

Архив информационных продуктов о частоте наблюдения типов поверхности на основе данных спутников Sentinel-2 и возможности его применения

А. В. Кашницкий, Е. А. Лупян

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: kashnizky@gmail.com

Работа посвящена полученному по информации прибора MSI (*англ.* Multispectral Instrument) спутников Sentinel-2 набору продуктов о частоте детектирования различных типов земной поверхности и технологии его создания. Набор опубликован на ресурсах Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» и доступен для решения различных научных задач. Возможность работы с данными продуктами в том числе организована в уникальной научной установке «Vega-Science» (<http://sci-vega.ru/>). Набор включает ряд информационных продуктов на основе классификаций алгоритмами Sen2Cor и Dynamic World. Технология разработана по результатам отнесения к определённому типу поверхности каждого пикселя каждой сцены за период времени. При создании продуктов на основе Sen2Cor использовались следующие классы: «водная поверхность», «растительность», «не растительность», «тёмные объекты», «снег». Для продуктов на базе Dynamic World применялись такие классы, как «водные объекты», «древесная растительность», «травянистая растительность», «обводнённая растительность», «сельскохозяйственные угодья», «кустарники», «застройка», «открытые почвы», «снег и лёд». По разработанной технологии для каждого пикселя было вычислено абсолютное число отнесений его к каждому типу поверхности за период времени и доля (в %) таких отнесений от всех безоблачных измерений. Дополнительно посчитаны наиболее часто встречающееся значение за период и общее число чистых измерений. Описываемые продукты были разработаны с 2016 г. по настоящее время непрерывно за несколько временных периодов каждого года. Все продукты созданы на обширную территорию интереса в Северной Евразии общей площадью более 18 млн км².

Ключевые слова: Sentinel-2, тип поверхности, набор данных, ЦКП «ИКИ-Мониторинг», land-cover, безоблачные данные, ДЗЗ, частота наблюдения, Sen2Cor, Dynamic World

Одобрена к печати: 20.03.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-335-342

Введение

Ландшафтное картографирование по данным ДЗЗ представляется достаточно актуальной задачей. Результатом многих работ в этой области выступают картографические продукты, относящие каждую точку поверхности Земли к определённому классу (типу) поверхности в определённый период времени. Однако есть множество ситуаций, когда поверхность переходит за анализируемый период времени от одного типа к другому. Например, так происходит в течение года на используемых сельскохозяйственных землях, в зонах затопления, при резких антропогенных изменениях ландшафта. Для учёта этой временной динамики в данной работе предлагается подход к использованию частоты отнесения точки к тому или иному классу поверхности за период времени.

В настоящей работе в соответствии с этим подходом была разработана технология построения продуктов с частотой детектирования типов поверхности за любой период времени на основе информации прибора MSI (*англ.* Multispectral Instrument) спутников Sentinel-2. С помощью этой технологии возможно получение информационных продуктов с применением любой классификации каждой сцены. В данной работе это было сделано на основе классификаций алгоритмами Sen2Cor (Louis et al., 2016) и Dynamic World (Brown et al., 2022). С помощью разработанной технологии с использованием представленных в этих классификациях типов поверхности был создан набор данных о частоте детектирования каждого класса за различные периоды 2016–2024 гг. Статья описывает все продукты этого набора данных и технологию их получения.

Исходные данные

Исходные данные и продукты классификации каждой сцены прибора MSI спутников серии Sentinel-2, распространяемые в рамках программы Copernicus Европейского космического агентства (Copernicus Open Access Hub, <https://scihub.copernicus.eu/>), в настоящей работе были получены из архивов Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019). В архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» по территории Северной Евразии и ряду локальных участков по всему миру хранится информация, полученная спутниками серии Sentinel-2, в том числе использованные в данной работе результаты классификации каждой сцены алгоритмами Sen2Cor и Dynamic World.

