

АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ ВАРИАНТОВ СИНТЕЗА МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ SENTINEL-2 ПРИ ДЕШИФРИРОВАНИИ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В СРЕДЕ ГИС

Н. А. Шестаков

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, shastakou23@gmail.com*

В работе представлены результаты анализа информативности различных вариантов синтеза мультиспектральных спутниковых изображений Sentinel-2 (MSI) на примере 11 спектральных каналов (каналы 2–8A, 10–12) и их 24 комбинаций, применяемых при дешифрировании природных и антропогенных объектов. Подготовка и анализ спутниковых изображений осуществлялись в ENVI 5.6. По результатам сформирован набор синтезированных изображений для 4-х классов объектов.

Ключевые слова: данные ДЗЗ; анализ изображения; ГИС; мультиспектральные данные; Sentinel-2; спектральные каналы; спектральная отражательная способность; дешифрирование; природные объекты; антропогенные объекты.

ANALYSIS OF THE INFORMATIVITY OF SYNTHESIS VARIANTS OF SENTINEL-2 MULTISPECTRAL SATELLITE IMAGES TO THE INTERPRETATION OF THE NATURAL AND ANTHROPOGENIC OBJECTS IN GIS

N. A. Shestakov

*Belarusian State University, Niezaliežnasci Av., 4,
220030, Minsk, Belarus, shastakou23@gmail.com*

The article presents the results of the analysis of the informativity of the various synthesis options of Sentinel-2 (MSI) multispectral satellite images on the example of 11 spectral bands (bands 2–8A, 10–12) and their 24 combinations used to the interpretation of the natural and anthropogenic objects. The set of synthesized images for four classes of objects was formed based on the results of the work.

Keywords: remote sensing data; image analysis; GIS; multispectral data; Sentinel-2; spectral bands; spectral reflectance; interpretation; natural objects; anthropogenic objects.

Введение. В современных аэрокосмических исследованиях Земли ведущее место занимают многозональные (мульти- и гиперспектральные) съёмки, принцип которых основан на одновременном фиксировании излучения объектов земной поверхности в различных участках электромагнитного спектра

и выявлении различий в их спектральной яркости. *Спектральная отражательная способность* является одной из главных характеристик объектов (дешифровочных признаков), непосредственно проявляющихся на данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), и выступает основой для их распознавания по материалам многозональных съёмок. Знание спектральных свойств исследуемых объектов даёт возможность правильно и эффективно применять аэрокосмические снимки для получения достоверных результатов дешифрирования и составления картографического материала [1–3].

Ход работы. Цель исследования состояла в анализе изобразительных и информативных свойств зональных и мультиспектральных снимков Sentinel-2 в различных вариантах синтеза изображения, применяемых при дешифрировании природных и антропогенных объектов.

Объект и территория исследования. Для выполнения анализа выбрана территория ландшафтного заказника «Озёры», расположенного в Гродненском и Щучинском районах Гродненской области (район Средненёманская низменность округа Понёманье Западно-Белорусской провинции).

В качестве объекта исследования выступали природные и антропогенные образования (объекты), представленные на территории заказника и объединённые в 4 общих класса: 1 класс – водные объекты; 2 класс – растительный покров: лесной покров (лесная и древесно-кустарниковая растительность) и травяной покров (луговая растительность, сельскохозяйственные культуры); 3 класс – почвенный покров и грунты; 4 класс – искусственные поверхности (дороги с искусственным покрытием, здания и сооружения).

Исходные данные ДЗЗ. В качестве исходных данных ДЗЗ были использованы мультиспектральные спутниковые данные, полученные с космического аппарата Sentinel-2A, оснащённого сенсором MultiSpectral Instrument (MSI) [4]. В работе использован снимок Sentinel-2A (MSI), полученный на территорию заказника 26.06.2023 г. (рисунок 1, таблица 1).



