

Система «Вега-Science»: особенности построения, основные возможности и опыт использования

Е. А. Лупян, А. А. Прошин, М. А. Бурцев, А. В. Кашницкий, И. В. Балашов,
С. А. Баргалева, А. А. Бриль, В. А. Егоров, В. О. Жарко, А. М. Константинова,
Д. А. Кобеца, А. А. Мазуров, В. В. Марченков, А. М. Матвеев, Т. С. Миклашевич,
Д. Е. Плотников, М. В. Радченко, Ф. В. Стыщенко, И. Г. Сычугов,
В. А. Толпин, И. А. Уваров, С. А. Хвостиков, Т. С. Ховратович

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: evgeny@smis.iki.rssi.ru*

Статья посвящена описанию системы «Вега-Science», предназначенной для обеспечения работы с данными сверхбольших распределённых архивов Центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных Института космических исследований РАН (ЦКП «ИКИ-Мониторинг», <http://ckp.geosmis.ru/>). Система была создана в 2012 г., в настоящее время её пользователями являются более ста научных и образовательных организаций. С её использованием выполнено и ведётся более 70 различных российских и международных проектов, по результатам которых уже вышло более 600 публикаций. В статье рассматривается актуальность задачи обеспечения доступа к сверхбольшим распределённым архивам спутниковых данных и её решение на основе новых технологий, разработанных ИКИ РАН. Представлено, как эти технологии реализованы в ЦКП «ИКИ-Мониторинг», в том числе для предоставления распределённым коллективам пользователей возможности интерактивного анализа и обработки данных на базе централизованных вычислительных ресурсов центра ЦКП «ИКИ-Мониторинг». В статье также описывается общая архитектура построения системы «Вега-Science». Особое внимание уделяется описанию современных подходов к организации работы со спутниковыми данными, развитие которых во многом стимулировалось научными и прикладными проектами, выполняющимися с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Кратко описываются основные возможности системы «Вега-Science», при этом акцент делается на интерактивные инструменты для анализа и обработки данных и примеры их использования. В статье также представлена информация об опыте использования системы «Вега-Science» при решении различных научных и прикладных задач, накопленном за 10 лет её работы, и приведены основные планируемые направления её развития в ближайшие годы.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, спутниковые данные, информационная система, система коллективного пользования, сверхбольшие массивы данных, архивы спутниковых данных, доступ к спутниковым данным

Одобрена к печати: 16.12.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31

Введение

Данные спутниковых систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в настоящее время практически незаменимы при решении широкого спектра различных задач, связанных с мониторингом природной среды и антропогенных факторов. Это стало возможным благодаря стремительному развитию спутниковых систем ДЗЗ в последние десятилетия, которое сопровождалось практически экспоненциальным ростом числа действующих космических аппаратов (КА), существенным повышением качества и разнообразия получаемых с них данных, а также появлением множества новых и более эффективных методов обработки таких данных (Лупян и др., 2018). В свою очередь, это привело к резкому увеличению объёмов информации, используемой специалистами для решения реальных задач, и к такому же стремительному росту требований к необходимым для этого вычислительным ресурсам. В результате традиционный подход к использованию спутниковых данных, в рамках которого специалисты получали интересующие их наборы данных из центров распространения спутниковой информации,

а затем хранили и обрабатывали их на базе локальной инфраструктуры, во многих случаях оказывается крайне затратным и часто практически нереализуемым. Поэтому возникла необходимость в создании новых подходов к работе со спутниковой информацией, которые позволили бы не только предоставить доступ к данным сверхбольших архивов ДЗЗ, но и обеспечить их анализ и обработку с использованием централизованных вычислительных ресурсов (Лупян и др., 2015а, 2018; Wang et al., 2018). В настоящее время можно выделить два основных направления развития таких подходов.

В рамках первого направления пользователям предоставляются услуги виртуального хостинга, позволяющего создавать и выполнять процедуры обработки спутниковой информации, используя данные сверхбольших архивов ДЗЗ. По сути, пользователи могут арендовать вычислительные ресурсы с требуемыми характеристиками, на которых можно размещать собственное программное обеспечение (ПО) обработки и анализа данных или обращаться к уже предустановленному ПО. Лидером среди систем такого типа выступает созданная компанией Google в 2013 г. система Earth Engine (<https://earthengine.google.com/>) (Gorelick et al., 2017). С использованием синхронизированной распределённой модели вычислений Earth Engine может проводить запрограммированную пользователем обработку больших объёмов геопространственных данных на вычислительных ресурсах Google. К системам, построенным на базе такого подхода, можно также отнести сервисы Mundi Web Services (<https://mundiweb-services.com/>) и ONDA-DIAS (<https://www.onda-dias.eu/cms/>). Важным преимуществом подходов, развивающихся в данном направлении, становится их гибкость, однако при этом они требуют от исследователей компетенций в области написания программного кода для анализа и обработки данных ДЗЗ, а в некоторых случаях — и навыков администрирования виртуальных хостов.

В рамках второго направления пользователям предоставляется инструментарий, заменяющий настольные приложения анализа пространственных данных, в первую очередь спутниковых, который обеспечивает возможность распределённой работы как с архивами данных крупных центров, так и с вычислительными ресурсами, которые они предоставляют для проведения анализа и обработки данных. По сути, пользователям предоставляются веб-интерфейсы работы с данными — так называемые веб-ГИС (геоинформационные системы). На основе подобных подходов в настоящее время реализуются различные системы, в частности сервис EO Browser (<https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser/>). Хотя такие системы несколько ограничивают возможности пользователей по созданию нестандартных и новых методов обработки данных, они позволяют широкому кругу специалистов легко использовать процедуры доступа к сверхбольшим архивам спутниковых данных ДЗЗ, проведения их анализа и обработки, реализованные в системах. Именно в рамках такого подхода в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) уже на протяжении более 20 лет разрабатываются информационные системы доступа к спутниковым данным, предназначенные для решения различных исследовательских и прикладных задач.

В 2012 г. на основе созданных в ИКИ РАН технологий работы со спутниковыми данными был создан Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа данных спутниковых наблюдений, предназначенный для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды, — ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015б, 2019). Для обеспечения доступа научных коллективов и проектов к спутниковым данным и их анализа в его составе была реализована специализированная система «Вега-Science» (<http://sci-vega.ru/>) (Барталев и др., 2012; Толпин и др., 2014). В этом же году система «Вега-Science» была зарегистрирована как уникальная научная установка (УНУ «BS ИКИ-Мониторинг»). Система обеспечивает интерактивную работу со сверхбольшими архивами ЦКП «ИКИ-Мониторинг» и представляет пользователям широкий набор картографических и аналитических веб-интерфейсов и инструментов, позволяющих проводить сложные операции по обработке и анализу больших объёмов данных с использованием вычислительных ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг». «Вега-Science» даёт возможность в полной мере использовать весь потенциал инфраструктуры ЦКП «ИКИ-Мониторинг» и предоставляемые центром сверхбольшие архивы спутниковых данных и результатов их обработки для решения различных научных

и прикладных задач. Во многих случаях это позволяет полностью избежать необходимости создания специальной высокопроизводительной инфраструктуры работы с данными для выполнения отдельных научных проектов.

В настоящее время по возможностям интерактивной распределённой обработки и анализа спутниковых данных система «Вега-Science» не имеет аналогов в России и сопоставима с лучшими зарубежными аналогами, а по некоторым функциям даже превосходит их. На текущий момент возможностями этой уникальной научной установки и информационных систем, построенных на её основе, пользуется уже более 100 различных научных и образовательных организаций.

Настоящая статья посвящена описанию особенностей построения системы «Вега-Science», её основных возможностей и опыта использования при решении различных научных и прикладных задач. В первом разделе рассматривается общая архитектура построения системы, а также кратко описываются наиболее значимые технологии, использованные при её создании. Во втором разделе описываются основные возможности системы «Вега-Science», а третий посвящён опыту использования системы «Вега-Science» при решении различных научных и прикладных задач. Далее в статье рассматриваются перспективы развития системы «Вега-Science» и подводятся промежуточные итоги её использования на протяжении последних 10 лет.

Архитектура построения системы «Вега-Science»

Как уже отмечалось выше, система «Вега-Science» входит в состав ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015б, 2019; Прошин и др., 2016; Толпин и др., 2011б) и является основным инструментом для работы с данными сверхбольших распределённых архивов центра.



Рис. 1. Принципиальная схема функционирования системы «Вега-Science» в составе ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

Принципиальная схема функционирования системы в составе ЦКП приведена на *рис. 1* (см. с. 11). На схеме представлены основные источники данных, главные среди которых — распределённые архивы данных ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Реализованные в рамках ЦКП программные шлюзы позволяют использовать в работе системы данные из внешних источников. По такой схеме в системе доступны данные российских спутниковых систем, содержащиеся в архивах геопортала Роскосмоса (<http://gptl.ru/>), и данные спутников серии Landsat, хранящиеся в архивах Google Cloud Storage. Также на схеме представлены основные сервисы для доступа к данным, используемым в работе системы «Вега-Science». К ним относятся сервисы для запроса метаданных, позволяющие получать всю необходимую информацию об имеющихся в архивах данных, сервисы получения требуемых данных из архивов, а также сервисы проведения интерактивной обработки спутниковых данных. В нижней части схемы представлена непосредственно система «Вега-Science», для которой указаны основные варианты работы с данными, описанные выше. На основе возможностей, предоставляемых ЦКП «ИКИ-Мониторинг», и программных решений, разработанных при построении системы «Вега-Science», в настоящее время реализован целый ряд специализированных информационных систем, предназначенных для решения различных научных и прикладных задач.

Как и ЦКП «ИКИ-Мониторинг», система «Вега-Science» построена на основе технологий и программного обеспечения, разрабатываемых в отделе технологии спутникового мониторинга ИКИ РАН (<http://smiswww.iki.rssi.ru/>). Ниже кратко описаны технологии, которые непосредственно используются в реализации системы «Вега-Science».

