

УДК 004.4:528.87

DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-3-72-82

Исследование возможности применения свободного программного обеспечения для получения тематической информации по многоспектральным космическим снимкам

А. С. Гордиенко¹✉, В. В. Дедкова¹

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: a.s.gordienko@sgugit.ru

Аннотация. В статье рассматривается вопрос возможности перехода от коммерческого программного обеспечения к свободному, так как в настоящее время остро встает вопрос о замене коммерческих зарубежных программ их отечественными аналогами либо свободно распространяемыми программными продуктами. Выполнен анализ функциональных возможностей современного программного обеспечения для тематической обработки космических снимков. Выявлен минимальный набор необходимых операций, к которым относятся: географическая привязка снимков, предварительная обработка (работа с гистрограммой, фильтрация, атмосферная коррекция и др.), вычисление индексных изображений, преобразование по методу главных компонент, автоматизированная классификация без обучения и с обучением, пост-классификационная обработка. Проведены эксперименты по проверке алгоритмов исследуемых программ (QGIS, SAGA GIS, Orfeo ToolBox, GRASS) для получения тематической информации по многоспектральным космическим снимкам. Сделан вывод об эффективности применения программ с открытым исходным кодом для решения тематических задач на основе данных дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: свободное программное обеспечение, тематическая обработка, космические снимки, открытый исходный код, методы обработки, плагины

Введение

Современные реалии требуют постоянной адаптации к стремительно меняющимся обстоятельствам. Отсутствие возможности приобретения лицензионной версии специализированного программного обеспечения (ПО) вынуждает искать новые ресурсы для осуществления поставленных задач. Как правило, для получения тематической информации по многоспектральным космическим снимкам и решения задач мониторинга используется коммерческое программное обеспечение ENVI, Erdas Imagine, Scanex Image Processor, IDRISI. Однако в последнее время все большую популярность в области обработки и анализа геопространственных данных получает программный продукт с открытым исходным кодом QGIS [1–7].

Для проверки данного утверждения были сформированы поисковые запросы по выяв-

лению распространенности названных программ в публикациях (название, аннотация, ключевые слова) научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU за последние пять лет. Результаты представлены на рис. 1.

Как видно из диаграммы, ПО QGIS действительно становится широко используемым программным продуктом для работы с пространственными данными. Это объясняется тем, что:

- оно является свободно распространяемым программным обеспечением;
- имеет открытый исходный код, что позволяет пользователю изменять или добавлять функции, адаптируя программу для решения собственных задач;
- имеет большое количество плагинов (plugin – подключаемый модуль), расширяющих функциональность программы;
- активно поддерживается сообществом разработчиков и пользователей из разных

стран, предоставляющих обновления и исправления ошибок.

Цель данного исследования заключается в поиске, анализе и экспериментальной проверке функциональных возможностей свободного программного обеспечения для получения тематической информации по многогоспектральным космическим снимкам.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- поиск программного обеспечения для тематической обработки данных дистанци-

онного зондирования Земли (ДДЗЗ), размещенного в свободном доступе на постоянной основе, и выполнение сравнительного анализа;

- практическое освоение навыков работы в QGIS и другом свободном ПО на реальных данных;

- подбор необходимых инструментов и плагинов для получения тематической информации по ДДЗЗ;

- выводы и рекомендации по использованию свободного программного обеспечения.