Рис. 1. Изображение территории ландшафтного заказника «Озёры» на снимке Sentinel-2A (MSI) за 26.06.2023 г. в синтезе каналов 4-3-2 (слева) и 8-4-3 (справа)

Таблица 1

Параметры мультиспектрального спутникового изображения Sentinel-2A (MSI)

Канал съёмки	$\lambda_{\text{центр}}$, $\mu\text{км}^*$	Спектральная зона	м/пиксель**
Band 1 (Coastal Aerosol)	0,443	сине-фиолетовая	60
Band 2 (Blue)	0,490	синяя	10
Band 3 (Green)	0,560	зелёная	10
Band 4 (Red)	0,665	красная	10
Band 5 (Vegetation Red Edge)	0,705	красная – ближняя ИК	20
Band 6 (Vegetation Red Edge)	0,740		20
Band 7 (Vegetation Red Edge)	0,783		20
Band 8 (NIR)	0,842	ближняя ИК	10
Band 8A (Vegetation Red Edge)	0,865	ближняя ИК	20
Band 10 (SWIR–Cirrus)	1,375	средняя ИК	60
Band 11 (SWIR)	1,610	средняя ИК	20
Band 12 (SWIR)	2,190	средняя ИК	20
Дата съёмки: 26.06.2023 г.			
Система координат, проекция: WGS-84, UTM (Zone 35N)			
* – спектральное разрешение; ** – пространственное разрешение			

Цифровая обработка космических снимков Sentinel-2 включала подготовку, синтез изображений, а также формирование набора синтезированных изображений и проводилась в программном комплексе ENVI (версия 5.6) [5].

Анализ изобразительных и информативных свойств снимков Sentinel-2 осуществлялся в разрезе 4-х классов объектов в два приёма:

1) дешифрирование объектов *по серии зональных снимков* – одноканальные ахроматические изображения, полученные в результате съёмки в 12 каналах (каналы 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 8A, 10, 11, 12);

2) дешифрирование объектов *по цветным синтезированным изображениям* в «естественных» и «искусственных цветах» (24 варианта синтеза).

Выбор вариантов синтеза основывался на обзоре литературы, посвящённой вопросам дешифрирования и интерпретации объектов и явлений географической среды по материалам многозональных съёмок, а также анализе спектральных свойств объектов, относящихся к разным спектральным классам. В частности, в ряде источников [1–3] рассматриваются наиболее часто употребляемые варианты синтеза на примере мультиспектральных данных Landsat с более низким пространственным (15–30 м/пиксель) и спектральным (7–8 каналов) разрешением. Выполнение многозональных съёмок аппаратами Sentinel-2 сразу в 13 спектральных каналах позволяет создавать значительно больше вариантов синтеза изображений, что является преимуществом наряду с более высоким пространственным разрешением данных Sentinel-2 для отдельных каналов (10–20 м/пиксель) [6].

Результаты. В ходе анализа изобразительных и информативных свойств снимков Sentinel-2 по 4-м классам объектов были получены *наборы*

зональных (12 каналов) и синтезированных (24 комбинации каналов) изображений для каждого класса объекта с указанием названия каналов, условия синтеза цветных изображений, длины волны центра диапазона съёмки (в мкм), пространственного разрешения (в м/пиксель) и даты съёмки.

Для синтезируемых в программной среде ENVI спутниковых изображений применялись настройки параметров яркости (50–80 %) и контрастности («Linear 2 %») с целью повышения информативности снимков.

Фрагменты наборов зональных и синтезированных изображений Sentinel-2A для 4-х классов природных и антропогенных объектов приведены на рисунках 2 и 3–4 соответственно. Полные наборы зональных и синтезированных изображений Sentinel-2 доступны по ссылке: <https://drive.google.com/drive/folders/1NVsgj19KhNUdf6-KYEx-Xij5Gr9n7TvM>.