Технология UNISAT

Для ведения сверхбольших распределённых архивов разнородных спутниковых данных ЦКП «ИКИ-Мониторинг» используется разработанная в ИКИ РАН технология UNISAT (Прошин и др., 2016). Она позволяет однотипно реализовать работу с самыми разными типами спутниковых данных, отличающихся как пространственным разрешением, так и схемой организации хранения данных. Одним из основных преимуществ используемой технологии является реализация механизма «виртуальных информационных продуктов», т.е. продуктов, которые динамически, в режиме реального времени формируются по запросу пользователя на основе имеющейся в архиве информации. Использование «виртуальных» информационных продуктов позволяет радикально уменьшить объёмы хранимых в архивах данных и оперативно предоставлять доступ к новым информационным продуктам без проведения ресурсоёмкой обработки больших объёмов исходных данных. Не менее важным достоинством вышеупомянутой технологии стала поддержка инструментов для удалённого анализа и обработки данных как в режиме реального времени, так и в асинхронном режиме. Схема хранения данных включает в себя ведение специализированных файловых баз данных (БД), в которых хранятся специфичные метаданные и ссылки на размещение файлов в распределённых хранилищах, а также универсальную справочную БД с описанием типов данных, правил их визуализации и построения «виртуальных» производных продуктов.

Технология динамического блочного доступа

Практика показывает, что многие задачи, связанные с обработкой и визуализацией пространственных данных, могут быть наиболее эффективно решены с использованием блочного подхода, в рамках которого данные для работы фрагментируются на тайлы, на которые равномерно разбита вся зона интереса. Такой подход позволяет обеспечить требуемую степень распараллеливания обработки на различных вычислительных узлах, реализовать гибкий механизм кэширования и снизить нагрузку на централизованные ресурсы. Наиболее распространённым вариантом реализации описываемого подхода стало использование заранее подготовленных архивов данных с фиксированным пространственным разбиением. Как правило, он реализуется в системах, обеспечивающих доступ к ограниченному числу различных типов

информации. Однако такой вариант реализации оказывается нецелесообразным, когда возникает необходимость использования разных пространственных разбиений для одних и тех же данных, в частности когда необходимо совместно обрабатывать различные типы спутниковой информации, различающиеся как по разрешению, так и по организации их хранения в архиве. Подготовка и хранение большого числа различных типов данных в разных разбиениях требует неоправданно высоких затрат на их обработку и хранение. В этих случаях наиболее эффективным оказывается динамическое формирование блоков данных в таком пространственном разбиении и с такими характеристиками, которые будут оптимальны для решения конкретной задачи по обработке или визуализации данных. С целью реализации такого механизма в ИКИ РАН была разработана технология динамического блочного доступа к архивам спутниковых данных ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Прошин и др., 2020).

Технология GeoSMIS

Интерфейсы и сервисы системы «Вега-Science» были созданы на базе технологии GeoSMIS (Толпин и др., 2011б). Технология предназначена для создания комплексов, обеспечивающих работу пользователей с уникальным сочетанием возможностей по анализу информации и объёмов сверхбольших архивов спутниковых данных и результатов их обработки. Реализуемый на базе этой технологии картографический веб-интерфейс по структуре и организации схож с интерфейсами настольных приложений и включает в себя базовую область отображения данных, элементы навигации по карте, а также набор вкладок управления данными. Двухуровневая система вкладок позволяет пользователю выбрать интересующий его тип данных или операцию по их обработке и анализу. Пример такого картографического веб-интерфейса приведён на *рис. 2*.

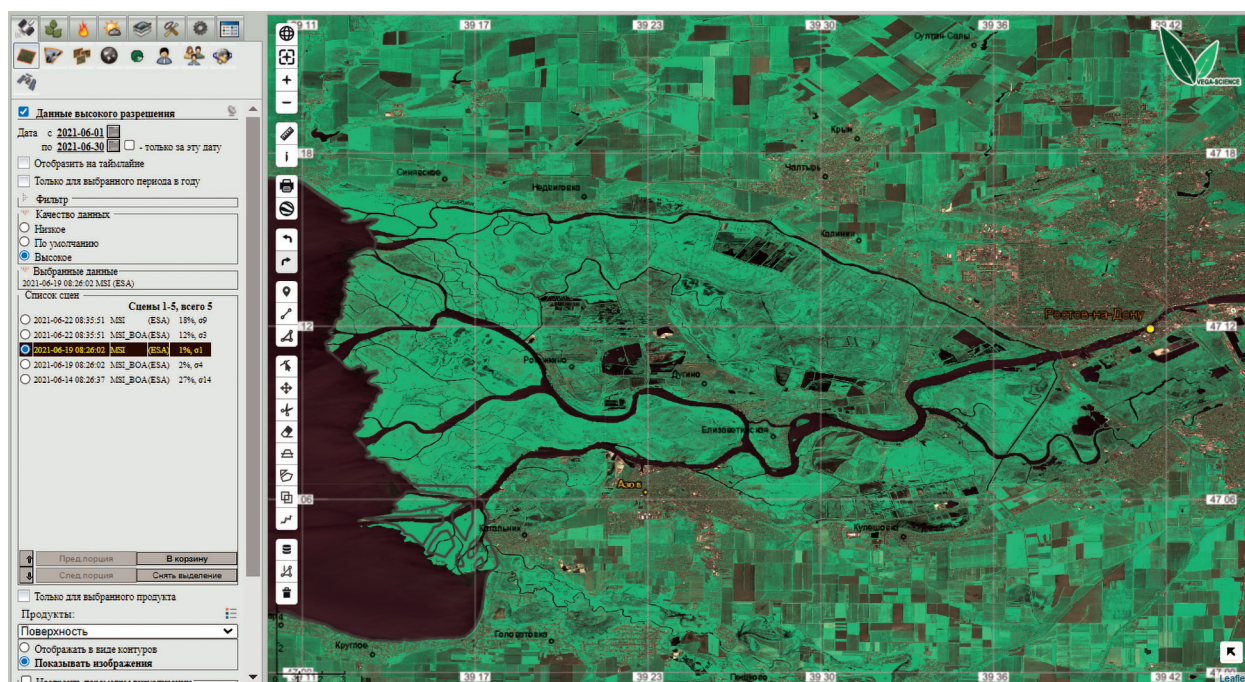


Рис. 2. Пример картографического веб-интерфейса, построенного по технологии GeoSMIS

Работы по созданию технологии GeoSMIS была начаты в ИКИ РАН в 2010 г. для реализации унифицированного способа создания сервисов спутникового мониторинга на базе «сервисной» модели работы с данными (Лупян и др., 2011). В базовых программных блоках технологии GeoSMIS реализован как общий, типовой функционал, необходимый для обеспечения мониторинга с использованием спутниковых данных, так и средства для реализации и интеграции частных тематических задач и алгоритмов. Ключевыми преимуществами использования

GeoSMIS стали высокая скорость и низкий уровень трудозатрат при создании и развёртывании новых информационных сервисов. Кроме этого, интеграция GeoSMIS с технологиями ведения и обеспечения доступа к сверхбольшим распределённым архивам спутниковых данных UNISAT, разработки интерактивных инструментов для анализа и обработки спутниковых данных GeoProcSMIS и рядом других технологий позволяет обеспечить создаваемые сервисы практически неограниченным набором данных и инструментов анализа без переобработки данных в архивах и выделения отдельных мощностей для их хранения.

Технология GeoSMIS включает в себя элементы двух основных уровней архитектуры (Толпин и др., 2011а): базовый картографический веб-интерфейс, обеспечивающий пользователя широким набором инструментов для работы с данными, и расширяемый картографический веб-сервис smiswms, работающий непосредственно с данными и предоставляющий веб-интерфейсам необходимые информационные продукты и сервисы.

Опишем более подробно сервис smiswms, который обеспечивает все операции по доступу к данным, содержащимся как в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг», так и в сторонних источниках. Он предназначен для запроса метаданных, описывающих экземпляры данных, получения соответствующих им растровых карт, а также для проведения операций, связанных с управлением данными. При создании сервиса за основу был взят стандарт OGC (*англ.* Open Geospatial Consortium) WMS (*англ.* Web Map Service) (<http://www.opengeospatial.org/standards/wms>), расширенный и дополненный для того, чтобы удовлетворять запросам существующих веб-интерфейсов и специфике формирования карт. В то же время полностью поддержан базовый формат запроса карт WMS getMap для обеспечения совместимости со сторонними приложениями. Запросы на получение метаданных и управления данными также были созданы с учётом структурных особенностей стандартов OGC (<http://www.opengeospatial.org/standards>) с ориентацией на прикладные варианты использования. В частности, запрос метаданных может предоставлять результаты в формате JSON (*англ.* JavaScript Object Notation), поддерживает управление размерами порций выдаваемой информации и работу со специфичными для различных данных фильтрами. В настоящее время сервис smiswms поддерживает следующие основные типы запросов:

- запросы на получение растровых карт (GetMap);
- запросы на получение информации об объектах на карте (GetFeatureInfo);
- запросы на поиск и получение метаданных с использованием большого числа различных критериев (GetMetadata).

Структурно-функциональная схема сервиса smiswms представлена на *рис. 3* (см. с. 15). Ключевой элемент реализации сервиса smiswms — система плагинов, каждый из которых отвечает за работу с тем или иным типом информации. Все реализованные плагины разработаны на основе базовых модулей-классов и взаимодействуют с ядром сервиса по стандартизованному протоколу. Благодаря этому достигается высокая степень гибкости и масштабируемости сервиса, так как для добавления в систему новых типов информации (необязательно спутниковых данных) достаточно разработать соответствующий плагин по стандартной схеме.

За прошедшее с момента создания технологии GeoSMIS время значительно изменились представления пользователей о комфортной работе с картографическими данными. Кроме этого, возросли требования по максимальному количеству пользователей, одновременно работающих с аналитическими возможностями системы. Для поддержки таких требований без ущерба функционалу и возможностям систем блоки технологии GeoSMIS подвергаются постоянной модернизации на всех уровнях архитектуры.

