. В. и др.* Создание унифицированной системы ведения архивов спутниковых данных, предназначенной для построения современных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-9-27.
30. *Прошин А. А.*, *Лупян Е. А.*, *Балашов И. В. и др.* Технология динамического блочного представления спутниковых данных системам распределённой обработки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 79–93. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-79-93.
31. *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Кобец Д. А. и др.* Система контроля функционирования распределённого программно-аппаратного комплекса ЦКП «ИКИ-Мониторинг» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 1. С. 95–110. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-95-110.
32. *Семенова Н. К.*, *Захарова Е. А.*, *Крыленко И. Н.*, *Сазонов А. А.* Статистические методы и методы машинного обучения в расчётах уровней воды рек по данным спутниковых альтиметрических измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 1. С. 76–87. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-76-87.
33. *Стребкова А. Д.*, *Крыленко И. Н.*, *Захарова Е. А. и др.* Оценка чувствительности модели формирования стока бассейна Средней Оби к условиям обводненности и параметрам подстилающей поверхности // Материалы 23-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2025. С. 311. DOI: 10.21046/23DZZconf-2025a.
34. *Толпин В. А.*, *Балашов И. В.*, *Ефремов В. Ю.*, *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Уваров И. А.*, *Флитман Е. В.* Создание интерфейсов для работы с данными современных систем дистанционного мониторинга (система GEOSMIS) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 93–108.

35. *Толпин В. А.*, *Барталев С. А.*, *Ёлкина Е. С. и др.* Информационная система VEGA-GEOGLAM — инструмент разработки методов и подходов использования данных спутникового дистанционного зондирования в интересах решения задач глобального сельскохозяйственного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 183–197. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-183-197.
36. *Уваров И. А.*, *Халикова О. А.*, *Балашов И. В.*, *Бурцев М. А.*, *Лупян Е. А.*, *Матвеев А. А.*, *Платонов А. Е.*, *Прошин А. А.*, *Толпин В. А.*, *Крашенинникова Ю. С.* Организация работы с метеорологической информацией в информационных системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 30–45.
37. *Фролов А. В.*, *Асмус В. В.*, *Борщ С. В.*, *Вильфанд Р. М.*, *Жабина И. И.*, *Затягалова В. В.*, *Кровотынцев В. А.*, *Кудрявцева О. И.*, *Леонтьева Е. А.*, *Симонов Ю. А.*, *Степанов Ю. А.* «ГИС Амур»: система мониторинга, прогнозирования и раннего оповещения о наводнениях // Метеорология и гидрология. 2016. № 3. С. 5–21.
38. *Фролова Н. Л.*, *Григорьев В. Ю.*, *Крыленко И. Н.*, *Захарова Е. А.* Современные возможности использования спутниковой системы GRACE для решения гидрологических задач // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Науки о Земле. 2021. Т. 66. № 1. С. 107–122. DOI: 10.21638/spbu07.2021.107.
39. *Alexakis D. D.*, *Hadjimitsis D. G.*, *Agapiou A.* Integrated use of remote sensing, GIS and precipitation data for the assessment of soil erosion rate in the catchment area of "Yialias" in Cyprus // Atmospheric Research. 2013. V. 131. P. 108–124. DOI: 10.1016/j.atmosres.2013.02.013.
40. *Alexakis D. D.*, *Grillakis M. G.*, *Koutroulis A. G. et al.* GIS and remote sensing techniques for the assessment of land use change impact on flood hydrology: the case study of Yialias basin in Cyprus // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2014. V. 14. No. 2. P. 413–426. DOI: 10.5194/nhess-14-413-2014.
41. *Altenau E. H.*, *Pavelsky T. M.*, *Durand M. T. et al.* The Surface Water and Ocean Topography (SWOT) mission River Database (SWORD): A global river network for satellite data products // Water Resources Research. 2021. V. 57. Iss. 7. Article e2021WR030054. DOI: 10.1029/2021WR030054.
42. *Belikov V. V.*, *Aleksyuk A. I.*, *Borisova N. M. et al.* Experience in numerical hydrodynamic simulation of long river reaches // Water Resources. 2023. V. 50. No. 4. P. 465–481. DOI: 10.1134/S0097807823040036.
43. *Bennour A.*, *Jia L.*, *Menenti M. et al.* Calibration and validation of SWAT model by using hydrological remote sensing observables in the Lake Chad Basin // Remote Sensing. 2022. V. 14. Iss. 6. Article 1511. DOI: 10.3390/rs14061511.
44. *Brown C. F.*, *Brumby S. P.*, *Guzder-Williams B. et al.* Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping // Scientific Data. 2022. V. 9. Article 251. DOI: 10.1038/s41597-022-01307-4.
45. *Bugaets A.*, *Gartsman B.*, *Gelfan A. et al.* The integrated system of hydrological forecasting in the Ussuri River basin based on the ECOMAG model // Geosciences. 2018. V. 8. No. 1. Article 5. DOI: 10.3390/geosciences8010005.
46. *Chen Q.*, *Yu R.*, *Hao Y. et al.* A new method for mapping aquatic vegetation especially underwater vegetation in Lake Ulansuhai using GF-1 satellite data // Remote Sensing. 2018. V. 10. Iss. 8. Article 1279. DOI: 10.3390/rs10081279.
47. *Dong C.* Remote sensing, hydrological modeling and in situ observations in snow cover research: A review // J. Hydrology. 2018. V. 561. P. 573–583. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.04.027.
48. *Jonas T.*, *Marty C.*, *Magnusson J.* Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the Swiss Alps // J. Hydrology. 2009. V. 378. P. 161–167. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.09.021.
49. *Motovilov Yu. G.*, *Gottschalk L.*, *Engeland K.*, *Belokurov A.* ECOMAG — Regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region. Oslo: Department of Geophysics, University of Oslo, 1999. 88 p.
50. *Pekel J.-F.*, *Cottam A.*, *Gorelick N.*, *Belward A. S.* High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // Nature. 2016. V. 540. No. 7633. P. 418–422. DOI: 10.1038/nature20584.
51. *Shadmehri Toosi A.*, *Batelaan O.*, *Shanafield M.*, *Guan H.* Land use-land cover and hydrological modeling: A review // WIREs Water. 2025. V. 12. Iss. 2. Article e70013. DOI: 10.1002/WAT2.70013.
52. *Watkins M. M.*, *Wiese D. N.*, *Yuan D. N. et al.* Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons // J. Geophysical Research: Solid Earth. 2015. V. 120. No. 4. P. 2648–2671. DOI: 10.1002/2014JB011547.
53. *Zakharova E.*, *Agafonova S.*, *Duguay C. et al.* River ice phenology and thickness from satellite altimetry: potential for ice bridge road operation and climate studies // The Cryosphere. 2021. V. 15. Iss. 12. P. 5387–5407. DOI: 10.5194/tc-15-5387-2021.

