УДК 528.8:004.9

Эломонов Ж.Р
Научный сотрудник Самаркандского государственного
университета имени Шарофа Рашидова
Узбекистан, г. Самарканд

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ SENTINEL-2 И LANDSAT 9 ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Аннотация. В статье выполнено сравнение двух наиболее востребованных открытых источников мультиспектральных космических снимков спутниковой группировки Sentinel-2 (EKA, программа Copernicus) и спутника Landsat 9 (NASA/USGS). Сопоставлены спектральные, пространственные, временные и радиометрические характеристики систем. На основе анализа литературы и модельных расчётов определено, для каких прикладных задач предпочтительны данные каждой системы. Показано, что Sentinel-2 выигрывает в задачах, требующих высокой детальности и частоты съёмки, а Landsat 9 незаменим при оценке температуры поверхности и анализе многолетних рядов. Обоснована целесообразность совместного использования данных в виде гармонизированного продукта HLS.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, Sentinel-2, Landsat 9, мультиспектральные снимки, пространственное разрешение, мониторинг сельскохозяйственных угодий, температура поверхности, HLS.

J.R. Elomonov
Researcher, Sharof Rashidov Samarkand State University
Samarkand, Uzbekistan

COMPARATIVE ANALYSIS OF SENTINEL-2 AND LANDSAT 9 DATA FOR APPLIED EARTH REMOTE SENSING TASKS

Abstract. The article compares the two most widely used open sources of multispectral satellite imagery: the Sentinel-2 constellation (ESA, Copernicus programme) and the Landsat 9 satellite (NASA/USGS). The spectral, spatial, temporal and radiometric characteristics of the systems are compared. Based on a literature review and model calculations, the applied tasks for which each system is preferable are identified. It is shown that Sentinel-2 performs better in tasks requiring high spatial detail and frequent observations, while Landsat 9 is indispensable for land surface temperature retrieval and long-term time-series analysis. The expediency of joint use of the data in the form of the harmonized HLS product is substantiated.

Keywords: Earth remote sensing, Sentinel-2, Landsat 9, multispectral imagery, spatial resolution, agricultural monitoring, land surface temperature, HLS.

Введение

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) стали одним из основных источников информации для управления природными ресурсами, сельским хозяйством, водным хозяйством и городской средой. Особую роль играют системы, предоставляющие снимки на открытой и бесплатной основе: это снижает барьер доступа к космической информации для научных организаций, государственных органов и частного бизнеса, в том числе в странах Центральной Азии [4].

На сегодняшний день наибольшее распространение среди открытых мультиспектральных данных среднего разрешения получили снимки европейской группировки Sentinel-2 и американской программы Landsat,

последним спутником которой является Landsat 9, выведенный на орбиту 27 сентября 2021 г. [2, 12]. Обе системы работают в сходных спектральных диапазонах, однако заметно различаются по пространственному разрешению, частоте повторной съёмки, набору каналов и длительности архива. Поэтому перед специалистом, решающим конкретную прикладную задачу, закономерно возникает вопрос: данные какой системы выбрать?

Цель работы — провести сравнительный анализ характеристик Sentinel-2 и Landsat 9 и определить, в каких прикладных задачах целесообразно использовать данные каждой из систем, а в каких — их совместно.

Материалы и методы

В качестве исходных материалов использованы официальные технические описания миссий ЕКА и USGS [12, 13], а также публикации, посвящённые калибровке, сопоставлению и совместному использованию данных [1–3, 5–8, 10]. Сравнение проводилось по четырём группам параметров: спектральным (число, положение и ширина каналов), пространственным (размер пикселя, ширина полосы обзора), временным (периодичность съёмки) и радиометрическим (разрядность, точность калибровки).

Для наглядной оценки влияния пространственного разрешения построена модельная сцена сельскохозяйственного ландшафта размером 600×600 м с исходным шагом 1 м, которая затем была загрублена путём усреднения до 10 и 30 м. Частота получения безоблачных наблюдений рассчитывалась по формуле:

$$N = (365 / T) \cdot p,$$

где T — период повторной съёмки, сут.; p — вероятность безоблачной сцены (для засушливых районов Центральной Азии в вегетационный период принято $p = 0{,}7$). Пригодность систем для прикладных задач оценивалась экспертно по пятибалльной шкале с учётом

требований каждой задачи к разрешению, спектральному набору и частоте съёмки.