В 2020 г. были начаты работы по использованию динамического блочного доступа для реализации работы со спутниковыми и другими изображениями в картографическом веб-интерфейсе системы «Вега-Science» по тайловой схеме. В рамках этого варианта доступа реализуется асинхронный запрос требуемого изображения небольшими фрагментами (по умолчанию 256×256 пикселей) с использованием стандартных пространственных разбиений для разных масштабов.

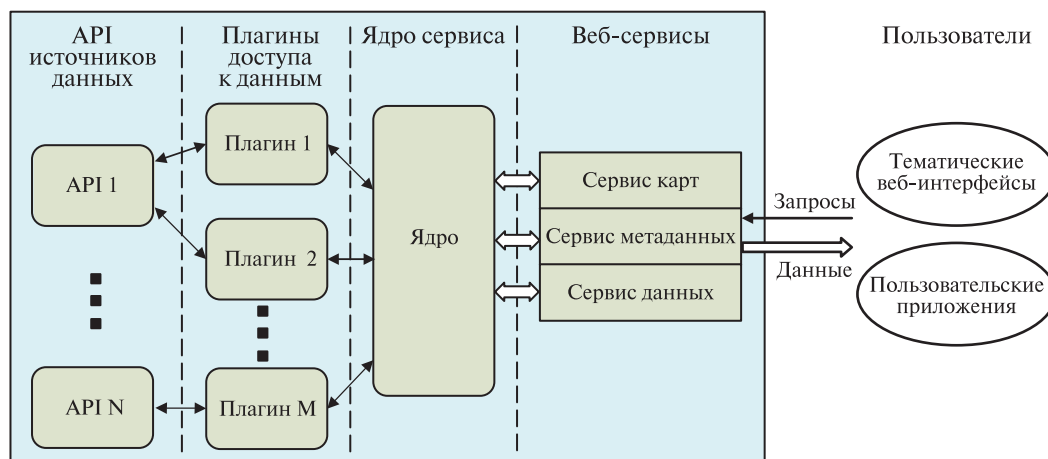


Рис. 3. Структурно-функциональная схема веб-сервиса smiswms

Такой подход к предоставлению изображений в настоящее время применяется в большинстве систем визуализации пространственных данных, так как благодаря эффективному кэшированию отдельных тайлов изображения достигается более комфортный для пользователя режим работы с пространственной информацией. Однако, как правило, для его реализации используется предварительно сформированный набор тайлов, соответствующих ограниченному набору различных информационных продуктов.

В рамках системы «Вега-Science» решается задача предоставления доступа к широкому спектру информационных продуктов, причём с возможностью использования различных картографических проекций. Такая высокая вариативность достигается благодаря использованию динамического формирования требуемых информационных продуктов на базе имеющихся в архиве базовых продуктов. Поэтому вариант с предварительной подготовкой всех вариантов информационных продуктов в виде тайлов оказывается неприемлемым как с точки зрения требуемых ресурсов хранения, так и по причине больших вычислительных затрат на подготовку тайлов. Для того чтобы сохранить имеющийся в системе «Вега-Science» функционал, но при этом обеспечить более комфортный для пользователя тайловый вариант доступа к изображениям в интерфейсе, было решено использовать разработанную в ИКИ РАН технологию динамического блочного доступа. На основе макетирования различных вариантов нового интерфейса было также решено использовать открытую библиотеку leaflet.js (<https://leafletjs.com/>), которая обладает большим набором дополнительных плагинов и легко наследуемых и расширяемых компонент.

В 2021 г. обновлённый тайловый веб-интерфейс, базирующийся на механизме динамического блочного доступа к данным, был успешно внедрён в систему «Вега-Science», а также в ряд других систем, построенных на её основе (Константинова и др., 2020). Необходимо отметить, что в рамках созданной системы кэширование тайлов изображений реализуется не только в браузере пользователя, но и на специализированном сервере тайлового кэша, используемого в рамках подсистемы подготовки изображений, что позволяет существенно повысить максимальное число пользователей, которые могут одновременно работать с пересекающимися наборами данных.

Технология создания интерактивных инструментов для анализа и обработки спутниковых данных ProcGeoSMIS

Технология ProcGeoSMIS предназначена для реализации широкого спектра различных инструментов для анализа и обработки спутниковых данных как в синхронном, так и асинхронном режимах. Технология имеет модульную архитектуру и включает в себя следующие основные функциональные блоки:

- *интерфейсная часть* отвечает за взаимодействие с пользователями и позволяет выбрать необходимые данные, задать требуемые параметры обработки, выполнить её и приступить к анализу полученных результатов;
- *блок хранения заданий и результатов*, как следует из названия, отвечает за ведение информации обо всех инициированных пользователями операциях обработки данных, их текущего статуса, а также хранение полученных результатов;
- *блок работы с заданиями* отвечает непосредственно за проведение всех реализованных в системе процедур обработки данных, что достигается благодаря использованию расширяемого набора специализированных плагинов. Ключевым его элементом становится менеджер заданий, отвечающий за загрузку исходных данных, выполнение процедур обработки и возврат их результатов;
- *блок подготовки данных для обработки* обеспечивает формирование требуемого для проведения конкретной обработки набора спутниковых изображений с заданными характеристиками на основе имеющихся в архивах исходных данных.

Практически все блоки представляют собой набор специализированных плагинов, построенных по единой архитектуре. Такой подход позволяет быстро и однотипно расширять набор возможных операций по обработке данных, в том числе с использованием внешних вычислительных средств и программного обеспечения. Подробное описание этой технологии содержится в работе (Кашницкий и др., 2015а).

Основные возможности системы «Вега-Science»

Общие сведения

Система «Вега-Science» представляет собой комплексное веб-приложение, предоставляющее функционал настольных ГИС и аналитических систем, совмещённый с прямым доступом к сверхбольшим архивам данных ДЗЗ.

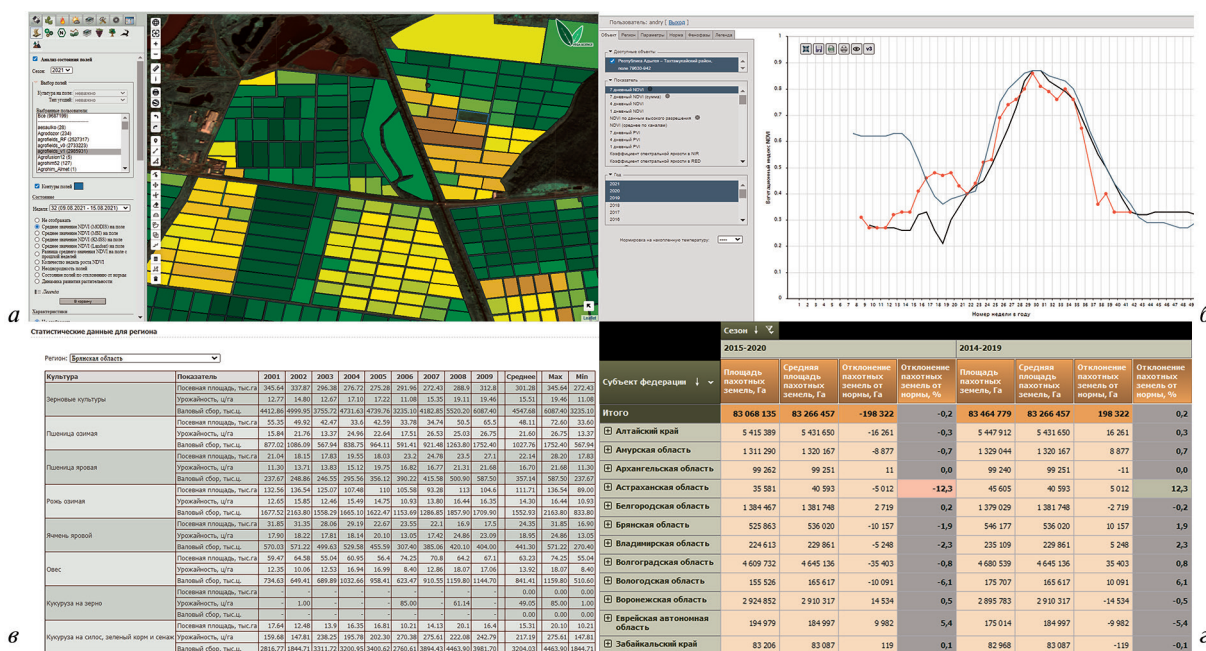


Рис. 4. Примеры использования разных типов интерфейса для задач мониторинга сельскохозяйственных полей: а — карта полей с цветовой индикацией усреднённого индекса NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) за выбранную неделю года; б — графики хода индекса NDVI для выбранного поля за три последних года; в — статистика по площадям и урожайности различных культур для выбранного региона РФ; г — интерактивная форма для получения площадей пахотных земель по разным регионам РФ

В рамках системы рабочим инструментом пользователя, благодаря которому ему доступны многочисленные возможности доступа, обработки и анализа данных, выступает набор многофункциональных веб-интерфейсов. Основной из них — картографический интерфейс, обеспечивающий поиск, просмотр, анализ и интерактивную обработку выбранных экземпляров данных. Кроме того, в системе «Вега-Science» реализованы: многофункциональный интерфейс для анализа временных рядов данных в виде графиков, подсистема для получения различных форм отчётности и бюллетеней, а также интерфейс для анализа больших объёмов многомерных данных на основе интерактивных отчётных форм, построенных по BI-технологии (*англ.* Business Intelligence) (Кобец и др., 2015, 2016). Примеры использования перечисленных типов интерфейсов применительно к задачам мониторинга сельскохозяйственных полей приведены на *рис. 4* (см. с. 16).

Как уже было отмечено выше, система «Вега-Science» — основной инструмент для работы с данными сверхбольших архивов ЦКП «ИКИ-Мониторинг», поэтому для описания её функционала ниже сначала приводится информация о наполнении архивов центра. Далее описываются основные возможности по работе с данными, реализованные в текущий момент в системе, а затем — примеры их использования для решения задач, требующих массового проведения операций обработки и анализа данных.