Vega-Hydro: A specialized satellite information system for hydrological applications

M. V. Vrublevsky[1], M. A. Burtsev[1], E. A. Zakharova[2], D. A. Kobets[1], I. N. Krylenko[2,3], E. A. Loupian[1], V. M. Moreido[2], V. O. Polyanin[2], I. A. Uvarov[1]

[1] *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: vrublevsky@d902.iki.rssi.ru
[2] *Water Problems Institute RAS, Moscow 119333, Russia*
[3] *Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

The reduction of the ground-based observational hydrological network, as well as increasing demand for heterogeneous, high-quality and operational satellite data on the state of water resource systems under climate change conditions, necessitate creation of a satellite information system to address hydrological problems. The article describes the main tasks, architecture layout and current capabilities of such a system — the specialized satellite information system called Vega-Hydro. This work lays the foundation for developing an accessible domestic service for acquiring, storing, and processing data of Earth remote sensing from space intended for hydrologists, water management specialists and decision-makers in water resource management. Specialists from Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI RAS) and Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences (WPI RAS) have developed a working prototype of Vega-Hydro (http://hydro.geosmis.ru/). The system provides access to both thematic data useful for solving land hydrology problems and satellite imagery from ultra-large distributed archives, as well as to computing resources of the IKI-Monitoring Shared Use Center (IKI-Monitoring SUC, http://ckp.geosmis.ru/) of IKI RAS for data storage, processing, and analysis. In this work, the capabilities implemented in the system are demonstrated through explicit examples, including technological solutions developed specially for this system with the aim to study and assess the state of water bodies and near-water ecosystems. Particular attention is paid to tools that, as a rule, either are absent in thematic information services or distributed across different platforms, making their application in comprehensive analysis difficult. These tools include object-based monitoring instrumentation, tools for work with radar altimetry data and analytical BI (Business Intelligence) tools that enable, among other things, analysis of time series of various characteristics of the study area aggregated within the boundaries of different-level watersheds.