Основная задача алгоритма Sen2Cor заключается в коррекции коэффициента спектральной яркости одномоментных продуктов на верхней границе атмосферы для получения значений коэффициента спектральной яркости на поверхности Земли. Кроме того, результатом работы Sen2Cor является продукт классификации сцены, который и стал основой для получения части описываемого набора данных. Этот продукт имеется в ЦКП «ИКИ-Мониторинг» за период с конца 2018 г. по настоящее время. Продукт классификации сцены подробно описан в технической документации (<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-2a/algorithm>) и ряде работ (например, в публикации (Louis et al., 2016)). Этот продукт для каждого пикселя указывает один из 11 классов: три класса облачности, «тени от облаков», «тёмные объекты», «растительность», «не растительность», «вода», «не классифицировано», «нет данных» и «сбой». Продукт имеет пространственное разрешение 20 м на пиксель и хранится в тайлах размером около 100×100 км в проекции UTM/WGS84 (англ. Universal Transverse Mercator). Для получения данных на основе алгоритма Sen2Cor ранее (Прошин и др., 2019) были организованы автоматическое поступление, обработка и сохранение данных спутников серии Sentinel-2 в архивы ЦКП «ИКИ-Мониторинг» из Google Cloud Storage (<https://cloud.google.com/storage/docs/public-datasets/sentinel-2>).

Набор данных Dynamic World (Brown et al., 2022) создан на основе информации прибора MSI спутников Sentinel-2 и предоставляет детальные сведения о земной поверхности практически в режиме реального времени. Dynamic World классифицирует каждый чистый пиксель каждого изображения по одному из девяти классов земного покрова: «водные объекты», «обводнённая растительность», «древесная растительность», «травянистая растительность», «сельскохозяйственные угодья», «кустарники», «постройки», «открытые почвы», «снег и лёд». Кроме того, для каждого пикселя предоставляется вероятность того, что он относится к каждому из перечисленных классов. В настоящей работе эта вероятность не учитывалась, а использовался только наиболее вероятный класс. Продукт имеет пространственное разрешение 10 м на пиксель и хранится в той же стандартной для данных Sentinel-2 тайловой сетке, что и классификация сцены алгоритмом Sen2Cor. Получение данных Dynamic World было организовано с помощью возможностей системы Google Earth Engine (<https://earthengine.google.com/>) (Gorelick et al., 2017).

Технология построения

Для продуктов на основе результата классификации алгоритмом Sen2Cor каждой сцены для бесснежного периода считались чистыми классы растительность, не растительность, вода, тёмные объекты, не классифицировано, а для снежного периода ещё и класс снег. Остальные классы считались маской. Для каждого чистого класса независимо для каждого пикселя вычислялось абсолютное число отнесений его к этому классу за период времени и доля (в %) таких отнесений от всех чистых измерений. Всего за период времени получено 10 основных продуктов об абсолютном и относительном отнесении пикселя к каждому из пяти чистых классов. Для продуктов на основе Dynamic World считались чистыми все девять представленных классов. Для каждого класса независимо для каждого пикселя было вычислено абсолютное число отнесений его к этому классу за период времени и доля (в %) таких отне-

сений от всех чистых измерений. Всего за период времени получено 18 основных продуктов об абсолютном и относительном отнесении пикселя к каждому из девяти классов. И для продуктов на основе Sen2Cor, и для продуктов на основе Dynamic World дополнительно было вычислено наиболее часто встречающееся значение и общее число чистых измерений за период. В дальнейшем также возможно получение информационных продуктов на основе любой другой классификации каждой сцены.