Архивы ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

В настоящее время архивы центра содержат данные более 40 различных приборов наблюдения, установленных более чем на 50 отечественных и зарубежных спутниках дистанционного зондирования Земли. Суммарный объём доступных пользователям данных превышает 5 Пбайт, а в сутки в архивы поступает более 3 Тбайт новых данных.

Благодаря сотрудничеству ИКИ РАН и Научно-исследовательского центра «Планета» (НИЦ «Планета») (Бурцев и др., 2019) пользователи центра имеют возможность работы с глобальными покрытиями данных, получаемыми с российских систем наблюдения. В частности, у пользователей есть доступ к данным отечественных спутников дистанционного зондирования Земли серий «Канопус-В», «Ресурс-П», «Метеор-М», «Электро-Л» и «Арктика-М». Архивы в основном содержат информацию по территории России и сопредельных государств, но области покрытия некоторыми из типов данных, как, например, КА серий Landsat (<https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat>) и Sentinel (<https://sentinels.copernicus.eu/веб/sentinel/home>), составляют до 30 % всей площади поверхности Земли. Существенно, что в архивах центра накоплены достаточно длинные ряды данных. Например, архивы данных Landsat начинаются с марта 1984 г. Актуальная информация о наличии данных в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» и объединённой системы работы с данными НИЦ «Планета» доступна на информационном сервере центра в разделе «Архивы данных» (<http://ckp.geosmis.ru/default.aspx?page=6>).

Кроме спутниковых данных и продуктов их обработки, в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» содержатся и другие типы информации, используемые при решении задач мониторинга окружающей среды. Основные виды таких данных описаны ниже.

Задачи мониторинга и исследования растительного покрова и наземных экосистем невозможно решать без соответствующих карт. В системе «Вега-Science» доступны ежегодно обновляющиеся карты растительного покрова по территории России, карты покрытых лесом земель, а также карты сельскохозяйственных земель, в том числе обрабатываемых земель, озимых, яровых и пара. Эти карты создаются на основе долговременных рядов спутниковых данных с использованием максимально автоматизированных технологий картографирования растительного покрова, разработанных в ИКИ РАН (Барталев и др., 2016).

Важную роль в исследовании состояния растительного покрова играет информация о природных пожарах и их последствиях. Архивы ЦКП «ИКИ-Мониторинг» содержат данные о термальных аномалиях, детектированных по информации с целого ряда различных спутниковых приборов. Основу этого набора данных составляет информация низкого и среднего пространственного разрешения (375–1000 м) в спектральном диапазоне 3,7–3,9 мкм,

полученная с приборов MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (спутники Terra, Aqua) и VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) (спутники Suomi NPP (*англ.* National Polar-orbiting Partnership) и NOAA20 (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration)). Для работы с такими данными разработаны и внедрены в действующие информационные системы полностью автоматические технологии обработки, обеспечивающие не только детектирование горения на отдельных сеансах наблюдения, но и временное отслеживание развития пожаров и анализ их особенностей (в том числе контроль типов территорий, на которых они развиваются) (Лупян и др., 2021а). Кроме того, для получения более детальной информации о пожарах и их последствиях, в том числе для уточнения и детального картографирования площадей, пройденных огнём, используются данные более высокого пространственного разрешения (10–30 м) в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах, получаемые со спутников серий Landsat и Sentinel-2.

В рамках ЦКП «ИКИ-Мониторинг» также ведутся архивы метеорологической информации, в которые поступают прогнозные и ретроспективные данные из различных источников, значительно различающиеся по набору доступных показателей (измеряется десятками), временному разрешению (от трёх часов до суток) и пространственной локализации (по точкам расположения метеостанций либо по узлам регулярной сетки). Основным источником данных становятся данные модели Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) NCEP (*англ.* National Centers for Environmental Prediction, Национальный центр экологических прогнозов, <https://ncep.noaa.gov>), получаемые из Национального центра атмосферных исследований США (*англ.* National Center for Atmospheric Research — NCAR, <https://ncar.ucar.edu>). Пространственное разрешение данных составляет $0,25^\circ$, временной шаг — 3 ч. В архивах ИКИ РАН хранятся более двух десятков показателей состояния атмосферы у поверхности Земли, а также вертикальные профили температуры на различных изобарических поверхностях.

Архивы ЦКП также содержат большое количество картографических слоёв, отражающих границы различных территориальных делений, населённые пункты, границы водных объектов, дороги и другую справочную информацию. Наиболее детальная информация доступна по территории России, но также присутствуют данные и на весь мир.

Возможности работы с данными

В настоящее время система «Вега-Science» обеспечивает целый ряд различных сценариев работы с данными, в том числе:

- поиск данных и просмотр, анализ и интерактивная обработка данных в картографическом интерфейсе;
- анализ временных рядов разнородных данных и различных интегральных показателей с использованием графиков, регулярных форм отчётности и бюллетеней по заданным параметрам;
- анализ больших объёмов многомерных данных на основе VI-технологий.

Важное преимущество системы «Вега-Science» состоит в широком спектре реализованных в ней инструментов для интерактивного анализа и обработки прежде всего спутниковых данных с использованием различных веб-интерфейсов. Подробное описание реализованных в системе «Вега-Science» инструментов работы с данными содержится в публикации (Лупян и др., 2019), поэтому ниже представлены только их основные возможности:

- многокритериальный поиск и выбор различных спутниковых данных;
- просмотр и получение различных характеристик изображений и объектов на них;
- построение графиков для анализа временных, пространственных и спектральных рядов данных, включая вычисляемые индексы по объектам, вертикальные профили метеоданных, а также профили вдоль произвольно заданных маршрутов;
- анализ, обработка и получение производных данных в синхронном и асинхронном режимах;

- мониторинг объектов, в частности сельскохозяйственных полей, территорий, подвергающихся антропогенному воздействию, объектов лесопользования и др.;
- моделирование различных процессов, например динамики развития пожаров;
- подготовка презентационных веб-интерфейсов для иллюстрации различных явлений и процессов, позволяющих представить ограниченный набор необходимых данных из системы в удобном для широкой публики виде;
- анализ больших объёмов многомерных данных в виде динамических отчётных форм, гистограмм, графиков и карт, построенных на базе VI-технологий.

Использование возможностей системы «Вега-Science» для задач, требующих массовой обработки данных

Сочетание возможности прямого доступа к сверхбольшим распределённым архивам и наличия мощного инструментария интерактивной работы с данными, построенных на современных веб-технологиях, позволило применять систему «Вега-Science» для решения широкого спектра задач, требующих сложной тематической обработки данных и анализа длинных временных рядов. Имеющиеся в системе инструменты реализуют большое количество различных типов и алгоритмов обработки как общего назначения (обучаемая и необучаемая классификация, сегментация, получение статистики по заданным пользователем объектам, гистограммный анализ и кросс-калибровка данных и т. д.), так и специфических, как, например, определение вырубок в лесах. На базе этих инструментов пользователь может реализовывать сложные процессы обработки и анализа данных, в том числе многоступенчатые, с сохранением промежуточных и итоговых результатов непосредственно в системе. Кроме того, модульная структура системы позволяет достаточно просто интегрировать в неё новые специфические инструменты, как правило появляющиеся под конкретную задачу или проект.

Среди реализованных в системе «Вега-Science» инструментов особую роль играют те из них, которые предназначены для проведения массовых операций по обработке и анализу данных, так как эффективная их реализация позволяет кардинально снизить время и трудоёмкость соответствующих операций. Ниже приводятся примеры ряда задач, для которых используются такие инструменты.

Автоматизированное картографирование гарей по данным высокого разрешения

Задача оценки площадей, пройденных лесными пожарами, по данным ДЗЗ остаётся постоянно актуальной в свете как традиционных проблем лесного хозяйства, так и приобретающих всё большую актуальность задач контроля выбросов углерода и связанных с ними климатических изменений. Так как большинство автоматических методов оценки таких площадей используют данные низкого и среднего пространственного разрешения, уточнение результатов их работы по данным высокого разрешения становится необходимым, причём как для актуализации информации, так и для улучшения алгоритмов детектирования. Традиционно такое уточнение включает в себя подбор изображения с гарью, его визуальный анализ и ручное оконтуривание гари, что очень трудоёмко, особенно с учётом того, что за год такая операция производится для многих тысяч очагов возгорания. Для оптимизации этой процедуры был реализован автоматизированный инструмент на базе алгоритмов машинного обучения. Инструмент обеспечивает автоматизированный подбор изображений высокого разрешения по областям, пройденным огнём, проведение автоматической сегментации по заданному оператором грубому контуру гари, возможность выбора только тех классов по результатам сегментации, которые относятся к гари, и сохранения полученного уточнённого контура в системе для дальнейшего использования. Внедрение этого инструмента позволило радикально сократить время и трудоёмкость проведения уточнения для каждой гари и существенно снизить роль оператора как фактора потенциальной ошибки (Кашницкий и др., 2015б).

Автоматизированное построение границ сельскохозяйственных угодий

Как показывает многолетний опыт эксплуатации системы «Вега-Science», для решения большинства задач наблюдения за сельскохозяйственными землями и посевами, в том числе для оценки используемости земель, определения выращиваемых культур, выявления и оценки последствий чрезвычайных ситуаций на сельхозугодьях, и многих других, требуется наличие корректных векторных границ полей. Сложность этой задачи в первую очередь связана с тем, что количество таких полей исчисляется миллионами, причём их границы могут меняться год от года. Так как полностью автоматических процедур, которые позволяли бы качественно решать эту задачу, пока не существует, для определения или уточнения векторных границ полей был реализован специальный интерактивный инструмент, позволяющий существенно снизить трудоёмкость этой операции при массовом оконтуривании полей. Инструмент позволяет оператору задать точки, в окрестностях которых требуется выделить границы полей, провести автоматическую сегментацию на серии отобранных изображений и векторизацию полученного растрового результата с последующим упрощением и при необходимости ручной коррекцией итогового векторного полигона (Денисов и др., 2021). Результаты выделения границ полей сохраняются в системе для дальнейшего использования в различных задачах.