Keywords: remote sensing, satellite data, information system, access to satellite data, hydrology, Vega-Hydro

Accepted: 01.09.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-211-230

References

1. Balashov I. V., Kashnitskii A. V., Bartalev S. A. et al., VEGA-Les: information system for complex monitoring of forests and hunting grounds in Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 4, pp. 73–88 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-73-88.
2. Balashov I. V., Marchenkov V. V., Proshin A. A. et al., Development of services for effective time series data analysis for ultra-large distributed archives, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 2, pp. 113–122 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-113-122.
3. Bartalev S. A., Egorov V. A., Ershov D. V., Isaev A. S., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Uvarov I. A., Mapping of Russia's vegetation cover using MODIS satellite spectroradiometer data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, V. 8, No. 4, pp. 285–302 (in Russian).
4. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
5. Vrublevsky M. V., Burtsev M. A., Water level monitoring system for inland water bodies based on altimetry data, *8-ya Mezhdunarod. nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «V. F. Utkin — 100 let so dnya rozhdeniya. Kosmonavtika. Radioehlektronika. Geoinformatika»: Materialy dokladov* (8th Intern. Scientific and Technical Conf. "V. F. Utkin — 100 years from the birth. Cosmonautics. Radioelectronics. Geoinformatics", Proc.), Ryazan: Ryazan State Radio Engineering University named after V. F. Utkin, 2023, pp. 279–280 (in Russian).

6. Vrublevsky M. V., Burtsev M. A., Konstantinova A. M., Tools for working with altimetry data in the Vega-Hydro service, *6-e Vinogradovskie chteniya. Gidrologiya novogo pokoleniya. Sbornik dokladov mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii pamyati vydayushchegosya russkogo uchenogo Yu. B. Vinogradova* (6th Vinogradov Readings. New Generation Hydrology: Proc. Intern. Scientific Conf. in Memory of the Outstanding Russian Scientist Yu. B. Vinogradov), Saint Petersburg: VVM Publishing LLC, 2026, pp. 177–181 (in Russian).
7. Gartsman B. I., Entin A. L., Shekman E. A., Special tools for structural and hydrographic analysis of river systems in the ArcMap environment, *Water Resources*, 2024, V. 51, No. 3, pp. 171–184, DOI: 10.1134/S0097807824700726.
8. Gelfan A. N., Motovilov Yu. G., Borodin O. O. et al., The national hydrological modeling system: structure, test results, and applications, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2025, V. 50, No. 9, pp. 750–759, DOI: 10.3103/S1068373925090043.
9. Deryugina V. V., Vasilenko E. V., Krovotintsev V. A., Kukharsky A. V., Technological solutions used of the development segment of the flood monitoring information system in the Volga River basin, *Interexpo GeoSiberia*, 2022, V. 4, pp. 40–47 (in Russian), DOI: 10.33764/2618-981X-2022-4-40-47.
10. Zilitinkevich N. S., Analysis of daily flooded areas in Volga delta during flood periods based on remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2026, V. 23, No. 1, pp. 245–259 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-245-259.
11. Kashnitskii A. V., Loupian E. A., Archive of information products on surface type observation frequency based on Sentinel-2 data and its possible applications, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 2, pp. 335–342 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-335-342.
12. Kashnitskiy A. V., Balashov I. V., Loupian E. A., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Development of software tools for satellite data remote processing in contemporary information systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, V. 12, No. 1, pp. 156–170 (in Russian).
13. Kashnitskii A. V., Burtsev M. A., Proshin A. A., Technology to create cloud-free composites from Sentinel-2 satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 5, pp. 76–85 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-76-85.
14. Kobets D. A., Balashov I. V., Danilov I. D., Loupian E. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Using BI technologies to create analysis tools for satellite remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, V. 12, No. 4, pp. 17–27 (in Russian).
15. Konstantinova A. M., Cloud data automatic filtering algorithm for object remote monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 4, pp. 88–99 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-88-99.
16. Konstantinova A. M., Balashov I. V., Kashnitskiy A. V. et al., Unified technology for remote monitoring of natural and anthropogenic objects, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 4, pp. 41–52 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-41-52.
17. Kornilova E. D., Krylenko I. N., Golovlyov P. P. et al., Verification of the two-dimensional hydrodynamic model of the Lena River near Yakutsk by time-varying satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 5, pp. 169–178 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-169-178.
18. Loupian E. A., Matveev A. A., Uvarov I. A., Bocharova T. Yu., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., The Satellite Service See the Sea — a tool for the study of oceanic phenomena and processes, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, V. 9, No. 2, pp. 251–261 (in Russian).
19. Loupian E. A., Balashov I. V., Burtsev M. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Kobets D. A., Krasheninnikova Yu. S., Mazurov A. A., Nazirov R. R., Proshin A. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Flitman E. V. (2015a), Development of information systems design technologies, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, V. 12, No. 5, pp. 53–75 (in Russian).
20. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A. (2015b), IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, V. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian).
21. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A. et al., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
22. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A. et al., Vega-Science system: design features, main capabilities and usage experience, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 6, pp. 9–31 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.

