

Научно-практическая статья/Research article

УДК 528.91+[681.78:004.932.4]

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-3-121-130>

Разработка ГИС-сервиса для тематической обработки данных гиперспектральных и мультиспектральных оптико-электронных систем

*А. В. Трофимова*¹✉

¹ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Российская Федерация

e-mail: trofimova.anna@phystech.edu

Аннотация. В статье представлены результаты разработки цифрового геосервиса (ГИС-сервиса) для обработки данных дистанционного зондирования Земли, полученных с помощью гипер- и мультиспектральной аппаратуры. Сервис разработан в формате прототипа (MVP) с минимальным набором функций на основе объектно-ориентированного подхода. Основная задача сервиса заключается в автоматизированной тематической обработке разновременных данных космических аппаратов Landsat-8, EO-1, Sentinel-2 и НА «Гиперспектрометр». Реализованы функции расчета спектральных индексов и сегментации изображений подстилающей поверхности, что подтверждает потенциал дальнейшего расширения функционала. Ограничениями текущей реализации являются отсутствие контейнеризации с использованием Docker, применение базового пакетного менеджера `pip` вместо продвинутых решений (`poetry`, `uv`), отсутствие хранилищ класса S3. В заключении подчеркивается, что предложенный подход и архитектура могут быть использованы для создания аналогичных сервисов. В будущем возможно внедрение новых методов машинного обучения и нейросетевых алгоритмов сегментации, а также проведение наземной валидации для оценки точности результатов тематической обработки.

Ключевые слова: архитектура геосервисов, индексы

Для цитирования:

Трофимова А. В. Разработка ГИС-сервиса для тематической обработки данных гиперспектральных и мультиспектральных оптико-электронных систем. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 3. С. 121–130. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-3-121-130>

GIS-based service for thematic processing of hyperspectral and multispectral optoelectronic data

*A. V. Trofimova*¹✉

¹ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russian Federation

e-mail: trofimova.anna@phystech.edu

Abstract. The article presents the development of a GIS-based service for processing Earth observation data acquired by hyperspectral and multispectral optoelectronic systems. The service was implemented as a minimum viable product, employing an object-oriented software architecture. The primary objective of the service is automated thematic processing of multi-temporal data from the Landsat-8, EO-1, and Sentinel-2 satellites, as well as from the Hyperspectrometer spaceborne payload. Implemented functionalities include spectral index computation and segmentation of the underlying

surface, demonstrating the feasibility of subsequent functional expansion. Current limitations of the service include the absence of Docker-based containerization, reliance on the basic pip package manager rather than advanced alternatives (poetry, uv), and lack of S3-compatible object storage. The authors conclude that the proposed approach and architecture provide a viable foundation for developing analogous geoservices. Future work may involve integration of advanced machine learning methods and deep learning-based segmentation algorithms, as well as ground-based validation to assess the accuracy of thematic processing results.

Keywords: geoservice architecture, indices

For citation:

Trofimova A. V. (2026) GIS-based service for thematic processing of hyperspectral and multispectral optoelectronic data. *Vestnik SSUGiТ [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 3. pp. 121–130. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-3-121-130>

Введение

За последние десятилетия накопился огромный объем спутниковых снимков, как многоспектральных, так и гиперспектральных. Заинтересованность в их использовании растет. Анализ данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяет решать множество задач различных отраслей экономики, проводить мониторинг чрезвычайных ситуаций, оценку экологического состояния среды и ее изменчивости, в том числе в труднодоступных районах.

Необходимость создания облачных платформ во многом определяется растущими объемами данных, получаемых с российских и зарубежных космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли, расширением перечня прикладных задач пользователей, решаемых с привлечением методов ДЗЗ [1]. В настоящее время существуют пользовательские геосервисы, геопорталы, позволяющие получить разновременные данные с различных спутников на выбранную территорию.

Например, «Вега» – семейство информационных систем дистанционного мониторинга, состоящее из системы Вега-Pro и Вега-Science от ИКИ РАН. Обработка получаемых спутниковых данных проходит полностью автоматически, что позволяет ежедневно осуществлять обновление информации [2, 3]. Принципиальная разница между сервисами Вега-Pro и Вега-Science в том, что Вега-Science не предполагает коммерческого ис-

пользования. В остальном оба сервиса имеют похожий интерфейс и функционал. Однако демонстрационные версии не позволяют скачивать спутниковые снимки, продукты, полученные на их основе.