Оценка состояния сельскохозяйственных земель и посевов

Одно из и актуальных направлений использования технологий спутникового мониторинга в сельском хозяйстве — получение информации о состоянии сельскохозяйственных земель и посевов. Важными задачами здесь становятся анализ состояния сельскохозяйственных посевов и выявление различных отклонений в их развитии. В последние годы разработаны достаточно надёжные подходы, позволяющие проводить оценку состояния посевов на основе комплексного анализа спутниковой и метеорологической информации с учётом региональных особенностей их развития. В основном эти подходы базируются на анализе многолетних наблюдений динамики посевов в различных регионах, построении среднесрочных норм их развития и автоматизированном выделении отклонений характеристик состояния посевов, получаемых на основе спутниковых данных, от таких норм. Это позволяет получать достаточно однородные оценки состояния посевов на значительных территориях (например, на территории всех сельскохозяйственных земель Российской Федерации). Подробно использование таких подходов для оценки состояния озимых культур описано, например, в работе (Денисов и др., 2021). Система «Вега-Science» предоставляет фактически уникальные возможности по реализации данных подходов и использованию их для решения различных научных и образовательных задач. Эти возможности в первую очередь обеспечиваются тем, что система предоставляет возможность работы с однородными долговременными (более 20 лет) архивами спутниковых данных и результатами их обработки (например, автоматически формируемыми безоблачными композитами), на основе которых могут вычисляться различные характеристики состояния посевов. Также «Вега-Science» обеспечивает достаточно богатый набор инструментов обработки и анализа данных, позволяющих проводить как попиксельный анализ, так и анализ данных, интегрированных по различным объектам и территориям, а также рядов таких данных. В результате можно получать оценки состояния посевов как в отдельных точках, так и на отдельных полях, в районах и регионах.

Автоматизированное выявление изменений лесного покрова

Лес, безусловно, — один из самых ценных возобновляемых природных ресурсов, поэтому актуальность задачи получения объективной информации о состоянии лесов России не вызывает сомнений. С помощью доступного в системе функционала решается задача оценки изменений лесного покрова на локальном и региональном уровнях. Для этого используется инструмент обработки спутниковых данных, позволяющий в интерактивном режиме детектировать изменения лесного покрова за выбранные промежутки времени. В основе его

работы лежит использование временной серии чувствительных к изменениям растительного покрова спектральных каналов спутниковых данных за два момента времени и сравнение получаемых по ним оценок проективного покрытия древесного полога леса в пикселе (Ховратович и др., 2019). В настоящее время с помощью данного инструмента было выявлено более 38 тыс. изменений лесного покрова, произошедших с 2014 г., в том числе более 32 тыс. объектов вырубки леса.

Автоматизированный мониторинг различных объектов

Как показывает опыт использования спутниковых данных в научных и прикладных проектах, существует значительное число задач, в которых представляет интерес не только анализ данных в отдельных точках получаемых спутниковых изображений, но и проведение анализа спутниковой информации, интегрированной в рамках отдельных участков (объектов). Такие задачи, например, достаточно часто возникают в случаях, когда необходимо проанализировать динамику отдельных объектов. Для решения подобных задач в рамках системы «Вега-Science» был разработан специальный («объектный») подход к анализу спутниковых данных и инструменты для его реализации (Константинова и др., 2021). Основная идея такого подхода заключается в том, что спутниковая информация обрабатывается, хранится и анализируется не для отдельных точек (пикселей), а интегрируется на отдельные области (объекты). При этом интеграция информации (расчёт различных характеристик для конкретного объекта) по заданным наборам данных (как историческим, так и оперативно поступающим в систему) осуществляется полностью автоматически. Подобный подход в том числе позволяет значительно повысить эффективность обработки и хранения данных, сосредоточившись на проведении анализа существенно «сжатых» данных. Реализованные в «Вега-Science» инструменты, воплощающие данный подход, используются в различных научных проектах. Среди таковых нужно отметить проекты анализа влияния крупных промышленных предприятий и городов на окружающую среду (Лупян и др., 2020, 2021б), анализ районов вулканической активности Камчатки и Курил, разработку подходов к дистанционному мониторингу состояния рек бассейна Амударьи (Mukhamedzhanov et al., 2020).

Опыт использования системы «Вега-Science» для решения научных задач и реализации исследовательских проектов

В настоящее время система «Вега-Science» достаточно широко используется для решения различных научных и прикладных задач. В рамках ЦКП «ИКИ-Мониторинг» пользователями системы сегодня (на конец ноября 2021 г.) являются более 100 научных и образовательных организаций. Система применялась для реализации более 70 различных российских и международных проектов, по результатам которых было подготовлено более 600 публикаций. Особо следует отметить, что система обеспечила возможность работы со сверхбольшими архивами спутниковых данных не только для крупных научных и образовательных организаций, но и для небольших, в том числе распределённых команд исследователей. При этом система используется для реализации проектов в различных областях, связанных в том числе с исследованием океана и водных объектов, атмосферы, наземных экосистем, опасных природных явлений, изучением и контролем экологической обстановки и т. д.

Для демонстрации разнообразия задач, при решении которых в настоящее время используется система «Вега-Science», в данном разделе приведено несколько примеров различных научных направлений и проектов, активно применяющих её возможности. Более полный список проектов, для выполнения которых использовалась система, можно найти по ссылке <http://ckp.geosmis.ru/default.aspx?page=5>.

Комплексный проект «Разработка методов и технологий спутникового мониторинга для научных исследований глобальных изменений и обеспечения безопасности». Выполняется ИКИ РАН при поддержке Министерства образования и науки РФ (тема «Мониторинг», госрегистрация

№ 01.20.0.2.00164). Проект посвящён разработке научных основ, подходов и технологий спутникового мониторинга для планеты Земля, а также исследованию различных процессов, происходящих на нашей планете, с помощью современных методов дистанционного зондирования. В рамках проекта ведутся исследования:

- по созданию и развитию методов, технологий и систем работы с данными дистанционных (спутниковых) наблюдений Земли для решения научных и прикладных задач;
- разработке и совершенствованию методов дистанционного мониторинга наземных экосистем и их использованию для исследования различных процессов, происходящих в биосфере;
- разработке и совершенствованию методов дистанционного мониторинга для изучения и контроля различных климатических процессов и опасных природных явлений;
- разработке и совершенствованию методов дистанционного мониторинга для изучения и контроля природных и антропогенных процессов, происходящих в океане и различных водных объектах, в том числе их экологического состояния;
- разработке и совершенствованию методов дистанционного мониторинга для изучения и контроля для исследования атмосферы, её взаимодействия с океаном, ионосферой и магнитосферой Земли.

Одна из основных задач, стоящих в проекте, состоит в создании новых подходов и инфраструктуры работы со спутниковыми данными для решения в интересах различных научных проектов. Именно в рамках проекта был создан и в настоящее время развивается ЦКП «ИКИ-Мониторинг» и входящая в него уникальная научная установка (система) «Вега-Science». Сегодня система — один из базовых инструментов, позволяющих решать задачи проекта в различных областях.

Серия проектов, ориентированных на исследование различных процессов, происходящих в пограничных морях России. Данные проекты выполнялись и ведутся в том числе Институтом океанологии РАН (ИО РАН) (<https://ocean.ru>), ИКИ РАН, Институтом вычислительной математики имени Г. И. Марчука (ИВМ РАН) (<https://www.inm.ras.ru>), а также при поддержке Министерства образования и науки РФ (Минобрнауки РФ), Российского научного фонда (РНФ) и Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ). В интересах данного направления на базе «Вега-Science» была создана специализированная информационная система Sea The Sea (STS) (<http://ocean.smlab.ru>). (Лаврова и др., 2019). Эта система ориентирована на работу с данными спутниковых наблюдений для решения междисциплинарных задач исследования Мирового океана. Особое внимание в системе уделяется возможностям работы с данными спутниковой радиолокации. Система позволяет проводить комплексный анализ данных различных спутниковых систем наблюдения Земли. Система призвана обеспечить специалистам, работающим в области исследования Мирового океана, возможность одновременной работы с различными видами спутниковой информации и удобный инструментарий, позволяющий проводить её комплексный анализ. Совместное использование различных спутниковых данных позволяет выполнять глубокую и качественную интерпретацию спутниковой информации и построение объективной картины сложного взаимодействия гидродинамических, метеорологических и биологических факторов. В рамках системы созданы и развиваются сервисы, ориентированные на возможность выделения и описания различных процессов и явлений в океане и атмосфере над ним (вихревые процессы, поверхностные проявления внутренних волн, течения, поверхностные загрязнения, процессы, связанные с взаимодействием океана и атмосферы, и др.), а также на ведение долговременных баз данных таких описаний. Кроме того, в системе реализованы и развиваются возможности работы с данными численного моделирования и их комплексного анализа совместно с информацией, получаемой на основе спутниковых данных.

Серия проектов, ориентированных на научный мониторинг вулканической активности Камчатки и Курил. Данные проекты выполнялись и ведутся Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ИВиС ДВО РАН) (<http://www.kscnet.ru/ivs>) при поддержке ИКИ РАН, Вычислительного центра ДВО РАН (<http://www.ccfеbras.ru>) и НИЦ «Планета» (<http://www.planeta.ru>)

planet.iitp.ru), а также Минобрнауки РФ, РНФ и РФФИ. Для решения задач проектов этого направления на базе системы «Вега-Science» была создана специализированная информационная система VolSatView (<http://volcanoes.smlab.ru>) (Гирина и др., 2019). Основная задача системы заключается в обеспечении специалистов-вулканологов возможностями работы со спутниковыми данными и различными информационными продуктами, получаемыми на основе их обработки. В систему также интегрированы различные инструменты работы с данными, реализованные в «Вега-Science», которые обеспечивают возможности не только получения спутниковой информации, но и проведения её обработки и анализа в интересах решения задач исследования и научного мониторинга вулканической активности Камчатки и Курил. Кроме того, система позволяет работать с информацией, получаемой на основе моделирования процессов распространения пепловых шлейфов, и проводить комплексный анализ их динамики с использованием данных наземных и спутниковых наблюдений.