Отметим также временные затраты на создание продуктов. Подход к расчёту описываемых продуктов был аналогичен ранее уже применявшемуся (Кашницкий, Лупян, 2024; Кашницкий и др., 2022) для создания безоблачных композитных изображений. Особенность этого подхода заключается в отсутствии дополнительных операций преобразования исходных данных и минимальном использовании дисковых операций. Поскольку исходные данные хранятся в тайлах размером около 100×100 км в проекции UTM/WGS84, то для уменьшения временных затрат вся обработка велась в этой тайловой сетке в исходной проекции каждого тайла. Результирующий продукт был создан для каждого тайла независимо. Учитывалось, что вся информация в ЦКП «ИКИ-Мониторинг» хранится в распределённом файловом архиве на множестве серверов на основе подходов, описанных в работе (Прошин и др., 2016). В соответствии с этими подходами при создании продуктов данные за отобранные даты внутри периода выгружались с сервера хранения непосредственно в оперативную память сервера, выполняющего обработку. Такой подход позволил избежать дополнительных временных затрат на копирование данных. В результате получено среднее время на создание 10 описываемых продуктов на основе классификации алгоритмом Sen2Cor на территорию интереса в Северной Евразии за период с 1 мая по 30 сентября одного года, равное 7,2 ч. При получении этой оценки проводился расчёт в 16 параллельных процессах с использованием одного сервера из состава ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (CPU: AMD EPYC 7413, VMware 16 core, 2645 MHz; Memory: 128 GiB). Вычисления были выполнены за период с 1 мая по 30 сентября независимо для каждого года, с 2019 по 2024 г. Всего в обработке участвовало 2439 тайлов общей площадью более 18 млн км², в сумме более 73×10⁹ пикселей. В зависимости от ряда факторов (загруженность сети и серверов хранения, другой временной период, использование как основы Dynamic World, а не классификации алгоритмом Sen2Cor и т.д.) временные затраты отличались.

Полученный набор данных

С помощью описанной технологии был создан набор данных о частоте детектирования типов поверхности на территорию интереса в Северной Евразии. Список основных продуктов приведён в *таблице*. Все данные на основе Sen2Cor имеют пространственное разрешение 20 м на пиксель, а на основе Dynamic World — 10 м на пиксель.

Основные опубликованные продукты

Период	Годы	Основа	Продукты
15.03—15.11	2019—2024	Sen2Cor	Число чистых измерений, наиболее часто встречающееся значение, число и доля (в %) измерений классов вода, тёмные объекты, растительность, не растительность
01.05—30.09			
01.01—31.03			Число чистых измерений, наиболее часто встречающееся значение, число и доля (в %) снежных измерений
15.07—15.09			Число чистых измерений, число водных измерений, доля (в %) водных измерений
15.03—15.11	2016—2024	Dynamic World	Число чистых измерений, наиболее часто встречающееся значение, число и доля (в %) измерений классов водные объекты, обводнённая растительность, древесная растительность, постройки, снег и лёд, сельскохозяйственные угодья, травянистая растительность, кустарники, открытые почвы
01.05—30.09			
01.12—31.03			