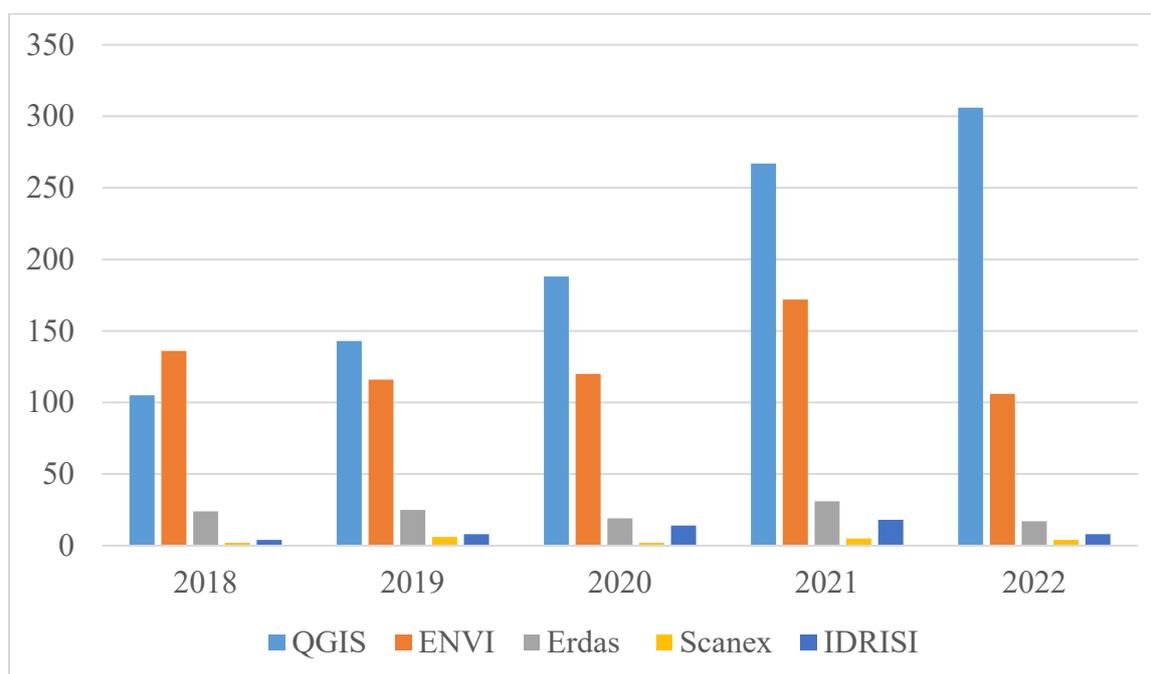


Рис. 1. Количество упоминаний программного обеспечения в системе eLIBRARY.RU

На основе анализа тематических публикаций и опыта решения производственных задач составлен перечень функций, которыми должно обладать программное обеспечение для проведения мониторинговых исследований по космическим снимкам [1, 8, 9]. К ним относятся:

- геометрическая коррекция снимков;
- предварительная обработка (работа с гистограммой, фильтрация, атмосферная коррекция и др.);
- вычисление индексных изображений;
- преобразование по методу главных компонент;

- автоматизированная классификация без обучения и с обучением;

- постклассификационная обработка;
- анализ разновременных снимков.

Методы и материалы

В ходе выполнения исследования осуществлен поиск и отбор свободно распространяемых программных продуктов, в которых реализована возможность обработки космических снимков. Выбор ПО обусловлен наличием необходимых инструментов, системными требованиями и качеством ин-

терфейса. Таким образом, в данной работе использовались программы, версии которых были актуальны на момент исследования:

- QGIS;
- SAGA GIS;
- Orfeo ToolBox;
- GRASS.

Практическое освоение навыков работы с ПО осуществлялось на наборе разновременных многоспектральных снимков PlanetScore. Выполнялась предварительная обработка, вычисление индексных изображений, преобразование по методу главных компонент, автоматизированная классификация без обучения и с обучением, постклассификационная обработка.

Результаты

Исследование заключалось в получении тематической информации по многоспектральным космическим снимкам, а также решении задач мониторинга на основе свободно распространяемых программ, анализа их возможностей и формулировки выводов и рекомендаций. На основе выполненной работы сформирован набор необходимых плагинов и инструментов.