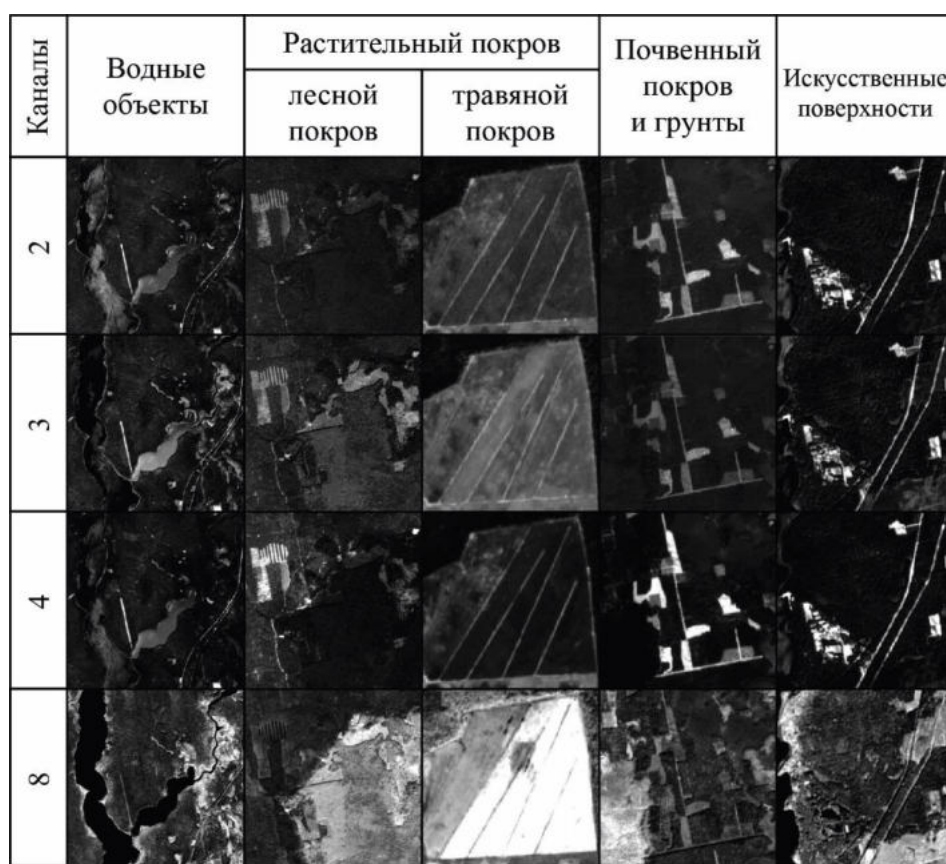


Рис. 2. Изображение основных классов природных и антропогенных объектов на зональных (одноканальных) снимках Sentinel-2A (MSI), 10 м/пиксель (фрагмент набора изображений).

Источники: [1–3, 6]

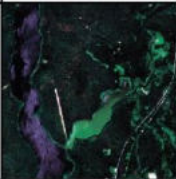
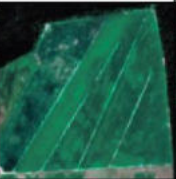
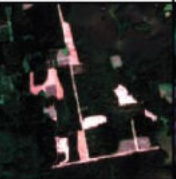
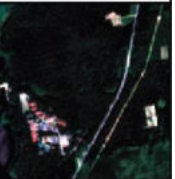
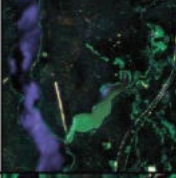
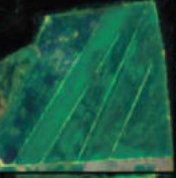
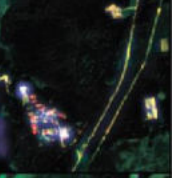
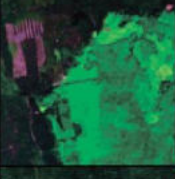
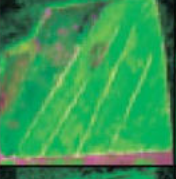
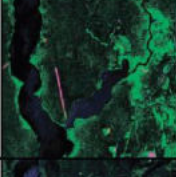
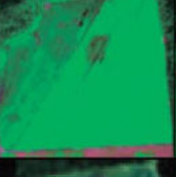
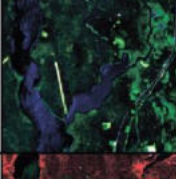
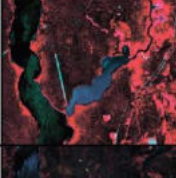
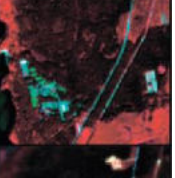
Каналы	Водные объекты	Растительный покров		Почвенный покров и грунты	Искусственные поверхности
		лесной покров	травяной покров		
4-3-2					
4-3-1					
5-6-2					
12-8-4					
12-11-2					
8-4-3					
11-4-2					

Рис. 3. Изображение основных классов природных и антропогенных объектов на мультиспектральных снимках Sentinel-2A (MSI) в различных вариантах синтеза спектральных каналов (фрагмент набора изображений, часть 1).