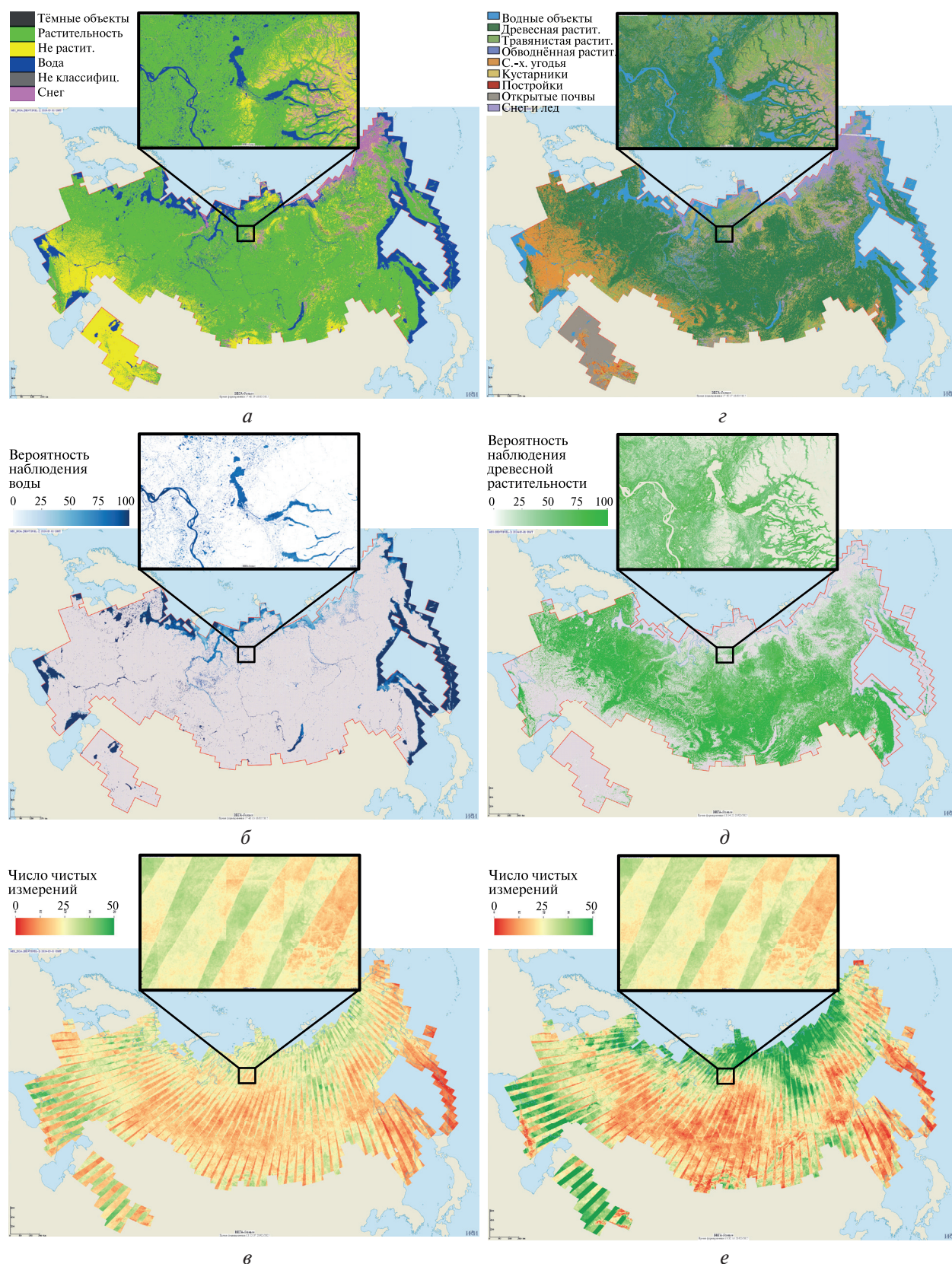


Рис. 1. Примеры продуктов на основе частоты наблюдения типа земной поверхности за период с 1 мая по 30 сентября 2024 г.: а — наиболее часто встречающееся значение на основе Sen2Cor; б — доля (в %) измерений воды от всех чистых наблюдений на основе Sen2Cor; в — число чистых измерений на основе Sen2Cor; г — наиболее часто встречающееся значение на основе Dynamic World; д — доля (в %) измерений класса древесная растительность от всех чистых наблюдений на основе Dynamic World; е — число чистых измерений на основе Dynamic World

В дальнейшем подобные продукты за новые периоды будут создаваться и пополнять архивы в автоматическом режиме. Возможно также появление аналогичных данных и за другие интервалы времени. Кроме того, пользователям доступны различные разновременные продукты, получаемые из основных в момент их запроса. На *рис. 1* (см. с. 338) приведены примеры созданных продуктов.

Оценка точности использованных продуктов классификации и результата

Поскольку представленный набор данных не является традиционной картой, на которой показаны различные типы поверхности, то его точность не может быть оценена простым подходом с помощью валидационной выборки. Кроме того, представительных валидационных выборок на территорию интереса не существует и создание таковых становится отдельной большой задачей. Поскольку в основе всех описываемых продуктов лежит результат классификации каждой сцены на основе Sen2Cor или Dynamic World, то можно оценить снизу точность этих продуктов на основе их собственной точности.