Результаты сравнения коммерческих и свободных программных продуктов по возможности реализации основных операций в процессе обработки ДДЗЗ для получения тематической информации представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение возможностей программного обеспечения для тематической обработки ДДЗЗ

Функции ПО	ENVI	Erdas Imagine	Scanex Image Processor	IDRISI	QGIS	SAGA GIS	Orfeo ToolBox	GRASS
	Коммерческое				Бесплатное			
Геометрическая коррекция	+	+	+	+	+	+	+	+
Предварительная обработка	+	+	+	+	+	+	+	+
Вычисление индексных изображений	+	+	+	+	+	+	+	+
Преобразование по методу главных компонент	+	+	+	+	+	+	+	+
Автоматизированная классификация без обучения и/или с обучением	+	+	+	+	+	+	+	+
Постклассификационная обработка	+	+	+	+	+	+	+	+
Работа с разновременными снимками	+	+	+	+	+	+	+	+

Как видно из табл. 1, на сегодняшний день свободно распространяемые программы по функциональности не уступают коммерческим, а отсутствие необходимости приобретения лицензий, в отличие от коммерческих, стоимость которых исчисляется сотнями тысяч рублей [10], делает их привлекательными не только для независимых исследователей, но и для производственных и научных коллективов. Стоит отметить, что QGIS, SAGA GIS, Orfeo ToolBox и GRASS имеют откры-

тый исходный код, что расширяет их возможности для решения узкоспециализированных задач, однако пользователь должен иметь навыки программирования.

QGIS – программа с открытым исходным кодом, реализованная не только как настольное, но и как серверное и веб-приложения. Настольная версия поддерживается в операционных системах Windows, Linux, Mac, BSD и Android. Также QGIS внедряется в мобильные приложения с целью использования в полевых условиях.

Основные инструменты, необходимые для получения тематической информации по многоспектральным космическим снимкам, содержатся в наборе плагинов QGIS, представленных в табл. 2 [11–15].

Результат применения плагина Semi-Automatic Classification Plugin для автоматизированной классификации с обучением по методу наименьших расстояний представлен на рис. 2 [15].

Таблица 2

Внешние плагины QGIS версии 3.34.0 для получения тематической информации по многоспектральным космическим снимкам

Название плагина	Описание
SemiAutomatic Classification Plugin	Позволяет загружать спутниковые снимки, осуществлять предварительную обработку снимков, автоматизированную классификацию с обучением методами Maximum Likelihood, Minimum Distance, Multi-Layer Perception, Random Forest, Spectral Angle Mapping, Support Vector Machine, выполнять преобразование по методу главных компонент, постобработку результатов классификации и др.
dzetsaka : Classification tool	Осуществляет автоматизированную классификацию с обучением методами Gaussian Mixture Model, Random Forest, Support Vector Machine, K-Nearest Neighbors
Neural Network MLPClassifier	Классификация при помощи полносвязных нейронных сетей
Three-D Change Detection	Обнаружение изменений между разновременными цифровыми моделями местности
One Click Raster Stacking	Быстро объединяет спектральные каналы в один файл
Index Calculator	Рассчитывает индексные изображения на основе снимков Sentinel-2
Easy Raster Splitter	Позволяет вырезать или извлекать части из растров
Deepness: Deep Neural Remote Sensing	Осуществляет сегментацию на основе глубоких нейронных сетей
DeepLearningTools	Помогает в обучении нейронных сетей
Cloud removal from Sentinel2	Убирает облака со снимков Sentinel-2
Cloud Masking	Маскировка облаков, теней от облаков, перистых облаков, аэрозолей, льда/снега и воды для снимков Landsat (4, 5, 7, 8, 9)



Рис. 2. Результат автоматизированной классификации с обучением в QGIS

SAGA – система автоматизированного геоанализа, свободное программное обеспечение с открытым исходным кодом. Данная геоинформационная система (ГИС) содержит необходимый набор инструментов (табл. 3) для темати-

ческой обработки космических снимков и интуитивно понятный интерфейс [16].

Результат автоматизированной классификации с обучением по методу наименьших расстояний в ПО SAGA представлен на рис. 3.