Проект «Цифровая земля» разработан компанией АО «Терра Тех» [4]. Он представляет собой набор сервисов, предназначенных для обеспечения пользователей цифровыми аналитическими продуктами о хозяйственной деятельности в масштабах РФ на основе данных ДЗЗ [5]. Обработка данных происходит автоматизированно с использованием нейронных сетей, статистического анализа и экспертного контроля данных. Работа в системе осуществляется по индивидуальному или коллективному доступу через геоинформационный веб-портал.

Google Earth Engine (GEE) [6] и Microsoft Planetary Computer (MPC) [7] предоставляют доступ к глобальным архивам спутниковых данных и инструментам анализа. Однако полный функционал доступен только в облаке, существуют ограничения на загрузку пользовательских данных и вычислительную интенсивность. В случае MPC использование масштабных вычислений требует платных сервисов Azure, что снижает доступность для исследователей без устойчивого финансирования.

В зарубежной литературе подчеркивается значимость интеграции данных ДЗЗ и методов машинного обучения для отслеживания статуса выполнения проектов, направленных на достижение «Целей устойчивого развития ООН» (11, 13–15 цели), что указано в работе

Ferreira D. и Zhao X [8, 9]. A. Velastegui-Montoya делает вывод о том, что облачные платформы позволяют эффективно работать с большими массивами данных, включая анализ природных систем – землепользования, почвенно-растительного покрова [10].

Веб-ГИС-платформы, такие как EO Browser, предоставляют доступ к архивам Sentinel-2, Landsat и других спутников с возможностью визуализации и расчета спектральных индексов [11]. Аналогичные решения, например, ARCHIMEDE, способствуют распространению географической информации и поддерживают разработку стратегий управления прибрежными территориями, что в своей статье доказывают A. Kushabaha и др. [12]. Развитие сервисов обработки данных ДЗЗ за рубежом подтверждает их высокую актуальность для решения как глобальных, так и региональных задач природопользования и экологического мониторинга.

Таким образом, при анализе востребованных сервисов был сделан вывод о том, что большинство отечественных геосервисов предоставляют данные и результаты их обработки преимущественно платно или в режиме демо-доступа, предназначены для визуализации данных среднего и высокого пространственного разрешения в целях экологического, хозяйственного мониторинга, прикладных и научных задач. В качестве исходных данных у рассмотренных сервисов распространены данные спутников Landsat-8, -9 и Sentinel-2. Однако доступ к данным гиперспектральной съемки, например, к данным «Ресурса-П», закрыт для широкого круга пользователей, так как требует разрешения компании «Роскосмос». Практически отсутствуют результаты тематической обработки гиперспектральных снимков.

Целью исследования является создание такого цифрового продукта с минимальным набором функций (MVP), который бы функционировал бесплатно, предоставлял данные ДЗЗ, полученные с помощью мультиспектральной аппаратуры (МСА) и гиперспектральной аппаратуры (ГСА), и в автоматическом режиме рассчитывал наиболее популярные индексы по запросу пользователя (нормализованный относительный вегетационный

индекс, нормализованный относительный водный индекс, нормализованный относительный снежный индекс), проводил сегментацию изображений подстилающей поверхности (на основе рассчитанных индексов, представленных в формате растров: нормализованного относительного вегетационного индекса, нормализованного относительного водного индекса и нормализованного относительного индекса городской застройки (NDBI)) с выделением типов подстилающей поверхности для разновременных данных, поступающих с различных КА, и архитектура которого позволяет развивать его в дальнейшем. Температура подстилающей поверхности (LST) может быть вычислена в настольных ГИС. Однако этот процесс требует от пользователя последовательного выполнения ряда операций: загрузки спутниковых данных, их предварительной обработки и последующего вычисления индекса. Ранее в QGIS был реализован Land Surface Temperature QGIS Plugin, но с 2024 г. наблюдается ограничение доступа со стороны NASA к калькулятору атмосферной коррекции (Atmospheric Correction Parameter Calculator) для расчета нисходящей и восходящей радиации. В данном сервисе впервые реализован автоматический расчет LST (при рассмотрении продуктов, находящихся в открытом доступе).