Результаты и обсуждение

1. Основные технические характеристики. Сводные характеристики систем приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение основных характеристик Sentinel-2 и Landsat 9

Параметр	**Sentinel-2 (MSI)**	**Landsat 9 (OLI-2 / TIRS-2)**
Оператор	ЕКА / Copernicus	NASA / USGS
Запуск	2A – 2015, 2B – 2017, 2C – 2024	27.09.2021
Высота орбиты	786 км	705 км
Время пересечения экватора	10:30	10:00
Число спектральных каналов	13	9 (OLI-2) + 2 тепловых (TIRS-2)
Пространственное разрешение	10 / 20 / 60 м	30 м; 15 м (панхром.); 100 м (тепловые)
Ширина полосы обзора	290 км	185 км
Период повторной съёмки	10 сут. (1 КА); 5 сут. (2 КА)	16 сут.; 8 сут. совместно с Landsat 8
Радиометрическое разрешение	12 бит	14 бит
Каналы red-edge	3 (B5, B6, B7)	нет
Тепловые каналы	нет	2 (10,6–11,2 и 11,5–12,5 мкм)
Архив программы	с 2015 г.	с 1972 г. (вся программа Landsat)
Стандартные продукты	L1C, L2A (отражение у поверхности)	Collection 2 Level-2 (отражение и температура поверхности)
Доступ к данным	Copernicus Data Space Ecosystem, бесплатно	USGS EarthExplorer, бесплатно

Из таблицы видно, что по большинству «оптических» параметров — разрешению, ширине полосы обзора и частоте съёмки — преимущество имеет Sentinel-2. Landsat 9, в свою очередь, обладает двумя уникальными возможностями: тепловыми каналами и преемственностью с более чем полувековым архивом Landsat. Отметим, что в январе 2025 г. спутник Sentinel-2C заменил Sentinel-2A в основной группировке, а Sentinel-2A

продолжил работу в рамках расширенной кампании, что временно увеличило частоту съёмки ряда районов [13].

2. Спектральные возможности. Расположение каналов обеих систем показано на рис. 1. Каналы видимого, ближнего (NIR) и коротковолнового инфракрасного (SWIR) диапазонов в целом совпадают, что и позволяет использовать снимки совместно [6]. Ключевые различия заключаются в следующем.

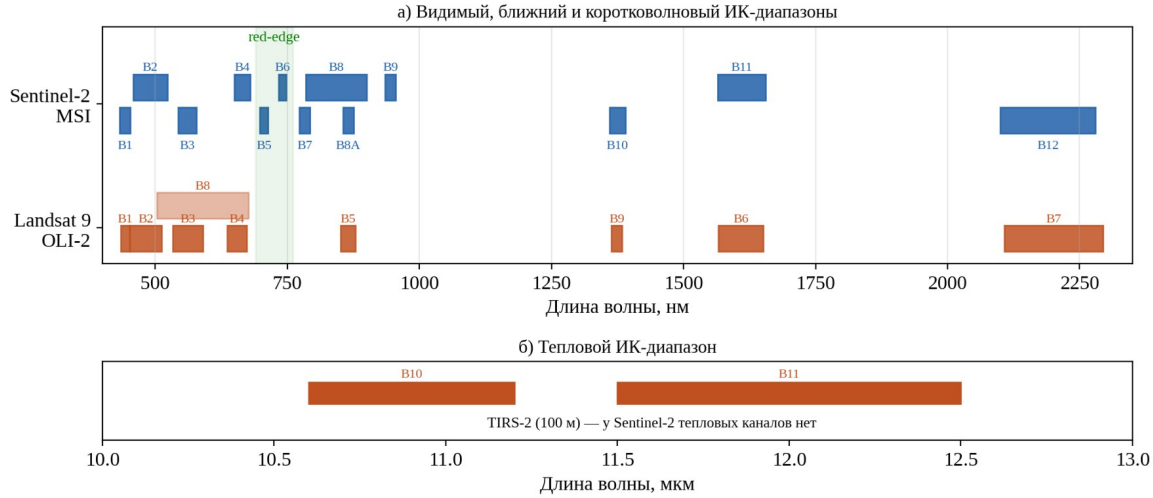


Рис. 1 – Спектральные каналы Sentinel-2 MSI и Landsat 9 OLI-2/TIRS-2 (составлено автором по [12, 13])