Таблица 3

Набор инструментов в ПО SAGA версии 9.2.0 для получения тематической информации по многоспектральным космическим снимкам

Название инструмента	Описание
Supervised Image Classification	Осуществляет автоматизированную классификацию методами: двоичное кодирование, параллелепипедов, минимального расстояния, расстояния Махаланобиса, максимального правдоподобия, спектрального угла
ISODATA Clustering for Grids	Осуществляет классификацию без обучения методом Iterative Self-Organizing Data Analysis Techniques
K-Means Clustering for Grids	Осуществляет классификацию без обучения методом K-Means
Vegetation Index (Distance Based)	Осуществляет вычисление индексов: Perpendicular Vegetation Index (Richardson and Wiegand, 1977), Perpendicular Vegetation Index (Perry and Lautenschlager, 1984), Perpendicular Vegetation Index (Walther and Shabaani), Perpendicular Vegetation Index (Qi, et al., 1994), Transformed Soil Adjusted Vegetation Index (Baret et al. 1989), Transformed Soil Adjusted Vegetation Index (Baret and Guyot, 1991)
Vegetation Index (Slope Based)	Осуществляет вычисление индексов: Difference Vegetation Index, Normalized Difference Vegetation Index, Ratio Vegetation Index, Normalized Ratio Vegetation Index, Transformed Vegetation Index, Corrected Transformed Vegetation Index, Thiam's Transformed Vegetation Index, Soil Adjusted Vegetation Index
Tasseled Cap Transformation	Осуществляет преобразование снимков Landsat Thematic Mapper по методу Tasseled Cap
Principal Component Analysis	Осуществляет преобразование по методу главных компонент
Artificial Neural Network Classification	Выполняет автоматизированную классификацию с помощью нейронных сетей



Рис. 3. Результат автоматизированной классификации с обучением в ПО SAGA

Помимо стандартных операций в SAGA содержится уникальный набор инструментов для геолого-геофизических исследований, которых нет в большинстве программ ГИС. Изучение данных функций является темой для отдельного исследования [16].

Orfeo ToolBox (ОТВ) – геоинформационная система с открытым исходным кодом, содержит широкий спектр инструментов по обра-

ботке данных дистанционного зондирования. ОТВ доступен для операционных систем Linux, macOS и Windows, постоянно обновляется и тщательно документирован. Инструменты, полезные при обработке ДДЗЗ, представлены в табл. 4 [17].

Пример интерфейса ПО Orfeo ToolBox и результат классификации представлены на рис. 4.

Таблица 4

Набор инструментов в ПО Orfeo ToolBox версии 8.1.2 для получения тематической информации по многоспектральным космическим снимкам

Название инструмента	Описание
ImageClassifier	Реализует автоматизированную классификацию с помощью методов LibSVM, KNearestNeighbors, NeuralNetwork, RandomForest, Support Vector Machines (SVM)
KMeansClassification	Осуществляет неконтролируемую классификацию изображений методом KMeans
SOMClassification	Осуществляет классификацию на основе нейронных сетей Кохонена
MultivariateAlterationDetector	Выявляет изменения по методу Multivariate Alteration Detector (MAD)
DimensionalityReduction	Выполняет преобразование по методу главных компонент и независимых компонент
RadiometricIndices	Осуществляет расчет индексных изображений: NDVI, TNDVI, RVI, SAVI, TSAVI, MSAVI, MSAVI2, GEMI, IPVI, LAIFromNDVILog, LAIFromReflLinear, LAIFromNDVIFormo, NDWI, NDWI2, MNDWI, NDTI, RI, CI, BI, BI2, ISU