23. Muzylev E. L., Utilization of remote sensing data in the simulation of the water and heat regime of land areas: A review of publications, *Water Resources*, 2023, V. 50, No. 5, pp. 709–731, DOI: 10.1134/S0097807823700021.
24. Muzylev E. L., Startseva Z. P., Uspensky A. B. et al., Using remote sensing data to model water and heat regimes of rural territories, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, V. 14, No. 6, pp. 108–136 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-108-136.
25. Mukhamedjanov I. D., Konstantinova A. M., Loupian E. A., Umirzakov G. U., Evaluation of satellite monitoring capabilities of stream runoff based on the Amu Darya River state analysis, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 1, pp. 87–103 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-87-103.
26. Mukhamedjanov I. D., Vrublevsky M. V., Loupian E. A. (2025a), Capabilities for rivers satellite monitoring using altimetric data and virtual gauging stationson the case of the Amu Darya River, *Regional'nye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli: materialy 12-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* (Regional Problems of Earth Remote Sensing: Proc. 12th Intern. Scientific Conf.), Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2025, pp. 372–376 (in Russian).
27. Mukhamedjanov I. D., Vrublevsky M. V., Loupian E. A., Umirzakov G. U. (2025b), The potential for calibrating space hydrometric stations using altimetry data, using the example of Central Asian rivers, *Materialy 23-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 23rd Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2025, p. 309 (in Russian), DOI: 10.21046/23DZZconf-2025a.
28. Pavlyukevich E. D., Elagina N. E., Krylenko I. N. et al., Possibilities of using remote sensing data in mountain hydrology, *Materialy 22-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 22nd Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2024, p. 370 (in Russian), DOI: 10.21046/22DZZconf-2024a.
29. Proshin A. A., Loupian E. A., Balashov I. V. et al., Unified satellite data archive management platform for remote monitoring systems development, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, V. 13, No. 3, pp. 9–27 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-9-27.
30. Proshin A. A., Loupian E. A., Balashov I. V. et al., Technology of satellite data dynamic block provision to distributed processing systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 7, pp. 79–93 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-79-93.
31. Proshin A. A., Burtsev M. A., Kobets D. A. et al., Operation control system of the IKI-Monitoring distributed hardware and software complex, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 1, pp. 95–110 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-95-110.
32. Semenova N. K., Zakharova E. A., Krylenko I. N., Sazonov A. A., Statistical and machine learning methods for river water level time series construction using satellite altimetry, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 1, pp. 76–87 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-76-87.
33. Strebkova A. D., Krylenko I. N., Zakharova E. A. et al., Sensitivity assessment of a runoff generation model for the Middle Ob basin to water availability conditions and land surface parameters, *Materialy 23-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 23rd Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2025, p. 311 (in Russian), DOI: 10.21046/23DZZconf-2025a.
34. Tolpin V. A., Balashov I. V., Efremov V. Yu., Loupian E. A., Proshin A. A., Uvarov I. A., Flitman E. V., The GEOSMIS system: Developing interfaces to operate data in modern remote monitoring systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, V. 8, No. 3, pp. 93–108 (in Russian).
35. Tolpin V. A., Bartalev S. A., Elkina E. S. et al., The VEGA-GEOGLAM information system: a tool for the development of methods and approaches to using satellite remote sensing data in problem-solving tasks of global agricultural monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 3, pp. 183–197 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-183-197.
36. Uvarov I. A., Khalikova O. A., Balashov I. V., Bourtsev M. A., Loupian E. A., Matveev A. A., Platonov A. E., Proshin A. A., Tolpin V. A., Krasheninnikova Yu. S., Meteorological data management in framework of the satellite monitoring information systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, V. 10, No. 2, pp. 30–45 (in Russian).
37. Frolov A. V., Asmus V. V., Borshch S. V. et al., GIS-Amur system of flood monitoring, forecasting, and early warning, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, V. 41, No. 3, pp. 157–169, DOI: 10.3103/S1068373916030018.
38. Frolova N. L., Grigorev V. Yu., Krylenko I. N., Zakharova E. A., State-of-the-art potential of the GRACE satellite mission for solving modern hydrological problems, *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2021, V. 66, No. 1, pp. 107–122 (in Russian), DOI: 10.21638/spbu07.2021.107.