Методы и материалы

Геосервис – это веб-сервис, предоставляющий возможность выполнять операции с пространственными данными, содержащимися в наборах пространственных данных, или со связанными с ними метаданными. Для обоснования технологий и инструментов, необходимых для создания сервиса, были рассмотрены информационные продукты, часто предоставляемые современными сервисами ДЗЗ:

1) традиционные RGB-снимки (композит зеленого, красного, синего каналов), снимки в псевдоцветах (композит зеленого, красного и инфракрасного каналов), полученные мультиспектральной камерой;

2) карты нормализованного относительного вегетационного индекса (NDVI), постро-

енные на основе снимков красного и коротковолнового инфракрасного диапазонов и определяемого на примере сервиса EO Browser по формуле

$$\frac{(B8 - B4)}{(B8 + B4)} = \frac{(DN_{842\text{нм}} - DN_{665\text{нм}})}{(DN_{842\text{нм}} + DN_{665\text{нм}})}, \quad (1)$$

где $B8$ – узкий ближний инфракрасный канал; $B4$ – красный канал; $DN_{842\text{нм}}$ – числовое значение яркости элемента изображения на длине волны 842 нм; $DN_{665\text{нм}}$ – числовое значение яркости элемента изображения на длине волны 665 нм;

3) карты нормализованного относительного водного индекса (NDWI), построенные на основе снимков двух инфракрасных каналов, определяемого на примере сервиса EO Browser по формуле

$$\frac{(B8A - B11)}{(B8A + B11)} = \frac{(DN_{865\text{нм}} - DN_{1610\text{нм}})}{(DN_{865\text{нм}} + DN_{1610\text{нм}})}, \quad (2)$$

где $B8A$ – узкий ближний инфракрасный канал; $B11$ – коротковолновой инфракрасный канал; $DN_{865\text{нм}}$ – числовое значение яркости элемента изображения на длине волны 865 нм; $DN_{1610\text{нм}}$ – числовое значение яркости элемента изображения на длине волны 1 610 нм;

4) карты нормализованного относительного снежного индекса (NDSI), построенные на основе снимков зеленого и коротковолнового инфракрасного диапазонов, определяемого на примере сервиса EO Browser по формуле

$$\frac{(B3 - B11)}{(B3 + B11)} = \frac{(DN_{560\text{нм}} - DN_{1610\text{нм}})}{(DN_{560\text{нм}} + DN_{1610\text{нм}})}, \quad (3)$$

где $B3$ – синий канал; $B11$ – коротковолновой инфракрасный канал; $DN_{560\text{нм}}$ – числовое значение яркости элемента изображения на длине волны 560 нм; $DN_{1610\text{нм}}$ – числовое значение яркости элемента изображения на длине волны 1 610 нм.

В качестве исходных сведений для расчета информационных продуктов наиболее встречающимися являются данные видимого, ближнего и коротковолнового инфракрас-

ного каналов. Для написания внутренней части сервиса были взяты рассмотренные выше спектральные индексы с условием соответствия каналов, корректных для имеющихся в открытом доступе КА.

При анализе нормативной документации установлено, что базовые сервисы на основе данных ДЗЗ из космоса должны обеспечивать реализацию следующих возможностей: поиска данных ДЗЗ из космоса, визуализации данных ДЗЗ из космоса, автоматизированного ведения расчетов, загрузки (получения) данных ДЗЗ из космоса. Это необходимо учитывать при планировании проектов. Сервис обработки и анализа данных ДЗЗ из космоса необходимо реализовать в виде веб-сервиса с веб-интерфейсом на аппаратно-программном обеспечении с использованием виртуальных машин на базе серверной инфраструктуры и вычислительных модулей с возможностью параллельной обработки.

Результаты и обсуждение

Архитектура была выбрана типа «клиент – сервер», так как она позволяет выполнять требования к составу и характеристикам данных ДЗЗ в соответствии с актуальными для пользователя потребностями [13]. В качестве шаблона проектирования был выбран паттерн MVC [14].

Взаимодействие в проекте осуществляется через обмен данными между фронтендом и бэкендом с помощью фреймворка с Django (рис. 1). Оно включает в себя использование AJAX-запросов для отправки данных с клиентской стороны (фронтенд) и получения ответов от сервера (бэкенд) [15].