Серия проектов по развитию методов и технологий дистанционного мониторинга состояния сельскохозяйственных земель и посевов. Такие проекты в разные годы выполнялись значительным числом российских и зарубежных организаций (<http://ckp.geosmis.ru/default.aspx?page=5>). Примером наиболее крупного международного проекта в этой области, использовавшего возможности системы «Вега-Science», безусловно, является проект SIGMA, выполнявшийся при поддержке Рамочной программы Европейской комиссии FP7. Проект был направлен на создание методов и технологий глобального мониторинга сельскохозяйственных земель и посевов в интересах проекта GEOGLAM (*англ.* Group on Earth Observations Global Agricultural Monitoring) (<http://geoglam.org>). Данные работы также поддерживались Минобрнауки РФ. В интересах этого проекта на базе возможностей системы «Вега-Science» был создан специализированный сервис VEGA-GEOGLAM (<http://vega.geoglam.ru>) (Толпин и др., 2019). Его основная задача состояла в обеспечении инструментами анализа данных дистанционных наблюдений и результатов их обработки по сети тестовых участков сети SIGMA-JECAM (*англ.* Joint Experiment for Crop Assessment and Monitoring) (<http://jecam.org/>), предназначенных для проведения исследований и разработок в области дистанционного сельскохозяйственного мониторинга. В настоящее время в этом направлении выполняются проекты в интересах как федеральных ведомств (например, Росстата), так и отдельных регионов.

Серия проектов Минобрнауки РФ по созданию новых методов и программных комплексов автоматизированной обработки спутниковых данных ДЗЗ мониторинга лесных ресурсов России. Проекты выполнялись в период с 2015 по 2021 г. Основными исполнителями были ИКИ РАН и Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (ЦЭПЛ РАН, <http://cepl.rssi.ru>). Главная задача проектов заключалась в создании методов, которые должны позволить получать объективную актуальную информацию о состоянии лесов России. Разработанные в рамках данных проектов подходы и накопленные базы данных о состоянии лесов позволили создать специализированную информационную систему «Вега-Лес» (<http://forest.geosmis.ru>) (Балашов и др., 2020) на базе возможностей системы «Вега-Science». Сегодня система обеспечивает оперативный доступ к непрерывно обновляемому многолетнему архиву данных дистанционного зондирования Земли из космоса, получаемым на их основе тематическим информационным продуктам, а также инструментам автоматизированной обработки, анализа и синтеза различной информации для решения задач комплексного мониторинга лесов России, включая получение следующих данных:

- ежегодно актуализируемой информации о качественных и количественных характеристиках лесов (площадь, запас древесины, преобладающая порода, полнота, бонитет, возраст и другие характеристики);
- сведений о повреждениях лесов пожарами (пройденная огнём площадь, степень повреждения лесов и величина постпожарного отпада);
- информации о площади и степени повреждений лесов под воздействием биотических, метеорологических и других природных факторов (насекомые, болезни, засухи и др.);
- информации об объёмах промышленной рубки леса (площадь, запас и порода вырубленной древесины).

Проект «Разработка методов и технологии комплексного использования данных дистанционного зондирования Земли из космоса для развития системы национального мониторинга бюджета углерода лесов России в условиях глобальных изменений климата» (Schepaschenko et al., 2021). Срок выполнения проекта — 2019–2022 гг. Основная задача проекта заключается в создании новой методологии оценки углерода в лесах с использованием многосенсорной концепции дистанционного зондирования Земли из космоса. В его рамках ведётся разработка новых и модификация существующих моделей, базирующихся на интеграции наземной и дистанционной информации. В проекте создаются новые динамические геоинформационные базы данных о характеристиках и бюджете углерода лесов России, технологии его непрерывного мониторинга и специализированная информационная система, ориентированная на обеспечение постоянного дистанционного мониторинга бюджетов углерода в лесах России. Проект выполняется специалистами и учёными из ЦЭПЛ РАН, ИКИ РАН, Сибирского федерального университета (СФУ, <http://www.sfu-kras.ru>) и других организаций. Работа ведётся при поддержке РФФИ (проект РФФИ 019-77-30015).

Разнообразие направлений использования системы «Вега-Science» также подтверждают и другие проекты, выполненные при поддержке Минборнауки РФ, РАН и различных российских и зарубежных фондов, такие как:

- проекты по созданию на основе технологий ДЗЗ методологии анализа и прогнозирования влияния климатических и экологических факторов на заболеваемость природно-очаговыми инфекциями (выполнялись Центральным научно-исследовательским институтом эпидемиологии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека) (Симонова и др., 2017);
- проект по разработке научных основ учёта, оценке экологического состояния, климатогенной роли и пожарной опасности антропогенно изменённых торфяных болот на основе спутниковых и наземных данных (выполняется Институтом лесоведения РАН) (Медведева и др., 2020);
- проект по изучению на основе данных ДЗЗ пространственно-временных особенностей теплового поля урбанизированных территорий засушливой зоны (выполняется Федеральным научным центром агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН) (Кошелева и др., 2021);
- проект по изучению природно-климатических трендов Байкальского региона (Байкальский институт природопользования СО РАН) (Цыдыпов и др., 2017).

С достаточно большим списком проектов, для выполнения которых использовались возможности системы «Вега-Science», можно ознакомиться на сайте ЦКП «ИКИ-Мониторинг» по ссылке <http://ckp.geosmis.ru/default.aspx?page=5>.

Заключение

На протяжении всего времени своего существования система «Вега-Science» непрерывно развивается. Из специализированной системы, ориентированной в основном на дистанционный мониторинг и изучение растительного покрова, «Вега-Science» превратилась в действительно уникальный научный инструмент, обеспечивающий возможности решения самых разнообразных научных задач.

Следует отметить, что наряду с постоянным (ежедневным) расширением архивов данных, работу с которыми обеспечивает система, расширяется и состав доступных для анализа данных. К оптическим данным видимого и ИК-диапазонов в систему постепенно добавились радиолокационные данные, данные гиперспектрометров и микроволновых зондировщиков атмосферы, а также данные других приборов. В настоящее время ведутся работы по интеграции в «Вега-Science» данных спутниковой альтиметрии и лидарных данных. Кроме «исходных» спутниковых данных (уровень L1B) в системе расширяются возможности работы с продуктами высокого уровня обработки, начиная с безоблачных композитов, фор-

мируемых на основе различных типов данных, и заканчивая картами характеристик разных типов объектов и процессов. Также расширяются возможности работы с сопутствующей информацией, необходимой для мониторинга и изучения различных явлений, в первую очередь — с метеоинформацией.

В систему постоянно добавляются новые инструменты, позволяющие проводить обработку и анализ спутниковых данных. Также создаются специализированные процедуры, обеспечивающие возможности максимально автоматизированной обработки данных для решения различных задач и реализации конкретных научных проектов.

Естественно, что развитие системы требует постоянного совершенствования технологий работы со спутниковыми данными, в том числе подходов к организации хранения и доступа к сверхбольшим распределённым архивам спутниковых данных, используемых системой, и веб-инструментария, обеспечивающего работу с данными, с учётом новых технологий, программных библиотек и фреймворков. При этом специалисты, работающие над развитием и поддержкой системы, стараются обеспечить баланс между разнообразием доступных возможностей и сложностью использования системы для пользователя, а также её производительностью и быстродействием. Стоит подчеркнуть, что развитие системы, расширение круга задач, для которых она используется, и увеличение числа исследователей, работающих с ней, требует постоянного наращивания вычислительной инфраструктуры, которое ведётся в рамках развития ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

Нельзя не отметить, что высокая универсальность системы «Вега-Science» позволила в последние годы начать активно использовать и развивать её как образовательный ресурс. Одним из наиболее актуальных направлений развития системы выступает формирование на её основе распределённой образовательной среды, позволяющей проводить весь курс обучения различной сложности — от ознакомления с базовыми понятиями до освоения сложных технологических процессов (в том числе по доработке информационных систем дистанционного мониторинга). При этом немаловажно, что система позволяет выполнять образовательные проекты различной сложности на основе реальных, максимально актуальных спутниковых данных. На сегодня «Вега-Science» успешно используется для проведения специализированных образовательных программ в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова, Высшей школе экономики и ряде других университетов.

В заключение отметим, что основное развитие системы сегодня осуществляется при поддержке Минобрнауки в рамках темы «Мониторинг», госрегистрация № 01.20.0.2.00164, при этом развитие технологий ведения и доступа к сверхбольшим архивам спутниковых данных проводится в рамках темы «Большие данные в космических исследованиях: астрофизика, солнечная система, геосфера», госрегистрация № 0024-2019-0014. Также нельзя не отметить, что многие инструменты и методы работы с данными, реализованные сегодня в системе «Вега-Science», были созданы в рамках различных проектов, поддержанных Минобрнауки, РФФИ и другими научными фондами.