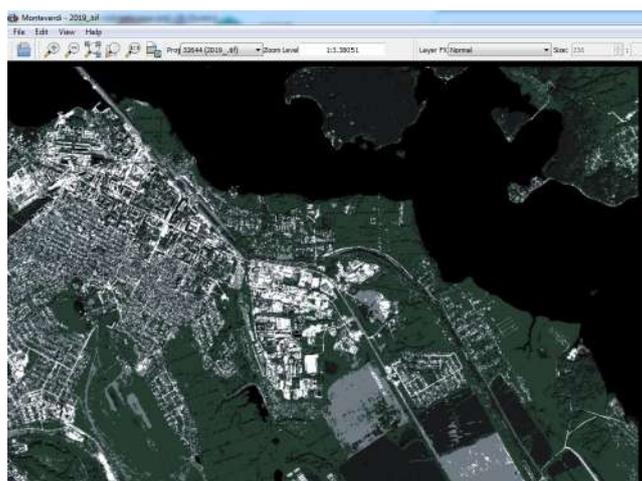


Рис. 4. Результат автоматизированной классификации в программе Orfeo ToolBox

GRASS GIS – это геоинформационная система с открытым исходным кодом, которая ра-

ботает с векторными и растровыми геопространственными данными, а также осуществ-

ляет пространственное моделирование и визуализацию. GRASS GIS включает более 500 модулей, с помощью которых возможно осуществлять коррекцию изображений, расчет главных компонент, индексных изображений и классификацию. Нужно отметить, что интерфейс системы непривычен и требует больше времени для освоения, чем описанные выше, но большое количество руководств и учебников

подробно описывает работу в данной ГИС. В табл. 5 приведены некоторые функции для работы с космическими снимками [18].

Пример интерфейса GRASS GIS 8.3.1 и результат классификации представлены на рис. 5.

Следует отметить, что программы SAGA, Orfeo ToolBox и GRASS могут быть интегрированы в QGIS [11, 16–18].

Таблица 5

Набор инструментов в GRASS GIS версии 8.3.1 для получения тематической информации по многоспектральным космическим снимкам

Название инструмента	Описание
i.cluster	С помощью алгоритма кластеризации (K-means) генерирует спектральные признаки для различных типов объектов на изображении
i.pca	Выполняет преобразование по методу главных компонент
i.tasscap	Выполняет преобразование Tasseled Cap
g.gui.iclass	Генерирует спектральные характеристики изображения, позволяя пользователю выделять области интереса
i.gensig	Генерирует статистику для алгоритма i.maxlik на основе растровой карты
i.maxlik	Выполняет классификацию на основе алгоритма максимального правдоподобия
i.gensigset	Генерирует статистику для алгоритма i.smap из растровой карты
i.smap	Выполняет классификацию изображений по методу sequential maximum a posteriori (SMAP)
i.vi	Рассчитывает индексные изображения: ARVI, CI, DVI, EVI, EVI2, GARI, GEMI, GVI, IPVI, MSAVI2, MSAVI, NDVI, NDWI, PVI, RVI, SAVI, SR, WDV

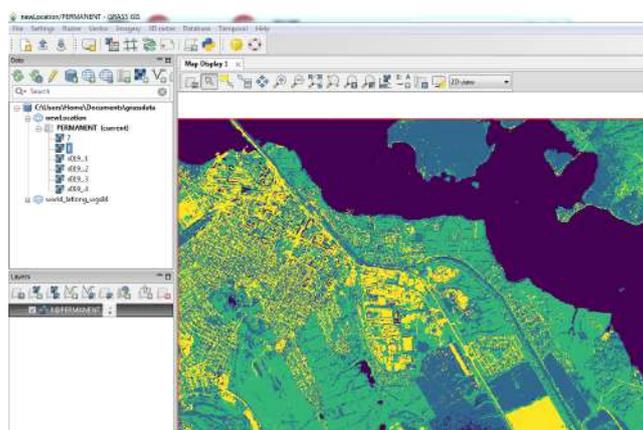


Рис. 5. Результат автоматизированной классификации в программе GRASS GIS 8.3.1

Обсуждение

Анализ набора инструментов для получения тематической информации по многоспек-

тральным космическим снимкам рассматриваемого в данной статье программного обеспечения показал, что функциональные способности свободного ПО в большинстве слу-

чаев превышают возможности коммерческого. Например, в QGIS есть несколько плагинов, основанных на алгоритмах искусственного интеллекта и машинного обучения (SemiAutomatic Classification Plugin, Neural Network MLPClassifier, Deepness: Deep Neural Remote Sensing и др.). Orfeo ToolBox выделяется наличием редкого алгоритма объектно ориентированного анализа изображений – Large-Scale Mean-Shift segmentation (LSMC).