Во-первых, Sentinel-2 имеет три канала в области «красного края» (red-edge, 705–783 нм), где отражательная способность растительности резко возрастает. Положение и крутизна этого перехода чувствительны к содержанию хлорофилла и азота в листьях (рис. 2), поэтому индексы на основе red-edge (NDRE, CIre, MTCI) позволяют выявлять стресс растений раньше, чем классический NDVI [7]. У Landsat 9 таких каналов нет.

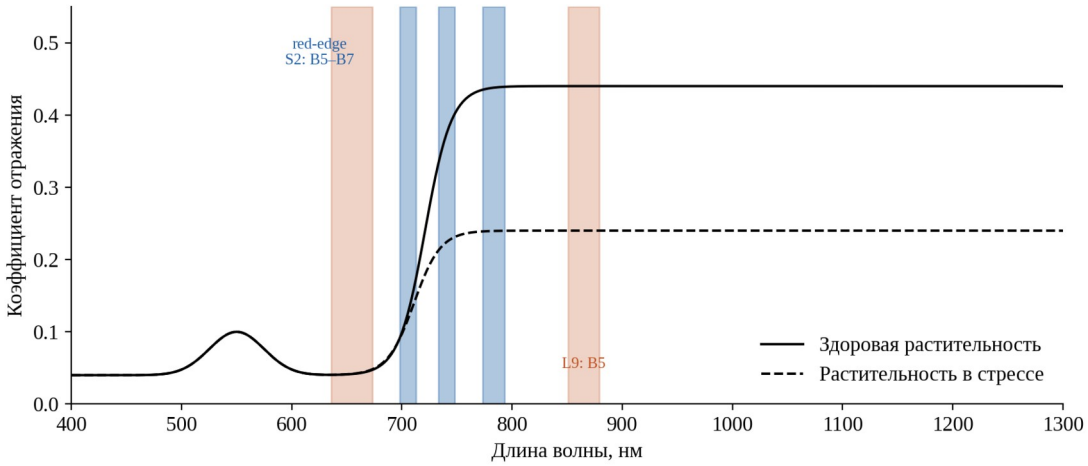


Рис. 2 – Типичные спектральные кривые растительности и положение каналов red-edge Sentinel-2 и каналов Red/NIR Landsat 9 (модельные кривые)

Во-вторых, Landsat 9 оснащён тепловым радиометром TIRS-2 с двумя каналами в окне прозрачности атмосферы 10–12,5 мкм. Это позволяет рассчитывать температуру поверхности суши (LST), а через неё — эвапотранспирацию и индексы водного стресса [9]. Sentinel-2 тепловых каналов не имеет вовсе, и для этих задач он непригоден. Кроме того, радиометрическая разрядность OLI-2 (14 бит) выше, чем у MSI (12 бит), что даёт лучшее разделение слабых сигналов над тёмными объектами — водой и густыми лесами [2].

3. Пространственное разрешение. Основные каналы Sentinel-2 (синий, зелёный, красный, NIR) имеют разрешение 10 м, т. е. на один пиксель Landsat 9 (30 м) приходится девять пикселей Sentinel-2. Результат моделирования приведён на рис. 3.