Точность результатов классификации сцены алгоритмом Sen2Cor анализировалась в ряде работ, например, в статье (Baetens et al., 2019) указана общая точность 84 %. В публикации (Main-Knorn et al., 2017) получена общая точность по всем классам — 74 %, а при разделении между классами «чистая поверхность и вода» и «неиспользуемые пиксели» уже 92 %. Точность сильно зависит от состояния атмосферы, времени года, территории и других факторов.

Точность Dynamic World также оценивалась в ряде работ. В оригинальной публикации (Brown et al., 2022) она оценивалась на огромной контрольной выборке и в зависимости от разных подходов к согласию экспертов составила от 73,8 до 77,8 %. При этом точность отдельных классов значительно отличалась. Например, в случае подхода к простому согласию большинства экспертов точность по отдельным классам варьировала от высокой (92,2 % для воды, 91,4 % для застройки, 91,3 % для сельскохозяйственных культур) до очень низкой (34,9 % для травянистой растительности). Отдельно отмечается, что наиболее корректно Dynamic World работает в умеренных и лесных биомах. Засушливые кустарниковые и пастбищные угодья при этом представляют собой наибольший источник путаницы. Отмечено, что в случае объединения классов травянистая растительность и кустарники можно существенно снизить неопределённость. В работе (Xu et al., 2024) оценка проводилась после объединения некоторых классов и получена общая точность 74,1 %. Отмечается сильная зависимость оценки от территории. Указывается на значительную зависимость точности от метода её оценки. Для объединённых классов приводятся такие оценки ошибок и пропусков соответственно: вода — 85,1 и 79,8 %; древесный покров — 92,0 и 72,7 %; смешанная растительность — 53,5 и 81,7 %; сельскохозяйственные культуры — 66,5 и 64,6 %; постройки — 87,3 и 52,6 %; открытые почвы — 87,4 и 76,1 %; снег и лёд — 99,6 и 57,5 %. В работе (Venter et al., 2022) получена общая точность 72 %. Также отмечается сильная зависимость оценки от территории и значительно более точное выделение классов воды, построек, древесного покрова и сельскохозяйственных культур.

Вместе с тем косвенно качество описываемых результирующих продуктов можно оценить по представленности статистики. Она в каждой точке отображается с помощью продукта о количестве чистых измерений за период. На *рис. 1в* и *е* приведены такие продукты для данных на основе Sen2Cor или Dynamic World соответственно. Таким образом, в каждом случае использования набора данных необходимо анализировать количество чистых измерений, на основе которых он получен по исследуемой территории. Например, на *рис. 1в* и *е* наглядно видно, что оценки по большей части европейской территории России получены на основе более чем 20 чистых измерений, в то время как по Сахалину и Курильским островам было всего несколько безоблачных измерений за сезон.

Заключение

Представленная в статье технология и сформированные на её основе временные ряды информационных продуктов могут быть использованы для изучения объектов и территорий, где важна временная динамика. Благодаря комплексному анализу представленного набора за разные годы качество картографирования таких объектов и территорий может быть повышено. Это особенно актуально для объектов, которые меняются за период наблюдения, например зон затопления. Кроме того, временная динамика может играть роль в сложных классификациях, где необходимо учитывать сезонные изменения, например различия между используемыми и неиспользуемыми сельскохозяйственными землями. Для стабильных объектов, таких как постоянно открытая водная поверхность или лесная растительность, наоборот, можно использовать набор данных с порогом разделения. Это позволит считать пиксель относящимся к определённому типу поверхности, если он был идентифицирован как таковой более заданной доли (в %) от всех безоблачных измерений в течение сезона.