Но следует отметить, что, например, в GRASS GIS и Orfeo ToolBox набор стандартных инструментов для автоматизированной классификации существенно меньше, чем в SAGA и QGIS (см. табл. 2–5).

Среди преимуществ свободного программного обеспечения с открытым исходным кодом следует выделить:

- использование без приобретения лицензии;
- совместимость с разными операционными системами;
- обширный набор инструментов и функций;
- возможность программировать и внедрять собственные алгоритмы;
- высокая степень интеграции.

К слабым сторонам использования некоммерческого ПО относятся:

- непредвиденные сбои в работе плагинов и инструментов;
- нехватка или отсутствие подробной документации с описанием работы алгоритмов программы и методик их использования;
- интерфейс ПО не всегда русифицирован.

Частое обновление версий свободного программного обеспечения является как пре-

имуществом, так и своего рода недостатком, влияющим на стабильность функционирования ПО и отдельных плагинов. Вместе с обновлением могут меняться системные требования, и для полноценной работы требуется установка дополнительных компонентов, таких как библиотеки, расширения и т. п.

Заключение

В ходе исследования установлено, что свободное программное обеспечение может быть использовано в целях обработки данных дистанционного зондирования Земли, в том числе для получения тематической информации по многоспектральным космическим снимкам, и выступает полноценной альтернативой коммерческим программным продуктам.

Для успешного решения поставленных задач и получения корректных результатов необходимо заранее осваивать технологию обработки данных, подбирать и устанавливать необходимые компоненты, так как зачастую разработчики программируют модули в соответствии с личным заданием, что влияет на операционные возможности (в сравнении с коммерческими программами, в которых задачи решаются на основе традиционных методов и приемов). Кроме обработки данных дистанционного зондирования в исследуемых программах имеются наборы инструментов для ГИС-анализа и картографирования.

Дальнейшее развитие исследования авторы видят в углубленном изучении и детальном представлении этапов методики обработки данных дистанционного зондирования в свободном ПО.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Navin Sam M., Agilandeewari L. Comprehensive review on land use/land cover change classification in remote sensing [Electronic resource] // Journal of Spectral Imaging. – 2020. – Vol. 9. – P. a8. – Mode of access: https://www.impopen.com/jsi-abstract/I09_a8 (дата обращения 20.10.2023).
2. Белоусов А. О., Богданов В. Л. Технология создания цифровой карты сельскохозяйственных угодий на территории сельскохозяйственных организаций Ленинградской области с применением QGIS // Геодезия и картография. – 2022. – Т. 83, № 12. – С. 40–48.
3. Карпик А. П., Мареев А. В., Мамаев Д. С. Свободное программное обеспечение для геодезического мониторинга Moncenter // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 5. – С. 43–54.