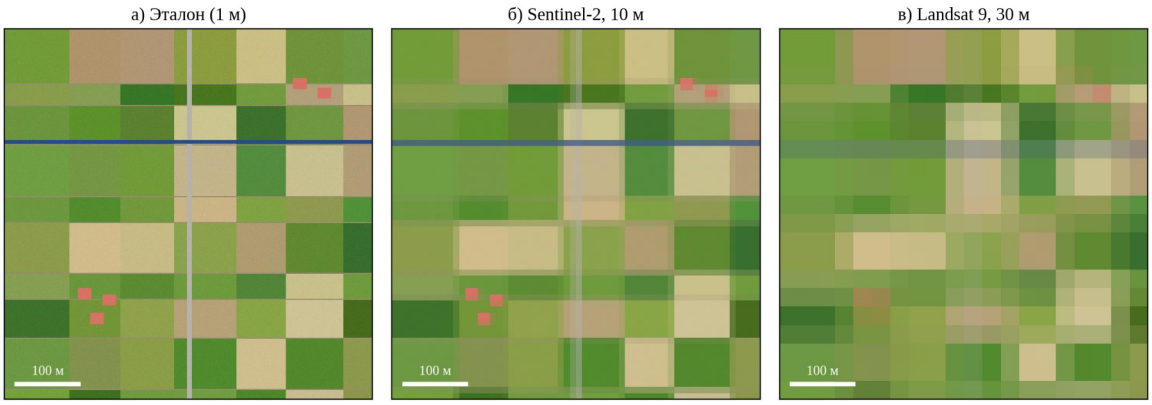


Рис. 3 – Модельная сцена сельскохозяйственного ландшафта: а) эталон 1 м; б) загрубление до 10 м (Sentinel-2); в) загрубление до 30 м (Landsat 9)

На изображении с разрешением 10 м сохраняются границы полей, оросительный канал шириной 6 м и отдельные постройки, тогда как при разрешении 30 м узкие линейные объекты «растворяются», а доля смешанных пикселей на границах полей резко возрастает. Для территорий с мелкоконтурным землепользованием, характерным для орошаемых районов Узбекистана (Ферганская долина, Ташкентский и Самаркандский оазисы), это различие особенно существенно: при средней площади контура в 1–3 га данные 30 м дают лишь несколько «чистых» пикселей на поле.

4. Временное разрешение. Результаты расчёта числа наблюдений в год представлены на рис. 4.

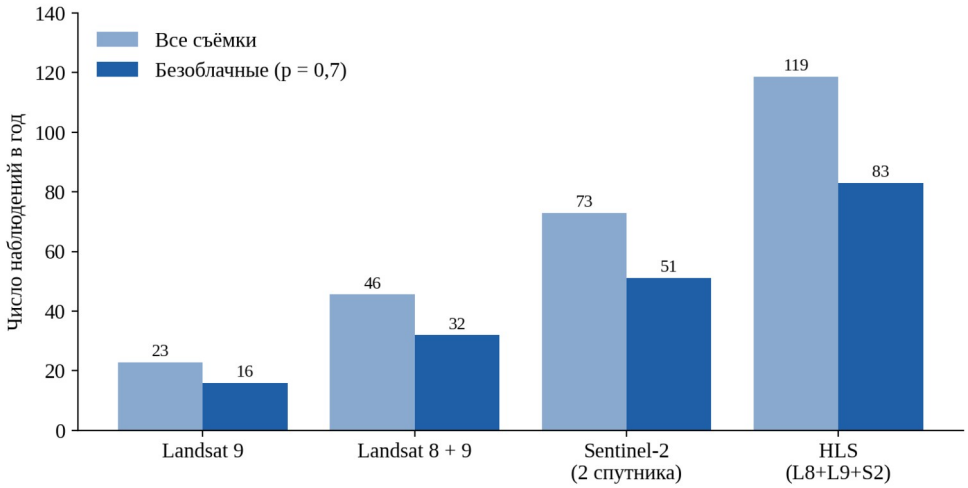


Рис. 4 – Расчётное число наблюдений в год для разных систем и их комбинаций

Один Landsat 9 даёт около 23 снимков в год, из которых безоблачными окажутся примерно 16, т. е. в среднем один пригодный снимок за 3 недели. Для отслеживания фенологии сельскохозяйственных культур этого недостаточно: критические фазы (всходы, цветение, налив) могут быть пропущены. Группировка из двух спутников Sentinel-2 обеспечивает около 73 съёмок в год (≈51 безоблачная). Наибольшую плотность ряда даёт совместное использование Landsat 8, Landsat 9 и Sentinel-2 — свыше 80 безоблачных наблюдений в год, т. е. пригодный снимок в среднем каждые 4–5 дней [5].