39. Alexakis D. D., Hadjimitsis D. G., Agapiou A., Integrated use of remote sensing, GIS and precipitation data for the assessment of soil erosion rate in the catchment area of "Yialias" in Cyprus, *Atmospheric Research*, 2013, V. 131, pp. 108–124, DOI: 10.1016/j.atmosres.2013.02.013.
40. Alexakis D. D., Grillakis M. G., Koutroulis A. G. et al., GIS and remote sensing techniques for the assessment of land use change impact on flood hydrology: the case study of Yialias basin in Cyprus, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, V. 14, No. 2, pp. 413–426, DOI: 10.5194/nhess-14-413-2014.
41. Altenau E. H., Pavelsky T. M., Durand M. T. et al., The Surface Water and Ocean Topography (SWOT) mission River Database (SWORD): A global river network for satellite data products, *Water Resources Research*, 2021, V. 57, Iss. 7, Article e2021WR030054, DOI: 10.1029/2021WR030054.
42. Belikov V. V., Aleksyuk A. I., Borisova N. M. et al., Experience in numerical hydrodynamic simulation of long river reaches, *Water Resources*, 2023, V. 50, No. 4, pp. 465–481, DOI: 10.1134/S0097807823040036.
43. Bennour A., Jia L., Menenti M. et al., Calibration and validation of SWAT model by using hydrological remote sensing observables in the Lake Chad Basin, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, Iss. 6, Article 1511, DOI: 10.3390/RS14061511.
44. Brown C. F., Brumby S. P., Guzder-Williams B. et al., Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping, *Scientific Data*, 2022, V. 9, Article 251, DOI: 10.1038/s41597-022-01307-4.
45. Bugaets A., Gartsman B., Gelfan A. et al., The integrated system of hydrological forecasting in the Ussuri River basin based on the ECOMAG model, *Geosciences*, 2018, V. 8, No. 1, Article 5, DOI: 10.3390/geosciences8010005.
46. Chen Q., Yu R., Hao Y. et al., A new method for mapping aquatic vegetation especially underwater vegetation in Lake Ulansuhai using GF-1 satellite data, *Remote Sensing*, 2018, V. 10, Iss. 8, Article 1279, DOI: 10.3390/rs10081279.
47. Dong C., Remote sensing, hydrological modeling and in situ observations in snow cover research: A review, *J. Hydrology*, 2018, V. 561, pp. 573–583, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.04.027.
48. Jonas T., Marty C., Magnusson J., Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the Swiss Alps, *J. Hydrology*, 2009, V. 378, pp. 161–167, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.09.021.
49. Motovilov Yu. G., Gottschalk L., Engeland K., Belokurov A., *ECOMAG — Regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region*, Oslo: Department of Geophysics, University of Oslo, 1999, 88 p.
50. Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. S., High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes, *Nature*, 2016, V. 540, No. 7633, pp. 418–422, DOI: 10.1038/nature20584.
51. Shadmehri Toosi A., Batelaan O., Shanafield M., Guan H., Land use-land cover and hydrological modeling: A review, *WIREs Water*, 2025, V. 12, Iss. 2, Article e70013, DOI: 10.1002/WAT2.70013.
52. Watkins M. M., Wiese D. N., Yuan D. N. et al., Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, V. 120, No. 4, pp. 2648–2671, DOI: 10.1002/2014JB011547.
53. Zakharova E., Agafonova S., Duguay C. et al., River ice phenology and thickness from satellite altimetry: potential for ice bridge road operation and climate studies, *The Cryosphere*, 2021, V. 15, Iss. 12, pp. 5387–5407, DOI: 10.5194/tc-15-5387-2021.