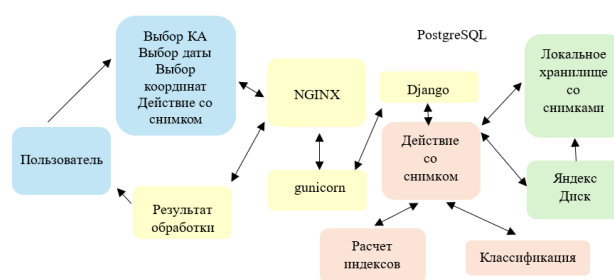


Рис. 1. Архитектура внутренней части сервиса

Алгоритмическая обработка снимков, поступающих с космических аппаратов, проводится с помощью библиотеки `tiff` [16]: программа считывает исходные растровые файлы и переводит их в формат, удобный для попиксельных математических действий с ними. В текущей реализации сервиса библиотека `tiff` была выбрана ввиду ее компактного и удобного интерфейса. На данном этапе осуществляется открытие и запись GeoTIFF-файлов в базу данных, для этих целей возможностей `tiff` достаточно. Гиперспектральные снимки поставляются в виде архива растров отдельных спектральных каналов, каждый из которых имеет небольшую ширину (около 10 нм). Чтобы вычислить вышеуказанные индексы, нужно получить из исходного архива изображения, соответствующие нужным диапазонам длин волн (красному, синему, зеленому, инфракрасному, дальнему инфракрасному). Для каждого диапазона числового значения яркости известны границы длин волн [L_{min} , L_{max}]. Для этого используются функции `lambda2num(L)` и `lambda2img(L)`. Данные искомым файлам попиксельно усредняются по среднему из выборки в рамках необходимых для расчета индексов диапазонов. Для всех последующих математических действий растровые изображения конвертируются в числовые массивы при помощи библиотеки `numpy` [17]. Следует отметить, что для мультиспектральных изображений вышеуказанная операция усреднения не требуется, поскольку в их случае изображения предоставляются поканально в исходных архивах. Индексные изображения получаются из мультиспектральных и гиперспектральных снимков при помощи простых математических действий, выполняемых попиксельно.

Алгоритм сегментации изображений заключается в следующем:

- 1) выделяется фон по пиксельной маске любого канала (в геосервисе выбран коротковолновой инфракрасный канал);
- 2) рассчитывается индекс NDVI и те пиксели, значения NDVI в которых больше либо равны 0,25 считаются растительностью;
- 3) считается индекс NDWI и те пиксели, NDWI в которых больше 0 считаются водой;

4) отбираются пиксели, не принадлежащие ни одному из вышеперечисленных классов. Для них считается индекс NDBI, и, если значение NDBI больше 0, то алгоритм считает это зоной городской застройки.

По итогу классификации выделяется 4 класса: город, растительность, водные объекты и не вошедшие ни в один класс пиксели. Для обработки снимков используется библиотека `numpy`.

Для размещения снимков, поступающих с космических аппаратов, и сопутствующих к ним данных (метаданных) выбран отечественный сервис Яндекс.Диск [18, 19] ввиду его доступности и экономичности. Взаимодействие с Яндекс.Диском происходит с использованием `YaDisk` – библиотеки-клиента REST API Яндекс.Диска. С помощью нее можно загружать файлы в облачное хранилище, скачивать их из хранилища, управлять ими в нем. Становится возможным эффективнее распоряжаться дисковым пространством сервера, снижая требования к объему необходимой постоянной памяти и уменьшая количество обращений к ней. Хранение большей части информации в облаке упрощает миграцию сервиса на другой сервер в случае необходимости.

Для реализации описанного подхода был получен OAuth-токен на Яндекс.Диске и разработан отдельный класс функций для внутренней части сервиса, объединяющий в себе функции взаимодействия с Яндекс.Диском, такие как загрузка в хранилище и скачивание из него, удаление файла из хранилища и проверка существования файла. Все функции имеют две реализации – синхронную и асинхронную.

В программе используются две базы данных: `images_db` и `metrics_db` (для обезличенного отслеживания кликов по снимкам), созданные при помощи PostgreSQL. База данных `images_db` используется для хранения сведений обо всех загруженных изображениях. Она включает в себя следующие модели:

- 1) `Image` – описывает снимок, поступающий с КА. Содержит название, путь к файлу в локальном хранилище, описание, дату загрузки, размер, расширение, метки (`tags`), время съемки и координаты углов;

2) `RelatedRemoteFile` – описывает файл в облачном хранилище Яндекс.Диск. Содержит внешний ключ на модель `Image` (связь один ко многим), путь к файлу в облачном хранилище, имя файла, размер, расширение и дату загрузки;

3) `RelatedLocalFile` – описывает файл в локальном хранилище. Содержит внешний ключ на модель `Image` (связь один ко многим), путь к файлу в локальном хранилище, имя файла, размер, расширение, дату загрузки и версию функции расчета индекса.