Сформированный набор данных за разные периоды 2016–2024 гг. опубликован на ресурсах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» и доступен для анализа с помощью уникальной научной уставки «Vega-Science» (<http://sci-vega.ru/>) (Loupian et al., 2022). Также возможно предоставление отдельных наборов данных по запросу.

Разработка технологии построения информационных продуктов о частоте наблюдения типов поверхности на основе информации со спутников Sentinel-2 выполнена в рамках темы ИКИ РАН «Космос-Д» (госрегистрация № 122042500019-6). Создание и поддержка представленного архива информационных продуктов осуществляется в рамках темы ИКИ РАН «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8) на основе инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru/>).

Литература

1. Кашницкий А. В., Лупян Е. А. Ежемесячные и сезонные продукты по данным спутников серии Sentinel-2 в архивах ЦКП ИКИ-Мониторинг: текущее состояние, технология создания и возможности доступа // Материалы 22-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2024. С. 105. DOI: 10.21046/22DZZconf-2024a.
2. Кашницкий А. В., Бурцев М. А., Прошин А. А. Технология создания безоблачных композитных изображений по данным спутников серии Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 76–85. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-76-85.
3. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
4. Прошин А. А., Лупян Е. А., Балашов И. В. и др. Создание унифицированной системы ведения архивов спутниковых данных, предназначенной для построения современных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-9-27.
5. Прошин А. А., Кашницкий А. В., Бурцев М. А., Бриль А. А. Организация получения, обработки и предоставления данных спутников серии Sentinel-2 в центре коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» // Материалы 17-й Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2019. С. 117.
6. Baetens L., Desjardins C., Hagolle O. Validation of Copernicus Sentinel-2 cloud masks obtained from MAJA, Sen2Cor, and FMask processors using reference cloud masks generated with a supervised active learning procedure // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 4. Article 433. DOI: 10.3390/rs11040433.
7. Brown C. F., Brumby S. P., Guzder-Williams B. et al. Dynamic World, near real-time global 10 m land use land cover mapping // Scientific Data. 2022. V. 9. Article 251. DOI: 10.1038/s41597-022-01307-4.
8. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
9. Louis J., Debaecker V., Pflug B., Main-Knorn M., Bieniarz J., Mueller-Wilm U., Cadau E., Gascon F. Sentinel-2 Sen2Cor: L2A processor for users // Proc. “Living Planet Symp. 2016”. Prague, Czech Republic, 2016. ESA SP-740. 8 p.

10. Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A. et al. Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 1. Article 77. DOI: 10.3390/rs14010077.
11. Main-Knorn M., Pflug B., Louis J. et al. Sen2Cor for Sentinel-2 // Proc. SPIE. Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII. 2017. V. 10427. P. 37–48. DOI: 10.1117/12.2278218.
12. Venter Z. S., Barton D. N., Chakraborty T. et al. Global 10 m land use land cover datasets: A comparison of Dynamic World, World Cover and Esri Land Cover // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 16. Article 4101. DOI: 10.3390/rs14164101.
13. Xu P., Tsendbazar N.-E., Herold M. et al. Comparative validation of recent 10 m-resolution global land cover maps // Remote Sensing of Environment. 2024. V. 311. Article 114316. DOI: 10.1016/j.rse.2024.114316.

Archive of information products on surface type observation frequency based on Sentinel-2 data and its possible applications