Источники: [1–3, 6]

Каналы	Водные объекты	Растительный покров		Почвенный покров и грунты	Искусственные поверхности
		лесной покров	травяной покров		
5-4-3					
8-4-8					
7-6-4					
7-6-5					
12-11-8A					
6-5-2					
7-5-3					
8-11-12					

Рис. 4. Изображение основных классов природных и антропогенных объектов на мультиспектральных снимках Sentinel-2A (MSI) в различных вариантах синтеза спектральных каналов (фрагмент набора изображений, часть 2).

Источники: [1–3, 6]

Дешифрирование объектов по серии зональных снимков. Анализ 12 зональных снимков Sentinel-2 позволил установить основные закономерности отображения объектов в различных зонах спектра, а также произвести оценку информативности отдельных спектральных каналов при распознавании объектов (таблица 2).

Таблица 2

**Оценка информативности спектральных каналов Sentinel-2
при дешифрировании природных и антропогенных объектов**

Классы и типы объектов	Спектральные каналы Sentinel-2											
	1	2	3	4	5	6	7	8	8A	10	11	12
1. Водные объекты												
береговая линия	×	×	×	×	×	+	+	+	+	+	+	×
батиметрия	×	+	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–
2. Растительный покров												
типы растительности	×	+	+	+	+	×	×	+	×	×	×	×
типы леса	–	–	×	+	–	+	+	+	+	×	×	×
лесные породы	–	–	–	×	–	–	–	+	×	–	–	–
лесные рубки	–	+	+	+	+	×	×	+	×	×	+	+
сельхозкультуры	–	–	×	×	×	+	+	+	+	×	×	×
3. Почвенный покров и грунты												
почвенные контуры	×	+	+	+	+	×	×	+	×	×	+	+
почвенные различия	–	+	+	+	+	×	×	×	–	–	+	+
грунтовые дороги	×	+	+	+	+	×	×	+	+	–	+	+
4. Искусственные поверхности												
дороги	×	+	+	+	×	–	–	×	–	–	×	×
застройка	×	+	+	+	×	–	–	–	–	–	×	×
«+» – объекты дешифрируются уверенно					10 м/пиксель (высокая детализация)							
«×					20 м/пиксель (средняя детализация)							
«–» – объекты не дешифрируются					60 м/пиксель (низкая детализация)							

Таким образом, определяющую роль при дешифрировании объектов помимо спектрального разрешения данных ДЗЗ играет также пространственное разрешение.

Дешифрирование объектов по цветным синтезированным изображениям. В результате анализа 24 вариантов синтезированных изображений Sentinel-2 выделены 6 групп схожих по преобладающим цветам комбинаций каналов и установлены основные закономерности отображения на снимке объектов в каждом варианте синтеза (таблица 3).

Таблица 3

**Возможности дешифрирования природных и антропогенных объектов
на мультиспектральных снимках Sentinel-2 в различных вариантах
синтеза спектральных каналов**