При загрузке оператором снимков в программу происходит цепочка процессов. Через представление Django на сервер отправляется POST-запрос от оператора, содержащий основное изображение снимка, сопутствующие файлы (изображения разных спектральных каналов, метаданные), название снимка, описание и метки (перечисляются через запятую, обязательно содержат название КА). В локальное хранилище сохраняется основное изображение, а в базу данных (БД) записывается модель `Image`. Далее производится прохождение по всем сопутствующим файлам, производятся все доступные в программе процедуры обработки снимков, результаты которых сохраняются в локальное хранилище (далее кэш). На каждый результат обработки также создается модель `RelatedLocalFile`. Среди сопутствующих файлов ищется файл с метаданными в формате, соответствующем спутнику, указанному в метках изображения (tags). В случае нахождения нужного файла из него сохраняется необходимая информация (координаты углов, время съемки и др.). Все сопутствующие файлы загружаются в облачное хранилище, создаются модели `RelatedRemoteFile`. Чтобы оперативно предоставлять пользователю результаты обработки снимков, вся обработка происходит в момент, когда оператор загружает снимок в программу. Результаты обработки сохраняются в локальное хранилище.

Когда пользователь хочет получить какой-либо результат обработки, то происходит, во-первых, отправка POST-запроса, содержащего название функции требуемой обработки на сервер, во-вторых, сервер проверяет в БД наличие результата требуемой обработки для

данного снимка. Если результат обработки по какой-то причине не найден, то расчет происходит заново. При наличии результата проверяется соответствие версии функции, использованной для расчета (поле `index_version` в БД). Если номер версии отличается от того, который указан в актуальном коде функции, то расчет производится заново. Описанная система кэширования и контроля версий позволяет уменьшить среднее время ожидания пользователя.

Для размещения разработанного веб-приложения в сети Интернет необходим сервер с публичным IP-адресом. Работа сервиса осуществляется на сервере, арендованном у российской компании Selectel [20]. Для работы сервиса был арендован сервер с 4 CPU ядрами, 16 ГБ оперативной памяти и операционной системой Linux Ubuntu 20.04.

Веб-сервер использовался `nginx`, он принимает и обрабатывает HTTP-запрос браузера, после чего передает его на сторону сервера-приложения `gunicorn`. `Nginx` помогает снижать нагрузку на сервер при обработке файлов, кешировать данные, балансировать нагрузку, что повышает отказоустойчивость. Сервер приложения `gunicorn` получает данные от `nginx`, разбирает их и, исходя из своей конфигурации, передает данные в созданное приложение на базе Django по протоколу WSGI. Django обрабатывает полученные данные, формирует запрос к базе данных в PostgreSQL и передает результат работы обратно в `gunicorn`, а он в свою очередь отдает результат в `nginx`, возвращающий пользователю готовую HTML-страницу [21–23]. Данное сочетание технологий уже доказывало свою эффективность в приложениях.

В сервисе аутентификация и авторизация пользователей не реализованы, так как доступ представлен в открытом режиме. При этом выполняется базовая валидация входных данных: проверка корректности формата временных интервалов, геометрии полигона и выбора спутникового аппарата. Архитектура сервиса исключает возможность SQL-инъекций – динамические запросы к базе данных не используются, а доступ к ней защищен через закрытые параметры конфигурации (для коммерческого использования рекомендуется внедрить полно-

ценные механизмы аутентификации, авторизации и защиты данных).

Примеры рассчитанных индексов для данных, полученных с помощью мультиспектральных и гиперспектральных съемочных систем, в разработанном ГИС-сервисе представлены на рис. 2 и 3.