5. Сравнение по прикладным задачам. Сводная оценка пригодности систем приведена в таблице 2 и на рис. 5.

Таблица 2 – Предпочтительная система для различных прикладных задач

Задача	**Предпочтительно**	**Обоснование**
Мониторинг посевов, фенология, прогноз урожайности	Sentinel-2	10 м, red-edge, съёмка каждые 5 сут.
Детальное картографирование растительного покрова и землепользования	Sentinel-2	Меньше смешанных пикселей, больше спектральных признаков
Точное земледелие, зонирование полей	Sentinel-2	Разрешение 10 м позволяет выделять зоны внутри поля
Водные объекты, береговые линии, мелкие водоёмы	Sentinel-2	Выделение объектов шириной от 10–20 м
Температура поверхности (LST)	Landsat 9	Наличие тепловых каналов TIRS-2
Эвапотранспирация, водный стресс, засуха	Landsat 9	Энергобалансовые модели требуют LST
Городские острова тепла	Landsat 9	Тепловые каналы; архив для анализа динамики
Многолетние изменения (опустынивание, Аральское море, рост городов)	Landsat 9	Сопоставимый ряд данных с 1972 г.
Оперативный мониторинг пожаров и паводков	Оба / HLS	Важна частота съёмки; SWIR есть у обеих систем
Снежный покров и ледники	Оба	SWIR-каналы обеих систем; Sentinel-2 детальнее, Landsat 9 точнее радиометрически

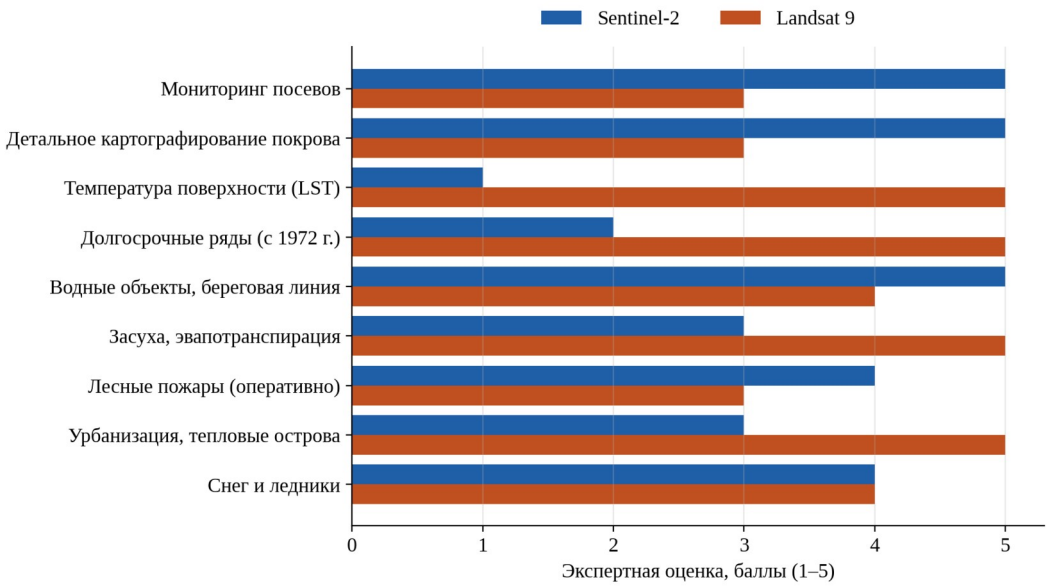


Рис. 5 – Экспертная оценка пригодности Sentinel-2 и Landsat 9 для прикладных задач

Как видно из таблицы 2 и рис. 5, специализация систем достаточно чёткая. Sentinel-2 предпочтителен там, где решающими являются детальность и частота съёмки: сельское хозяйство, картографирование, мониторинг водных объектов. Landsat 9 выигрывает в задачах, связанных с тепловым режимом поверхности и водным балансом, а также в ретроспективных исследованиях. Последнее особенно актуально для региона: оценка усыхания Аральского моря, деградации орошаемых земель и расширения городов возможна только на основе архива Landsat, начинающегося с 1970-х гг. [4, 14, 15].