A. V. Kashnitskii, E. A. Loupian

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: kashnizky@gmail.com*

This paper presents a dataset of detection frequency data for various types of Earth surface obtained from the MSI instrument on board Sentinel-2 satellites, along with the technology used for its creation. The dataset is published on the resources of the IKI-Monitoring Center for Collective Use and is available for solving various scientific tasks. Among other sites, the possibility of working with these products is organized within the unique Vega-Science scientific service (<http://sci-vega.ru/>). It includes multiple data products based on classifications derived from the Sen2Cor and Dynamic World algorithms. The technology is based on assigning a specific surface type to each pixel of each scene over a specified time period. For the Sen2Cor-based products, the classes used are water surface, vegetation, non-vegetation, dark objects, and snow. For the Dynamic World-based products, the classes include water, trees, grass, flooded vegetation, crops, shrub and scrub, built, bare ground, and snow and ice. The developed technology calculates the absolute number of assignments to each class for each pixel over a period, as well as the percentage of such assignments relative to all cloud-free measurements. Additionally, it determines the most frequently occurring value for that period and the total number of cloud-free measurements. The described products have been generated from 2016 to the present, continuously covering several periods each year. They have been created for a large area of interest in Northern Eurasia spanning over 18 million square kilometers.

Keywords: Sentinel-2, surface type, data set, IKI-Monitoring CCU, landcover, cloud-free data, remote sensing, observation frequency, Sen2Cor, Dynamic World

Accepted: 20.03.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-335-342

References

1. Kashnitskii A. V., Loupian E. A., Monthly and seasonal data products from Sentinel-2 series satellites in the archives of the IKI-Monitoring Center: Current status, creation technology and access possibilities, *Materialy 22-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 22nd Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2024, p. 105 (in Russian), DOI: 10.21046/22DZZconf-2024a.
2. Kashnitskii A. V., Burtsev M. A., Proshin A. A., Technology to create cloud-free composites from Sentinel-2 satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 5, pp. 76–85 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-76-85.
3. Loupian E. A., Proshin A. A., Bourtsev M. A. et al., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data,

- Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
4. Proshin A. A., Loupian E. A., Balashov I. V. et al., Unified satellite data archive management platform for remote monitoring systems development, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, V. 13, No. 3, pp. 9–27 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-9-27.
 5. Proshin A. A., Kashnitskii A. V., Burtsev M. A., Bril A. A., Organization of receiving, processing and providing data from Sentinel-2 satellites in the IKI-Monitoring shared use center, *Materialy 17-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii “Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa”* (Proc. 17th All-Russi Open Conf. “Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space”), Moscow: IKI RAS, 2019, p. 117 (in Russian).
 6. Baetens L., Desjardins C., Hagolle O., Validation of Copernicus Sentinel-2 cloud masks obtained from MAJA, Sen2Cor, and FMask processors using reference cloud masks generated with a supervised active learning procedure, *Remote Sensing*, 2019, V. 11, No. 4, Article 433, DOI: 10.3390/rs11040433.
 7. Brown C. F., Brumby S. P., Guzder-Williams B. et al., Dynamic World, near real-time global 10 m land use land cover mapping, *Scientific Data*, 2022, V. 9, Article 251, DOI: 10.1038/s41597-022-01307-4.
 8. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al., Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, *Remote Sensing of Environment*, 2017, V. 202, pp. 18–27, DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
 9. Louis J., Debaecker V., Pflug B., Main-Knorn M., Bieniarz J., Mueller-Wilm U., Cadau E., Gascon F., Sentinel-2 Sen2Cor: L2A processor for users, *Proc. “Living Planet Symp. 2016”*, Prague, Czech Republic, 2016, ESA SP-740, 8 p.
 10. Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A. et al., Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 1, Article 77, DOI: 10.3390/rs14010077.
 11. Main-Knorn M., Pflug B., Louis J. et al., Sen2Cor for Sentinel-2, *Proc. SPIE. Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII*, 2017, V. 10427, pp. 37–48, DOI: 10.1117/12.2278218.
 12. Venter Z. S., Barton D. N., Chakraborty T. et al., Global 10 m land use land cover datasets: A comparison of Dynamic World, World Cover and Esri Land Cover, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 16, Article 4101, DOI: 10.3390/rs14164101.
 13. Xu P., Tsendbazar N.-E., Herold M. et al., Comparative validation of recent 10 m-resolution global land cover maps, *Remote Sensing of Environment*, 2024, V. 311, Article 114316, DOI: 10.1016/j.rse.2024.114316.