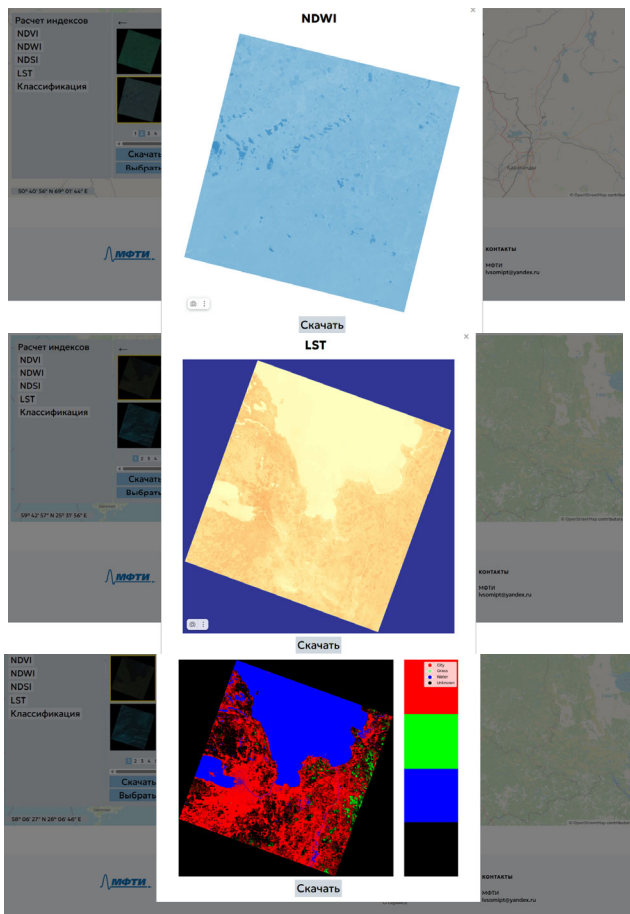


Рис. 2. Индексы NDWI, LST и сегментация для Landsat-8

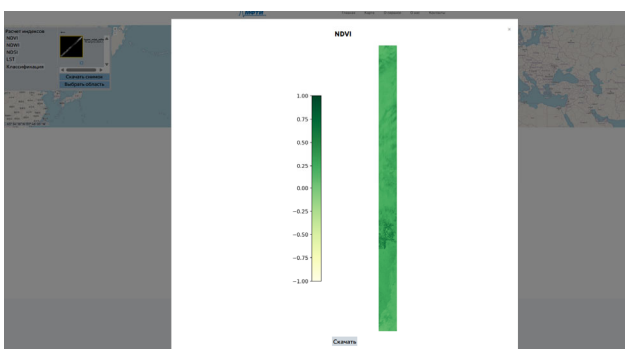


Рис. 3. Индекс NDVI для НА «Гиперспектрометр»

Ограничениями данной работы служит отсутствие контейнеризации при помощи docker, так как создание и дальнейший локальный запуск геосервисов могут производиться на различных операционных системах (ОС); вследствие этого одна и та же версия библиотек может работать по-разному. Чтобы этого не происходило, необходимо поместить сервис в контейнер для его дальнейшей работы в других ОС. Также в данном геосервисе используется pip – пакетный менеджер вместо продвинутых poetry или uv. Если использовать их, то настройка среды будет выполняться оптимизированно, что повысит производительность программного обеспечения. Применение стандартизированных решений класса S3 для организации хранилищ возможно при дальнейшем совершенствовании сервиса.

Описанный в данной работе подход для создания геосервисов, в том числе и MVP, может быть полезен с точки зрения рассмотрения практического опыта проектирования и разработки сервисов обработки снимков ДЗЗ, опыта автоматизации обработки снимков, выбора архитектуры и набора технологий реализации геосервиса. Предложенная архитектура сервиса основана на базовых решениях для того, чтобы избежать избыточной сложности и обеспечить надежность системы. Вместе с тем потенциал заложенной архитектуры предполагает возможность ее дальнейшего расширения – по мере увеличения функционала сервиса она будет адаптироваться и усложняться при необходимости. Репозиторий с кодом не размещен в общий доступ в целях безопасности и конфиденциальности, но может быть выдан по запросу.

Заключение

Таким образом был создан и развернут бесплатный геосервис для обработки данных ДЗЗ, использующий открытые мультиспектральные данные и информацию, поступающую с отечественного гиперспектрального прибора на борту МКС. Были описаны методологические подходы, возможные для применения в аналогичных проектах. Стоит отметить, что при реализации следующих геосервисов необходимо внедрение контейнеризации, новых

пакетных менеджеров и методов сегментации, как традиционных методов машинного обучения: k-NN, SVM, RF, так и нейросетевых: 3D-Hyper-UNET, DCCaps-UNet [24] с вычислением их метрик. Это поможет верифицировать точность результатов обработки, полученных разными методами. Целесообразно также проведение наземной валидации спутниковых измерений – для оценки качества сегментации, классификации. На текущем этапе развития

сервиса сегментация рассматривается как вспомогательный инструмент визуализации результатов тематической обработки, исследование вопросов ее валидации является частью дальнейших исследований.