Каналы	Закономерности изображения объектов на синтезированном снимке
4-3-2 4-3-1	<i>«Естественные и близкие к естественным цвета».</i> Задействуются каналы видимого диапазона (1–4). Объекты земной поверхности выглядят похожими на то, как они воспринимаются человеческим глазом. Водные объекты выглядят синими, здоровая растительность – зелёной, убранные поля – светло-серыми и желтоватыми, почвы и грунты – коричневыми, искусственные поверхности (асфальт, бетон, крыши зданий) – серыми и иными цветами (красные, синие крыши – в зависимости от материала). Дешифрируются типы растительного покрова, но не всегда уверенно. Редколесья, заросшие рубки детектируются плохо. Слабо различаются мелководья и прибрежные пески, заросшие водоёмы сливаются с растительностью. На снимке в синтезе каналов 4-3-1 присутствует дымка (выгодно использовать при дешифрировании облаков, туманов, пожаров и задымлений, однако затрудняется дешифрирование основных объектов местности).
5-6-2 5-6-4 11-8-2 11-8-4 12-8-2 12-8-3 12-8-4 12-8A-4 12-11-2 12-11-4	<i>«Зелёные цвета».</i> Самая обширная по числу вариантов синтеза группа. Используются каналы в видимом, ближнем и среднем ИК-диапазонах (2–6, 8, 8A, 11, 12). Ряд комбинаций формирует практически идентичные изображения. Водные объекты изображаются ярко-синими – почти чёрными, а в вариантах синтеза 5-6-2 и 5-6-4 – сине-фиолетовыми и без труда распознаются (включая мелководья и заросшие участки). Береговая линия просматривается чётко. Здоровая растительность изображена ярко-зелёным (леса и кустарники) и салатовым (травяной покров) цветом. Уверено дешифрируются типы леса. Открытые почвы, рубки, следы лесных пожаров, дороги, здания и сооружения заметно выделяются на фоне растительности и водных объектов, изображаясь ярко-розовым, лиловым и сиреневым цветом (кроме вариантов синтеза 12-11-2 и 12-11-4).
8-4-3 11-4-2	<i>«Красные цвета».</i> Задействованы каналы видимого (2–4) и ИК-диапазонов (8, 11). Комбинация каналов 8-4-3 – «стандартные искусственные цвета». Насыщенные оттенки красного являются индикаторами здоровой растительности (лиственные леса), а более светлые оттенки красного характеризуют травянистую растительность или редколесья, кустарники. Хвойные леса имеют тёмно-красный, почти коричневый окрас. Открытые участки почв, дороги, застройка отображены в оттенках бирюзового и голубого. Заметно выделяются переувлажнённые почвы (тёмный тон изображения). Водные объекты – тёмно-синие, практически чёрные.
5-4-3 8-4-8	<i>«Фиолетовые цвета».</i> Используются каналы видимого диапазона (3–5) и ближнего ИК-диапазона (8). Растительность представлена в фиолетовых цветах. Водные объекты – зеленовато-синие – почти чёрные. Почвы, грунты и искусственные поверхности отображаются светлее. Комбинация каналов 8-4-8 основана на сочетании всего 2-х каналов – красного и ближнего ИК, используемых для расчёта вегетационного индекса NDVI. Почвенный покров, дороги, здания и сооружения выгодно выделяются за счёт контраста ярко-зелёного – салатового цветов на фоне фиолетового. Легко дешифрируются дороги, населённые пункты, вырубки, почвы.
7-6-4 7-6-5	<i>«Жёлтые и синие цвета».</i> Используются каналы видимого диапазона (4–7), ближнего (8A) и среднего (11, 12) ИК-диапазона. В комбинациях каналов 7-6-4 и 7-6-5 растительные покровы изображаются жёлтым (лиственный лес и кустарники, травяной покров) и жёлто-серым (хвойный лес) цветом. Водные объекты – насыщенным синим или чёрным цветом (7-6-5). Почвы и грунты, дороги, здания и сооружения выделяются на фоне растительности голубым и синим цветом.

Каналы	Закономерности изображения объектов на синтезированном снимке
12-11-8А	В варианте синтеза 12-11-8А наблюдается инверсия в распределении цветов на снимке: растительность отображается в синих цветах (голубой цвет – травяной покров, лиственные леса и кустарники, тёмно-синий – хвойные леса), водные объекты – в чёрном цвете (не дешифрируется батиметрия), почвы, грунты, дороги и населённые пункты – в оттенках жёлтого, жёлто-зелёного.
6-5-2 7-5-3 7-5-4 8-11-4 8-11-12	«Коричневые цвета». Задействуются каналы видимого диапазона (2–7), ближнего (8) и среднего (11, 12) ИК-диапазона. Водные объекты изображены ярко-синими – почти чёрными, а в комбинации каналов 8-11-12 – полностью чёрными. Трава, кустарники, лиственные леса – в светлых оттенках оранжевого, алого и персикового цветов. Хвойные леса – насыщенные тёмно-коричневые, тёмно-красные цвета. Грунты, почвы, искусственные поверхности выгодно выделяются на фоне растительности в оттенках голубого, синего, бирюзового, зелёного цветов. Хорошо заметны не заросшие рубки. Дифференцируются почвы.