Литература

1. Балашов И. В., Кашицкий А. В., Барталев С. А., Барталев С. С., Бурицев М. А., Ворущилов И. И., Егоров В. А., Жарко В. О., Кобец Д. А., Константинова А. М., Лупян Е. А., Сайгин И. А., Сенько К. С., Стыценко Ф. В., Сычугов И. Г., Хвостиков С. А., Ховратович Т. С. 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. Барталев С. А., Еришов Д. В., Лупян Е. А., Толпин В. А. Возможности использования спутникового сервиса ВЕГА для решения различных задач мониторинга наземных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 49–56.
3. 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.
4. Бурицев М. А., Успенский С. А., Крамарева Л. С., Антонов В. Н., Калашиников А. В., Балашов И. В., Кашицкий А. В., Лупян Е. А., Матвеев А. М., Прошин А. А. Современные возможности и перспективы

- развития Объединённой системы распределённой работы с данными НИЦ «Планета» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 198–212. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-198-212.
5. *Гирина О. А., Лупян Е. А., Мельников Д. В., Кашицкий А. В., Уваров И. А., Бриль А. А., Константинова А. М., Бурцев М. А., Маневич А. Г., Гордеев Е. И., Крамарева Л. С., Сорокин А. А., Мальковский С. И., Королев С. П.* Создание и развитие информационной системы «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 249–265. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-249-265.
 6. *Денисов П. В., Серeda И. И., Трошко К. А., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Толпин В. А.* Возможности и опыт оперативного дистанционного мониторинга состояния озимых культур на территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 171–185. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-171-185.
 7. *Кашицкий А. В., Балашов И. В., Лупян Е. А., Толпин В. А., Уваров И. А.* (2015а) 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.
 8. *Кашицкий А. В., Лупян Е. А., Барталев С. А., Барталев С. С., Балашов И. В., Ефремов В. Ю., Стыценко Ф. В.* (2015б) Оптимизация интерактивных процедур картографирования гарей в информационных системах дистанционного мониторинга природных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 4. С. 7–16
 9. *Кобец Д. А., Балашов И. В., Данилов И. Д., Лупян Е. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А.* Использование VI-технологий для создания инструментов для анализа данных спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 4. С. 17–27.
 10. *Кобец Д. А., Балашов И. В., Сычугов И. Г., Толпин В. А.* Построение на основе VI-технологий инструментов анализа информации о состоянии лесов, получаемой на основе данных спутниковых наблюдений // Докл. 6-й Всерос. конф. «Аэрокосм. методы и геоинформац. технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии». Москва, 20–22 апр. 2016. М.: ЦЭПЛ РАН, 2016. С. 24–28.
 11. *Константинова А. М., Балашов И. В., Толпин В. А.* Возможности применения тайловой схемы доступа к картам в интерфейсах, построенных по технологии GeoSMIS // Материалы 18-й Всерос. открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 16–20 нояб. 2020. М: ИКИ РАН, 2020. С. 83. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
 12. *Константинова А. М., Балашов И. В., Кашицкий А. В., Лупян Е. А.* 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.
 13. *Кошелева О. Ю., Шинкаренко С. С., Гордиенко О. А., Омаров Р. С., Дубачева А. А.* Сезонные и многолетние особенности температуры поверхности в городах засушливой зоны (на примере городов юго-востока европейской части России и Западного Казахстана) // Изв. Нижневолж. агроуниверситет. комплекса: наука и высшее проф. образование. 2021. № 3(63). С. 426–439. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-03-44.
 14. *Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Уваров И. А., Лупян Е. А.* Текущие возможности и опыт использования информационной системы See the Sea для изучения и мониторинга явлений и процессов на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 266–287. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
 15. *Лупян Е. А., Мазуров А. А., Назиров Р. Р., Прошин А. А., Флитман Е. В., Крашенинникова Ю. С.* Технологии построения информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 26–43.
 16. *Лупян Е. А., Балашов И. В., Бурцев М. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий 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.* (2015а) Создание технологий построения информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 53–75.
 17. *Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий 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.
 18. *Лупян Е. А., Бурцев М. А., Прошин А. А., Кобец Д. А.* Развитие подходов к построению информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 53–66. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66.

19. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Кашицкий А. В., Балашов И. В., Барталев С. А., Константинова А. М., Кобец Д. А., Мазуров А. А., Марченков В. В., Матвеев А. М., Радченко М. В., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. 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.
20. Лупян Е. А., Константинова А. М., Балашов И. В., Кашицкий А. В., Саворский В. П., Панова О. Ю. Разработка системы анализа состояния окружающей среды в зонах расположения крупных промышленных объектов, хвостохранилищ и отвалов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 243–261. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-243-261.
21. Лупян Е. А., Стыценок Ф. В., Сенько К. С., Балашов И. В., Мазуров А. А. (2021a) Оценка площадей пожаров на основе детектирования активного горения с использованием данных шестой коллекции приборов MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 178–192. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.
22. Медведева М. А., Макаров Д. А., Сиринов А. А. Применимость различных спектральных индексов на основе спутниковых данных для оценки площадей торфяных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 157–166. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-157-166.
23. Прошин А. А., Лупян Е. А., Балашов И. В., Кашицкий А. В., Бурцев М. А. 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.
24. Прошин А. А., Лупян Е. А., Балашов И. В., Кашицкий А. В., Матвеев А. М., Руткевич Б. П. 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.
25. Симонова Е. Г., Картава С. А., Титков А. В., Локтионова М. Н., Раичич С. Р., Толпин В. А., Лупян Е. А., Платонов А. Е. Сибирская язва на Ямале: оценка эпизоотологических и эпидемиологических рисков // Проблемы особо опасных инфекций. 2017. № 1. С. 89–93. DOI: 10.21055/0370-1069-2017-1-89-93.
26. Толпин В. А., Балашов И. В., Ефремов В. Ю., Лупян Е. А., Прошин А. А., Уваров И. А., Флитман Е. В. (2011a) 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.
27. Толпин В. А., Балашов И. В., Лупян Е. А., Савин И. Ю. (2011b) Спутниковый сервис «Вега» // Земля из космоса. 2011. Вып. 9. С. 32–37.
28. Толпин В. А., Лупян Е. А., Барталев С. А., Плотников Д. Е., Матвеев А. М. Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса «ВЕГА» // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 7(306). С. 581–586.
29. Толпин В. А., Барталев С. А., Ёлкина Е. С., Кашицкий А. В., Константинова А. М., Лупян Е. А., Марченков В. В., Плотников Д. Е., Патил В. К., Сунил Д. К. 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.
30. Ховратович Т. С., Иванова А. А., Барталев С. А. Анализ результатов применения алгоритма детектирования рубок леса по спутниковым данным дистанционного зондирования // Информац. технологии в дистанц. зондировании Земли — RORSE 2018: сб. ст. конф. ИКИ РАН, 2019. С. 108–115. DOI: doi.org/10.21046/rorse2018.108.
31. Цыдыпов Б. З., Аюржанаев А. А., Содномов Б. В., Алымбаева Ж. Б., Батоцыренов Э. А., Жарникова М. А., Саяпина Д. О., Гармаев Е. Ж. Пространственно-временная динамика растительного покрова подверженных опустыниванию территорий по Байкало-Гобийскому меридиональному трансекту на основе временных серий NDVI (MODIS/Terra и Landsat) // 12-е Сибир. совещание и школа молодых ученых по климато-эколог. мониторингу: сб. тез. конф. / под ред. М. В. Кабанова. 2017. С. 234–235.
32. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 202. P. 18–27.
33. Mukhamedzhanov I. D., Konstantinova A. M., Loupian E. A. The use of satellite data for monitoring rivers in the Amu Darya basin // E3S Web Conf. Regional Problems of Earth Remote Sensing (RPERS 2020). 2020. V. 223. Art. No. 03008. 6 p. DOI: doi.org/10.1051/e3sconf/202022303008.

34. Schepaschenko D., Karminov V., See L., Shvidenko A., Lesiv M., Fritz S., Kraxner F., Moltchanova E., Fedorov S., Ontikov P., Kositsyn V., Shchepashchenko M., Santoro M., Romanovskaya A., Korotkov V., Bartalev S. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported // Scientific Reports. 2021. V. 11. Art. No. 12825. 7 p. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92152-9>.
35. Wang L., Ma Y., Yan J., Chang V., Zomaya A. Y. PipsCloud: High performance cloud computing for remote sensing big data management and processing // Future Generation Computer Systems. 2018. V. 78. Pt. 1. P. 353–368. <https://doi.org/10.1016/j.future.2016.06.009>.

Vega-Science system: design features, main capabilities and usage experience

E. A. Loupian, A. A. Proshin, M. A. Bourtsev, A. V. Kashnitskii, I. V. Balashov,
S. A. Bartalev, A. A. Bril, V. A. Egorov, V. O. Zharko, A. M. Konstantinova,
D. A. Kobets, A. A. Mazurov, V. V. Marchenkov, A. M. Matveev, T. S. Miklashevich,
D. E. Plotnikov, M. V. Radchenko, F. V. Stytsenko, I. G. Sychugov,
V. A. Tolpin, I. A. Uvarov, S. A. Khvostikov, T. S. Khovratovich

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: evgeny@smis.iki.rssi.ru*

The article describes a unique scientific installation Vega-Science, which is designed to support operations with data from ultra-large distributed archives of the IKI-Monitoring center (<http://ckp.geosmis.ru/>) for the collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data. The system was created in 2012, and currently more than one hundred different scientific and educational organizations are its users. At the same time, it has been used to implement about 80 different Russian and international projects, the results of which have resulted in more than 500 publications. The article considers the relevance of the task of providing access to super large distributed archives of satellite data on the basis of a new approach, providing users with opportunities for interactive analysis and data processing on the basis of the centralized computing resources of the IKI-Monitoring center. It also describes the general architecture of the Vega-Science system. Special attention is paid to the description of new technologies for working with satellite data, the development of which was largely stimulated by scientific and applied projects carried out using the capabilities of the center. Then, the basic capabilities of the Vega-Science system are briefly described, with a special emphasis on interactive tools for data analysis and processing and examples of their use. A separate chapter is devoted to the experience of using the Vega-Science system in solving various scientific and applied problems. In conclusion of this work, the prospects of Vega-Science development are discussed, and the intermediate results of its use over the past 10 years are summarized.