Благодарности

Выражается благодарность фонду НТИ, ПАО «РКК «Энергия», АО «НПО «ЛЕПТОН».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Емельянов А. А., Ерешко М. В., Сизова О. С., Борисов А. В. Обзор современных облачных платформ обработки и аналитики данных ДЗЗ и информационных продуктов на их основе. Исследование Земли из космоса. 2022. № 2. С. 72–87.
2. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. Система «Вега-Science»: особенности построения, основные возможности и опыт использования. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 6. С. 9–31.
3. Денисов П. В., Лупян Е. А., Толпин В. А., Трошко К. А. Спутниковый сервис «Вега-PRO» для сельскохозяйственного мониторинга. Управление рисками в АПК. 2021. № 1(39). С. 22–36.
4. Цифровая Земля. [Электронный ресурс] URL: <https://dgearth.ru/> (дата обращения: 01.07.2024).
5. Шаймарданов Д. А., Атнабаев А. Ф., Мухаметов Д. И., Павлова Л. Г. Состояние и перспективы использования данных дистанционного зондирования Земли для обнаружения природных пожаров. Бюллетень науки и практики. 2024. Т. 10, № 7. С. 77–81.
6. Google. Google Earth Engine: planetary-scale platform for Earth science data & analysis URL: <https://earthengine.google.com> (дата обращения: 18.09.2024).
7. Microsoft. Microsoft Planetary Computer: cloud-based geospatial data access and analysis platform URL: <https://planetarycomputer.microsoft.com> (дата обращения: 18.09.2024).
8. Ferreira, B., Iten, M. & Silva, R.G. et al. (2020). Monitoring sustainable development by means of earth observation data and machine learning: a review. Environmental Sciences Europe, 32, 120.
9. Qiang Zhao, Le Yu Remote sensing applications for assessing progress toward sustainable development goals. Journal of Remote Sensing, 2025. 5 (0403).
10. Velastegui-Montoya, A., Montalván-Burbano, N., Carrión-Mero, P., Rivera-Torres, H., Sadeck, L., & Adami, M. Google Earth Engine: A Global Analysis and Future Trends. Remote Sensing, 2023. 15(14), 3675.
11. EO Browser. URL: <https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser/> (дата обращения: 20.09.2024).
12. Kushabaha, A., Scardino, G., Sabato, G., Miglietta, M. M., Flaounas, E., Monforte, P., Marsico, A., De Santis, V., Borzì, A. M., & Scicchitano, G. ARCHIMEDE – An Innovative Web-GIS Platform for the Study of Medicanes. Remote Sensing, 2024. 16(14), 2552.
13. Зеленцов В. А. Архитектура и примеры реализации информационной платформы для создания и предоставления тематических сервисов с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Труды СПИИРАН. 2017. № 6. С. 86–113.
14. Ahmad, S. I., Rana, T., & Maqbool, A. A Model-Driven Framework for the Development of MVC-Based (Web) Application. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022. 47(2), 1733–1747.
15. Kipkemboi, W., Kuria, B. T., Kuria, D. N., Sichangi, A. W., Mundia, C. N., Wanjala, J. A., Rienow, A. Development of a Web-GIS Platform for Environmental Monitoring and Conservation of the Muringato Catchment in Kenya. Journal of Geovisualization and Spatial Analysis, 2023. 7(1).
16. Christoph Gohlke. cgohlke/tiff: v2025.3.13 (v2025.3.13). Zenodo. 2025.

17. NumPy. URL: <https://numpy.org/> (дата обращения: 01.10.2024).
18. Яндекс. Диск. URL: <https://yandex.ru/dev/disk/> (дата обращения 11.10.2024).
19. Документация Яндекс.Диска. URL: <https://yadisk.readthedocs.io/ru/latest/> (дата обращения: 23.08.2024).
20. Центры обработки данных «Selectel». URL: <https://selectel.ru/> (дата обращения: 22.09.2024).
21. Сервер NGINX. URL: <https://nginx.org/> (дата обращения: 19.10.2024).
22. Сервер Gunicorn для UNIX. URL: <https://gunicorn.org/> (дата обращения: 10.08.2024).
23. Алиматов К. С. Разработка защищенной системы мгновенного обмена сообщениями. Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2023): сб. научных статей. СПб. : Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2023. С. 56–59.
24. Wei, S., Liu, Y., Li, M., Huang, H., Zheng, X., & Guan, L. DCCaps-UNet: A U-Shaped Hyperspectral Semantic Segmentation Model Based on the Depthwise Separable and Conditional Convolution Capsule Network. *Remote Sensing*, 2023. 15(12), 3177.