4. Крюков С. М., Ершов А. В. Анализ возможностей применения геоинформационной системы QGIS в землеустроительных и кадастровых работах // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения : сб. материалов IV Национальной научно-практической конференции, 17–19 ноября 2020 г., Новосибирск. В 3 ч. – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. Ч. 2. – С. 180–185.
5. Купцова О. В. Дешифрирование разломов юго-западной части острова Сахалин // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 1. – С. 52–60.
6. Латкин В. А. Применение цифровых технологий для определения свойств растительного покрова в сельском хозяйстве // Геодезия и картография. – 2023. – Т. 84, № 4. – С. 20–27.
7. Шевчук С. О., Малютина К. И., Липатников Л. А. Перспективы использования свободного программного обеспечения для постобработки ГНСС-измерений // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 65–84.
8. Цыгулев К. С., Дубров М. Р. Методы компьютерной классификации для изучения состояния территории горных работ по данным ДЗЗ // Far East Math – 2022 : материалы национальной научной конференции (Хабаровск, 22–26 ноября 2022 г.). – Хабаровск : Тихоокеанский государственный университет, 2022. – С. 167–173.
9. Шелепов Л. К., Поляков А. Н. Выбор геоинформационной системы для анализа серии спутниковых снимков с целью классификации с.-х. полей // Far East Math – 2022 : материалы национальной научной конференции (Хабаровск, 22–26 ноября 2022 г.). – Хабаровск : Тихоокеанский государственный университет, 2022. – С. 174–180.
10. ScanEx Image Processor [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.scanex.ru/software/obrabotka-izobrazheniy/scanex-image-processor> (дата обращения: 29.10.2023).
11. QGIS. Documentation [Electronic resource]. – Mode of access: <https://qgis.org/ru/docs/index.html> (accessed 10.10. 2023).
12. Podolskaia E. S. Review of Open Source QGIS forestry plugins // Forest Science Issues. – 2022. – Vol. 5, № 1. – P. 70–81.
13. Мясоедова В. А. Сравнение геоинформационных систем для создания и анализа геопространственной информации // Modern Science. – 2021. – № 3–1. – С. 443–448.
14. Дунаева А. В. Обзор общедоступных инструментов для сегментации объектов на спутниковых снимках // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы IX Международной научной конференции (Красноярск, 13–16 сентября 2022 г.). – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2022. – С. 105–108.
15. Congedo L. Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS // Journal of Open Source Software. – 2021. – Vol. 6, № 64. – P. 3172.
16. SAGA. System for Automated Geoscientific Analyses [Electronic resource]. – Mode of access: <https://saga-gis.sourceforge.io/en/index.html> (accessed 20.09. 2023).
17. Orfeo ToolBox [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.orfeo-toolbox.org> (accessed 31.08.2023).
18. GRASS GIS [Electronic resource]. – Mode of access: <https://grass.osgeo.org> (accessed 15.09.2023).

Об авторах

Антонина Сергеевна Гордиенко – кандидат технических наук, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования.

Валерия Вячеславовна Дедкова – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования.

Получено 20.11.2023

© А. С. Гордиенко, В. В. Дедкова, 2024

Study of the possibility of using free software to obtain thematic information from multispectral satellite images

A. S. Gordienko^{1✉}, V. V. Dedkova¹

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: a.s.gordienko@sgugit.ru

Abstract. The article examines the issue of the possibility of transition from commercial software to free software, since currently the question of replacing commercial foreign programs with their domestic analogues or freely distributed software products is acute. An analysis of the functionality of modern software for thematic processing of space images has been carried out. A minimum set of necessary operations has been identified, which include: georeferencing of images, pre-processing (working with a histogram, filtering, atmospheric correction, etc.), calculation of index images, transformation using the principal component method, automated classification without and with training, post-classification processing. Experiments were carried out to test the algorithms of the programs under study (QGIS, SAGA GIS, Orfeo ToolBox, GRASS) to obtain thematic information on multispectral satellite images. A conclusion is drawn about the effectiveness of using open source programs for solving thematic problems based on Earth remote sensing data.