Keywords: Earth remote sensing, satellite data, information system, collaborative system, very large data arrays, satellite data archives, access to satellite data

Accepted: 16.12.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31

References

1. Balashov I. V., Kashnitskii A. V., Bartalev S. A., Bartalev S. S., Burtsev M. A., Vorushilov I. I., Egorov V. A., Zharko V. O., Kobets D. A., Konstantinova A. M., Loupian E. A., Saigin I. A., Senko K. S., Stytsenko F. V., Sychugov I. G., Khvostikov S. A., Khovratovich T. S., VEGA-Les: information system for complex monitoring of forests and hunting grounds in Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 4, pp. 73–88 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-73-88.

2. Bartalev S. A., Ershov D. V., Loupian E. A., Tolpin V. A., Possibilities of Satellite Service VEGA Using for Different Tasks of Land Ecosystems Monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 49–56 (in Russian).
3. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2017, 208 p. (in Russian).
4. Bourtsev M. A., Uspenskiy S. A., Kramareva L. S., Antonov V. N., Kalashnikov A. V., Balashov I. V., Kashnitskii A. V., Loupian E. A., Matveev A. M., Proshin A. A., Actual features and evolution prospects of the SRC “Planeta” distributed data operation united system, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 198–212 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-198-212.
5. Girina O. A., Loupian E. A., Melnikov D. V., Kashnitskii A. V., Uvarov I. A., Bril A. A., Konstantinova A. M., Burtsev M. A., Manevich A. G., Gordeev E. I., Kramareva L. S., Sorokin A. A., Malkovsky S. I., Korolev S. P., Creation and development of the information system “Remote Monitoring of Kamchatka and Kuril Islands Volcanic Activity”, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 249–265 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-249-265.
6. Denisov M. V., Sereda I. I., Troshko K. A., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Tolpin V. A., Opportunities and experience of operational remote monitoring of winter crops condition in Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 2, pp. 171–185 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-171-185.
7. Kashnitskiy A. V., Balashov I. V., Loupian E. A., Tolpin V. A., Uvarov I. A. (2015a), Development of software tools for satellite data remote processing in contemporary information systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 156–170 (in Russian).
8. Kashnitskiy A. V., Loupian E. A., Bartalev S. A., Bartalev S. S., Balashov I. V., Efremov V. Yu., Stytsenko F. V. (2015b), Optimization of burn mapping interactive procedures in remote fire monitoring information systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 2, No. 4, pp. 7–16 (in Russian).
9. 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, Vol. 12, No. 4, pp. 17–27 (in Russian).
10. Kobets D. A., Balashov I. V., Sychugov I. G., Tolpin V. A., The BI Technologies Use to Create Tools for Data Analysis of Satellite Remote Sensing, *Aerokosmicheskie metody i geoinformatsionnye tekhnologii v lesovedenii, lesnom khozyaistve i ekologii* (Remote Sensing and GIS-Technologies in Forestry, Forest Management and Ecology), Proc. 6th All-Russia Conf., Moscow, 20–22 Apr. 2016, Moscow: CEPF RAS, 2016, pp. 24–28 (in Russian).
11. Konstantinova A. M., Balashov I. V., Tolpin V. A., Possibilities of maps access tile scheme application in the GeoSMIS technology built interfaces, *Materialy 18-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii “Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa”* (Proc. 18th All-Russia Open Conf. “Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space”), 16–20 Nov. 2020, Moscow: IKI RAN, 2020, p. 83 (in Russian), DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
12. Konstantinova A. M., Balashov I. V., Kashnitskii A. V., Loupian E. A., Unified technology for remote monitoring of natural and anthropogenic objects, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 41–52 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-41-52.
13. Kosheleva O. Yu., Shinkarenko S. S., Gordienko O. A., Omarov R. S., Dubacheva A. A., Seasonal and perennial features of surface temperature in arid zone cities (on an example of cities of the south-east of European part of Russia and the Western Kazakhstan), *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*, 2021, No. 3(63), pp. 426–439 (in Russian), DOI: 10.32786/2071-9485-2021-03-44.
14. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Uvarov I. A., Loupian E. A., Current capabilities and experience of using the See the Sea information system for studying and monitoring phenomena and processes on the sea surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 266–287 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
15. Loupian E. A., Mazurov A. A., Nazirov R. R., Proshin A. A., Flitman E. V., Krashennnikova Yu. S., Technologies for Building Remote Monitoring Information Systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 26–43 (in Russian).
16. Loupian E. A., Balashov I. V., Bourtsev M. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Kobets D. A., Krashennnikova Yu. S., Mazurov A. A., Nazipov 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, Vol. 12, No. 5, pp. 53–75 (in Russian).
17. Loupian E. A., Proshin A. A., Bourtsev 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, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian).
18. Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A., Kobets D. A., Evolution of remote monitoring information systems development concepts, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 53–66 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66.
 19. Loupian E. A., Proshin A. A., Bourtsev M. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Mazurov A. A., Marchenkov V. V., Matveev A. M., Radchenko M. V., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., 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, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
 20. Loupian E. A., Konstantinova A. M., Balashov I. V., Kashnitskii A. V., Savorskiy V. P., Panova O. Yu., Development of a system for analyzing the state of environment in areas of large industrial facilities, tailings and dumps, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 7, pp. 243–261 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-243-261.
 21. Loupian E. A., Stytsenko F. V., Senko K. S., Balashov I. V., Mazurov A. A. (2021a), Burnt area assessment using MODIS Collection 6 active fire data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 178–192 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.
 22. Medvedeva M. A., Makarov D. A., Sirin A. A., Applicability of different spectral indexes based on satellite data for peat fire area estimation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 5, pp. 157–166 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-157-166.
 23. Proshin A. A., Loupian E. A., Balashov I. V., Kashnitskiy A. V., Burtsev M. A., Unified satellite data archive management platform for remote monitoring systems development, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 3, pp. 9–27 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-9-27.
 24. Proshin A. A., Loupian E. A., Balashov I. V., Kashnitskii A. V., Matveev A. M., Rutkevich B. P., Technology of satellite data dynamic block provision to distributed processing systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 7, pp. 79–93 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-79-93.
 25. Simonova E. G., Kartavaya S. A., Titkov A. V., Loktionova M. N., Raichich S. R., Tolpin V. A., Lupyan E. A., Platonov A. E., Anthrax in the Territory of Yamal: Assessment of Epizootiological and Epidemiological Risks, *Problemy osobo opasnykh infektsii*, 2017, No. 1, pp. 89–93 (in Russian), DOI: 10.21055/0370-1069-2017-1-89-93.
 26. Tolpin V. A., Balashov I. V., Efremov V. Yu., Loupian E. A., Proshin A. A., Uvarov I. A., Flitman E. V. (2011a), The GeoSMIS System: Developing Interfaces to Operate Data in Modern Remote Monitoring Systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 3, pp. 93–108 (in Russian).
 27. Tolpin V., Balashov I., Loupian E., Savin I. (2011b), “VEGA” Satellite-Based Service, *Zemlya iz kosmosa*, 2011, Issue 9, pp. 32–37 (in Russian).
 28. Tolpin V. A., Loupian E. A., Bartalev S. A., Plotnikov D. E., Matveev A. M., Possibilities of agricultural vegetation condition analysis with the “VEGA” satellite service, *Optika atmosfery i okeana*, 2014, Vol. 27, No. 7(306), pp. 581–586 (in Russian).
 29. Tolpin V. A., Bartalev S. A., Elkina E. S., Kashnitskii A. V., Konstantinova A. M., Loupian E. A., Marchenkov V. V., Plotnikov D. E., Patil V. C., Sunil J. K., 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, Vol. 16, No. 3, pp. 183–197 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-183-197.
 30. Khovratovich T. S., Ivanova A. A., Bartalev S. A., Evaluation of the Algorithm for Forest Logging Detection based on Earth Observation Data, *Informatsionnye tekhnologii v distantsionnom zondirovanii Zemli — RORSE 2018* (Information Technologies in Remote Sensing of the Earth — RORSE 2018), Proc. Conf., IKI RAN, 2019, pp. 108–115 (in Russian), DOI: 10.21046/rorse2018.108.
 31. Tsydypov B. Z., Ayurzhanov A. A., Sodnomov B. V., Alymbaeva Zh. B., Batotsyrenov E. A., Zharnikova M. A., Sayapina D. O., Garmaev E. Zh., Prostranstvenno-vremennaya dinamika rastitel'nogo pokrova podverzhennykh opustynivaniyu territorii po Baikalo-Gobiiskomu meridional'nomu transektu na osnove vremennykh serii NDVI (MODIS/Terra i Landsat) (Spatial and temporal dynamics of vegetation cover of desertification-prone areas along the Baikal-Gobi meridional transect based on the NDVI time series (MODIS/Terra and Landsat)), *12-e Sibirskoe soveshchanie i shkola molodykh uchenykh po klimato-ekologicheskomu monitoringu* (12th Siberian meeting and school of young scientists on climate-ecological monitoring), Book of Abstr., M. V. Kabanov (ed.), 2017, pp. 234–235 (in Russian).

32. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R., Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 202, pp. 18–27.
33. Mukhamedzhanov I. D., Konstantinova A. M., Loupian E. A., The use of satellite data for monitoring rivers in the Amu Darya basin, *E3S Web Conf. Regional Problems of Earth Remote Sensing (RPERS 2020)*, 2020, Vol. 223, Art. No. 03008, 6 p., DOI: doi.org/10.1051/e3sconf/202022303008.
34. Schepaschenko D., Karminov V., See L., Shvidenko A., Lesiv M., Fritz S., Kraxner F., Moltchanova E., Fedorov S., Ontikov P., Kositsyn V., Shchepashchenko M., Santoro M., Romanovskaya A., Korotkov V., Bartalev S., Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported, *Scientific Reports*, 2021, Vol. 11, Art. No. 12825, 7 p., <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92152-9>.
35. Wang L., Ma Y., Yan J., Chang V., Zomaya A. Y., PipsCloud: High performance cloud computing for remote sensing big data management and processing, *Future Generation Computer Systems*, 2018, Vol. 78, Part 1, pp. 353–368, <https://doi.org/10.1016/j.future.2016.06.009>.