6. Совместное использование данных. Поскольку системы дополняют друг друга, наиболее эффективным является их комплексное применение. NASA выпускает гармонизированный продукт HLS (Harmonized Landsat and Sentinel-2), в котором снимки Sentinel-2 приведены к сетке 30 м, выполнена коррекция различий в спектральных характеристиках каналов и эффектов двунаправленного отражения [3]. HLS обеспечивает единый ряд наблюдений с интервалом 2–3 сут., однако ценой потери преимущества Sentinel-2 в разрешении. Поэтому для задач,

требующих 10 м, рекомендуется использовать исходные данные Sentinel-2, а Landsat 9 привлекать для заполнения пропусков и получения тепловой информации.

Заключение

Проведённый сравнительный анализ показал, что Sentinel-2 и Landsat 9 не являются взаимозаменяемыми, а дополняют друг друга. Sentinel-2 превосходит Landsat 9 по пространственному (10 м против 30 м) и временному (5 сут. против 16 сут.) разрешению, ширине полосы обзора и наличию каналов red-edge, что делает его основным источником данных для мониторинга сельскохозяйственных угодий, детального картографирования и наблюдения за водными объектами. Landsat 9 имеет преимущества в радиометрической разрядности, наличии тепловых каналов и преемственности с полувековым архивом, что определяет его незаменимость при оценке температуры поверхности, эвапотранспирации, городских островов тепла и долгосрочных изменений природной среды.

Для условий Узбекистана с мелкоконтурным орошаемым земледелием и острыми проблемами водопользования рекомендуется комбинированный подход: Sentinel-2 — для оперативного мониторинга посевов, Landsat 9 — для оценки водного стресса и ретроспективного анализа, продукт HLS — для построения плотных временных рядов.

Список использованных источников

1. Drusch M., Del Bello U., Carlier S. et al. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services // Remote Sensing of Environment. – 2012. – Vol. 120. – P. 25–36.

2. Masek J.G., Wulder M.A., Markham B. et al. Landsat 9: Empowering open science and applications through continuity // Remote Sensing of Environment. – 2020. – Vol. 248. – 111968.

3. Claverie M., Ju J., Masek J.G. et al. The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set // Remote Sensing of Environment. – 2018. – Vol. 219. – P. 145–161.

4. Wulder M.A., Loveland T.R., Roy D.P. et al. Current status of Landsat program, science, and applications // Remote Sensing of Environment. – 2019. – Vol. 225. – P. 127–147.

5. Li J., Roy D.P. A global analysis of Sentinel-2A, Sentinel-2B and Landsat-8 data revisit intervals and implications for terrestrial monitoring // Remote Sensing. – 2017. – Vol. 9, № 9. – 902.

6. Mandanici E., Bitelli G. Preliminary comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for a combined use // Remote Sensing. – 2016. – Vol. 8, № 12. – 1014.

7. Frampton W.J., Dash J., Watmough G., Milton E.J. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2013. – Vol. 82. – P. 83–92.

8. Gascon F., Bouzinac C., Thépaut O. et al. Copernicus Sentinel-2A calibration and products validation status // Remote Sensing. – 2017. – Vol. 9, № 6. – 584.

9. Anderson M.C., Kustas W.P., Norman J.M. et al. Mapping daily evapotranspiration at field to continental scales using geostationary and polar orbiting satellite imagery // Hydrology and Earth System Sciences. – 2011. – Vol. 15. – P. 223–239.

10. Roy D.P., Wulder M.A., Loveland T.R. et al. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research // Remote Sensing of Environment. – 2014. – Vol. 145. – P. 154–172.

11. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.

12. Landsat 9 // U.S. Geological Survey. – URL: https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-9 (дата обращения: 24.09.2026).

13. S2 Mission // SentiWiki, Copernicus. – URL: https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-mission (дата обращения: 24.09.2026).

14. Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // Nature. – 2016. – Vol. 540. – P. 418–422.

15. Boymurodov, R., Matchanov, M., Tajiyev, Q., Dusanova, S., Rahimov, A., and Amandurdiyev, D. (2026). Geospatial analysis of the Khorezm oasis in terms of its vegetation cover and the impact of vegetation criteria on the desertification process. E3S Web of Conferences, 694, 02010. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202669402010