Keywords: free software, thematic processing, space images, open source code, processing methods, plugin

REFERENCES

1. Navin, Sam M., & Agilandeewari, L. (2020). Comprehensive review on land use/land cover change classification in remote sensing. *Journal of Spectral Imaging*, 9, a8. Retrieved from https://www.impopen.com/jsi-abstract/I09_a8 (accessed October 20, 2023).
2. Belousov, A. O., Bogdanov, V. L. (2022). Technology for creating a digital map of cultivated land in the territory of agricultural enterprises of the Leningrad oblast using QGIS. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 12(83), 40–48 [in Russian].
3. Karpik, A. P., Mareev, A. V., Mamaev, D. S. (2022). Free software for geodetic monitoring Moncenter. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 5(27), 43–54 [in Russian].
4. Kryukov, S. M., Ershov, A. V. (2021). Analysis of the possibilities of application of QGIS geoinformation system in land considerations and cadastre works. In *Sbornik materialov IV Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Ch. 2. Regulirovanie zemel'no-imushchestvennykh otnosheniy v Rossii: pravovoe i geoprostranstvennoe obespechenie, otsenka nedvizhimosti, ekologiya, tekhnologicheskie resheniya [Proceedings of the IV National Scientific and Practical Conference: Part 2. Regulation of Land-Property Relations in Russia: Legal and Geospatial Support, Property Valuation, Ecology, Technological Solutions]* (pp. 180–185). Novosibirsk: SSUGT Publ.
5. Kuptsova, O. V. (2022). Decoding of faults in the southwestern part of Sakhalin Island. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(27), 52–60 [in Russian].
6. Latkin, V. A. (2023). Application of digital technologies to determine the properties of vegetation cover in agriculture. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 4(84), 20–27 [in Russian].
7. Shevchuk, S. O., Malyutina, K. I., Lipatnikov, L. A. (2018). Prospects of using free software for GNSS measurements postprocessing. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(23), 65–84 [in Russian].
8. Tsygulev, K. S., Dubrov, M. R. (2022). Computer classification methods for studying the state of the mining area according to remote sensing data. In *Sbornik materialov natsional'noy nauchnoy*

konferentsii: Far East Math – 2022 [Proceedings of the National Scientific Conference: Far East Math – 2022] (pp. 167–173). Khabarovsk [in Russian].

9. Shelepov, L. K., Polyakov, A. N. (2022). Choosing a geoinformation system for analyzing a series of satellite images in order to classify agricultural fields. In *Sbornik materialov natsional'noy nauchnoy konferentsii: Far East Math – 2022 [Proceedings of the National Scientific Conference: Far East Math – 2022]* (pp. 174–180). Khabarovsk [in Russian].

10. ScanEx Image Processor. (2023). Retrieved from <https://www.scanex.ru/software/obrabotka-izobrazheniy/scanex-image-processor> (accessed October 29, 2023) [in Russian].

11. QGIS. Documentation. (2023). Retrieved from <https://qgis.org/ru/docs/index.html> (accessed October 10, 2023).

12. Podolskaia, E. S. (2022). Review of Open Source QGIS forestry plugins. *Forest Science Issues*, 1(5), 70–81.

13. Myasoedova, V. A. (2021). Comparison of geoinformation systems for the creation and analysis of geospatial information. *Modern Science*, 3–1, 443–448 [in Russian].

14. Dunaeva, A. V. (2022). Overview of open-source tools for semantic segmentation in satellite imagery. In *Sbornik materialov VII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: Regional'nye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Proceedings of the IX International Scientific Conference: Regional Problems of Remote Sensing of the Earth]* (pp. 105–108). Krasnoyarsk [in Russian].

15. Congedo, L., (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172.

16. SAGA. System for Automated Geoscientific. (2023). Retrieved from <https://saga-gis.sourceforge.io/en/index.html> (accessed September 20, 2023).

17. Orfeo ToolBox. (2023). Retrieved from <https://www.orfeo-toolbox.org> (accessed August 31, 2023).

18. GRASS GIS. (2023). Retrieved from <https://grass.osgeo.org> (accessed September 15, 2023).

Author details

Antonina S. Gordienko – Ph. D., Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing.

Valeriya V. Dedkova – Ph. D., Senior Lecturer, Department of Photogrammetry and Remote Sensing.

Received 20.11.2023

© A. S. Gordienko, V. V. Dedkova, 2024