Выводы. Анализ изобразительных и информативных свойств снимков Sentinel-2, проведённый по 4-м классам природных и антропогенных объектов, позволил установить основные закономерности воспроизведения объектов на зональных и синтезированных цветных изображениях:

1. *Водные объекты* дешифрируются увереннее прочих объектов ввиду наименьшей спектральной отражательной способности среди других классов объектов. При детектировании контуров водных объектов следует рассматривать каналы ближнего и среднего ИК-диапазона, а также зоны «красного края» (каналы 6–12). Информативны будут «контрастные» варианты синтеза (8-4-3, 12-8-4, 7-6-4, 12-11-8А, 8-11-12). Для дешифрирования батиметрии необходимо использовать зональные снимки в видимом диапазоне (каналы 2–4) и варианты синтеза, включающие эти каналы (4-3-1, 8-4-3, 11-4-2).

2. Дешифрирование *растительности* базируется на знаниях закономерностей взаимодействия растений с электромагнитным излучением в различных зонах спектра – минимумы отражения в синей (каналы 1, 2) и красной зонах (каналы 4), максимумы – в зелёной (канал 3) и ближней инфракрасной зонах (каналы 8, 8А). Использование зональных снимков позволяет уверенно дешифрировать типы растительности (каналы 2–8) и типы леса (3–4, 6–8А). Дешифрирование лесных пород и видов сельскохозяйственных культур необходимо проводить на основе зональных снимков в ИК-зоне (канал 8) и синтезированных снимков с наличием 8 канала в синтезе (8-4-3, например) с высоким пространственным разрешением. Лесные рубки (не заросшие) дешифрируются как почвы (каналы 2–4, синтез каналов 5-6-4, 12-8-4, 8-4-3, 6-5-2, 7-5-3).

3. Дешифрирование *почв и грунтов* основывается на использовании каналов в видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазонах (ка-

налы 2–5, 8, 11, 12) и вариантов синтеза в «искусственных цветах» («зелёные» (5-6-4, 12-8-4), «красные» (8-4-3), «коричневые цвета» (6-5-2, 7-5-3)), где почвенные контуры заметно выделяются на фоне растительности.

4. Для дешифрирования *дорожной сети, населённых пунктов, отдельных зданий и сооружений* применительны зональные снимки в каналах 2–4, где искусственные поверхности контрастируют с тёмным насыщенным изображением растительности и водных объектов, а также синтезированные снимки, используемые при дешифрировании почв и грунтов (8-4-3, 5-6-4, 8-4-8, 6-5-2 и др.).

Таким образом, использование мультиспектральных спутниковых данных Sentinel-2 обеспечивает эффективное выполнение задач топографического и тематического дешифрирования. Наличие съёмки сразу в 13 спектральных зонах оптического диапазона (видимый и инфракрасный) позволяет получать синтезированные изображения в различных вариантах синтеза (более 20), выгодно отображающих объекты местности и их отдельные свойства (характеристики) для дешифровщика. Применение специализированного программного ГИС-обеспечения является не только функциональным преимуществом, но и необходимым условием работы специалиста с современными данными ДЗЗ.

Библиографические ссылки

1. *Тоназ А. А., Давидович Ю. С.* Использование материалов многозональной съёмки в географических исследованиях: учеб.-метод. материалы по курсу «Методы дистанционных исследований» для студентов специальностей 1-31 02 01 «География (по направлениям)», 1-33 01 02 «Геоэкология», 1-31 02 03 «Космоаэрокартография», 1-56 02 02 «Геоинформационные системы (по направлениям)». Минск : БГУ, 2022. 29 с.

2. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения : учеб. пособие / А. Н. Шихов [и др]. Пермь : ПГНИУ, 2020. 191 с.

3. Интерпретация комбинаций каналов данных Landsat TM / ETM+ [Электронный ресурс]. 2024. URL: <https://gis-lab.info/qa/landsat-bandcomb.html> (дата обращения: 01.11.2024).

4. Sentinel-2 – Missions [Electronic resources]. 2024. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (date of access: 01.11.2024).

5. ENVI 5.1. Руководство пользователя. М. : Компания «Совзонд». 2014. 242 с.

6. Sentinel-2 Bands and Combinations [Electronic resources]. 2024. URL: <https://gis-geography.com/sentinel-2-bands-combinations/> (date of access: 01.11.2024).