REFERENCES

1. Emelyanov, A. A., Ereshko, M. V., Sizov, O. S., Borisov, A. V. (2022). Review of current cloud platforms for processing and analyzing remote sensing data and information products based on them. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa [Exploring the Earth from Space]*, 2, 72–87 [in Russian].
2. Loupian, E. A., Proshin, A. A., Bourtsev, M. A. (2021). Vega-Science system: design features, main capabilities and usage experience. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space]*, 18 (6), 9–31 [in Russian].
3. Denisov, P. V., Loupian, E. A., Tolpin, V. A., Troshko, K. A. (2021). “VEGA-PRO” satellite service for agricultural monitoring. *Upravlenie riskami v APK [Agricultural Risk Management]*, 1(39), 22–36 [in Russian].
4. The Digital Earth. Retrieved from <https://dgearth.ru/> (accessed July 1, 2024).
5. Shaimardanov, D. A, Atnabaev, A. F., Mukhametov, D. I., Pavlova, L. G. (2024). Status and prospects for the use of remote sensing data for the detection of wildfires. *Byulleten' nauki i praktiki [Bulletin of Science and Practice]*, 10(7). 77–81 [in Russian].
6. Google Earth Engine: planetary-scale platform for Earth science data & analysis. Retrieved from <https://earthengine.google.com/> (accessed September 18, 2024).
7. Microsoft Planetary Computer: cloud-based geospatial data access and analysis platform. Retrieved from <https://planetarycomputer.microsoft.com/> (accessed September 18, 2024).
8. Ferreira, B., Iten, M. & Silva, R. G. et al. (2020). Monitoring sustainable development by means of earth observation data and machine learning: a review. *Environmental Sciences Europe*, 32, 120.
9. Qiang Zhao, Le Yu (2025). Remote sensing applications for assessing progress toward sustainable development goals. *Journal of Remote Sensing*, 5(0403).
10. Velastegui-Montoya, A., Montalván-Burbano, N., Carrión-Mero, P., Rivera-Torres, H., Sadeck, L., & Adami, M. (2023). Google Earth Engine: A Global Analysis and Future Trends. *Remote Sensing*, 15(14), 3675.
11. EO Browser. Retrieved from <https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser/> (accessed September 20, 2024).
15. Kushabaha, A., Scardino, G., Sabato, G., Miglietta, M. M., Flaounas, E., Monforte, P., Marsico, A., De Santis, V., Borzi, A. M., & Scicchitano, G. (2024). ARCHIMEDE – An Innovative Web-GIS Platform for the Study of Medicanes. *Remote Sensing*, 16(14), 2552.
12. Zelentsov, V. A. (2017). Architecture and Examples of Implementing the Informational Platform for Creation and Provision of Thematic Services Using Earth Remote Sensing Data. *Trudy SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]*, 6, 86–113 [in Russian].

13. Ahmad, S. I., Rana, T., & Maqbool, A. (2022). A Model-Driven Framework for the Development of MVC-Based (Web) Application. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(2), 1733–1747.
14. Kipkemboi, W., Kuria, B. T., Kuria, D. N., Sichangi, A. W., Mundia, C. N., Wanjala, J. A., Rienow, A. (2023). Development of a Web-GIS Platform for Environmental Monitoring and Conservation of the Muringato Catchment in Kenya. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 7(1).
15. Christoph Gohlke. (2025). *cgohlke/tifffile: v2025.3.13 (v2025.3.13)*. *Zenodo*.
16. NumPy. Retrieved from <https://numpy.org/> (accessed October 1, 2024).
17. Yandex. Disk. Retrieved from <https://yandex.ru/dev/disk/> (accessed October 11, 2024).
18. YaDisk's documentation. Retrieved from <https://yadisk.readthedocs.io/ru/latest/> (accessed August 23, 2024).
19. Selectel. Retrieved from <https://selectel.ru/> (accessed September 22, 2024).
20. NGINX. Retrieved from <https://nginx.org/> (accessed October 19, 2024).
21. Unicorn for UNIX. Retrieved from <https://unicorn.org/> (accessed August 10, 2024).
22. Alimetov, K. (2023). Development of a secure instant messaging system. *Sbornik trudov konferentsii: Aktual'nye problemy infotelekkommunikatsiy v nauke i obrazovanii (APINO 2023 [Proceedings of the conference Actual problems of infotelec communications in science and education (APINO 2023)]* (pp. 56–50). St. Petersburg: The Bonch-Bruевич St Petersburg State University of Telecommunications [in Russian].
23. Wei, S., Liu, Y., Li, M., Huang, H., Zheng, X., & Guan, L. (2023). DCCaps-UNet: A U-Shaped Hyperspectral Semantic Segmentation Model Based on the Depthwise Separable and Conditional Convolution Capsule Network. *Remote Sensing*, 15(12), 3177.

Об авторе

Анна Владиславовна Трофимова – аспирант ЦОП ФАКТ, инженер лаборатории высокоточных систем ориентации.

Author details

Anna V. Trofimova – Ph. D. Student, Engineer, Laboratory of High-Precision Orientation Systems.

Получено / Received 30.07.2025

Поступила после рецензирования / Revised 28.10.2025

Принята к публикации / Accepted 11.03.2026