

Обзор работ в области картографирования типов землепользования территории России по данным дистанционного зондирования Земли

А. А. Мятлев¹, М. Ю. Колобахин¹, А. В. Кашницкий²

¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, 119991, Россия*

E-mails: aamyat@mail.ru, ursus.lore@gmail.com

² *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: kashnizky@gmail.com*

Представлен обзор 24 глобальных и региональных картографических продуктов растительного покрова, созданных на основе данных дистанционного зондирования Земли. Цель работы заключается в анализе их применимости для изучения изменений типов землепользования на территории России, что необходимо, в частности, для оценки углеродного баланса и ведения национального кадастра парниковых газов. Продукты систематизированы по пространственному разрешению: низкому (100+ м), среднему (30 м) и высокому (10 м). Для каждого продукта рассмотрены ключевые характеристики: используемые спутниковые системы, методы получения, выделяемые классы, временной охват, особенности доступа, обновляемость, точность и области применения. Выявлены тенденции развития отрасли: увеличение частоты обновления данных, повышение пространственного разрешения и широкое внедрение алгоритмов машинного обучения. Отмечено, что несмотря на высокий потенциал многих продуктов, их применение для территории России требует дополнительных исследований, включая оценку точности и адаптацию к национальным методикам учёта парниковых газов.

Ключевые слова: ДЗЗ, картографические продукты, карты растительного покрова, спутниковое картографирование, классификация земель, углеродный баланс, кадастр парниковых газов, мониторинг растительности

Одобрена к печати: 17.02.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-3-25-43

Введение

В условиях растущей глобализации и изменения климата мониторинг и анализ состояния растительного покрова Земли приобретают особую важность. Ключевую роль в решении этой задачи играет спутниковое картографирование, которое предоставляет оперативную и объективную информацию о землепользовании на больших территориях. Этот метод позволяет отслеживать динамику землепользования, оценивать продуктивность и деградацию растительности, а также фиксировать расширение урбанизированных и сельскохозяйственных земель. В настоящей статье представлен обзор существующих глобальных и региональных спутниковых картографических продуктов типов землепользования и растительного покрова.

Получение оценок площадей, занятых различными классами землепользования, служит основой для ведения национального кадастра парниковых газов, который является обязательством России в рамках международных климатических соглашений. Согласно рекомендациям (<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/vol4.html>) такая отчётность формируется для следующих основных классов землепользования: лесные земли, возделываемые земли, пастбища, водно-болотные угодья, поселения и прочие земли. Для территории России ежегодно оценивается площадь земель, занятых каждым классом, а также матрица переходов между классами от года к году. Далее с помощью полученных значений на основе моделирования рассчитываются выбросы и поглощения парниковых газов в каждой категории. Практическое применение этой методологии демонстрируется в официальных отчётных документах Российской Федерации. Например, Восьмое национальное сообщение Российской Федерации (http://downloads.igce.ru/publications/nac_soobs/NC-8_BR-5_rus).

pdf) содержит количественные оценки выбросов и поглощений по данным категориям (см., в частности, рис. III.10, III.11 и табл. III.9). Таким образом, задача выбора оптимального картографического продукта, адекватно отражающего площадь и динамику этих классов, напрямую связана с повышением точности национальной климатической отчётности. Стоит отметить, что анализируемые карты также полезны и для решения других задач, таких как мониторинг сельского хозяйства и оценка состояния земель.

Принципы и критерии отбора картографических продуктов

Обзор сосредоточен на шести основных классах землепользования, определённых в соответствии с методическими рекомендациями Межправительственной группы экспертов по изменению климата (<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/vol4.html>) для разработки кадастров парниковых газов в секторе землепользования, изменений землепользования и лесного хозяйства. Выбор этих классов обусловлен их значительным влиянием на углеродный баланс и необходимостью точного учёта изменений в их площадях для оценки выбросов и поглощений парниковых газов.

К рассматриваемым классам относятся:

- 1) *лесные земли* — все территории с древесной растительностью, соответствующие пороговым критериям определения лесной площади в национальном кадастре парниковых газов;
- 2) *возделываемые земли* — все сельскохозяйственные угодья и обрабатываемые земли, включая системы агролесомелиорации, где показатели растительности ниже пороговых критериев для лесных площадей;
- 3) *пастбища* — земли, пригодные для выпаса скота, не считающиеся возделываемыми землями, включая системы с растительностью, не превышающей порогового критерия для лесных площадей;
- 4) *водно-болотные угодья* — земли, покрытые или насыщенные водой в течение года (водохранилища, естественные реки, озёра и др.) или его части (торфяники и др.), не относящиеся к лесам, пахотным землям, пастбищам или поселениям;
- 5) *поселения* — все обустроенные земли, включая транспортную инфраструктуру и поселения, не включённые в другие категории;
- 6) *прочие земли* — лишённая растительности почва, скальный грунт, лёд и все неуправляемые земли, не относящиеся к другим пяти категориям.

Отбор наиболее подходящих и информативных картографических продуктов растительности осуществлён на основе следующих критериев:

- 1) предпочтение отдаётся продуктам **с открытым доступом**, обеспечивающим свободное использование и распространение данных;
- 2) продукты должны содержать информацию о категориях землепользования, **соответствующих шести классам**;
- 3) продукты должны обеспечивать **покрытие территории России или соизмеримых по размеру стран с сопоставимыми классами ландшафтного покрова**.

Необходимо добавить, что каждый картографический продукт, исследуемый в настоящем обзоре, использует собственную, зачастую более детальную легенду и классификацию. Эти внутренние классы продуктов не всегда строго соответствуют перечисленным выше. Несмотря на это, в большинстве случаев требуемые классы можно получить посредством простой переклассификации или агрегации данных.

Обзор картографических продуктов по группам

Современные возможности мониторинга состояния растительного покрова основаны на использовании данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Они служат источником получения систематических, сопоставимых и объективных измерений ключевых параметров растительности в глобальном масштабе. Сорокалетняя эволюция этих технологий привела к формированию обширного класса картографических продуктов, различающихся по пространственно-временному разрешению, методам обработки и целевым показателям. Развитие данной области характеризуется переходом от единичных карт и использования вегетационных индексов к целым комплексам взаимодополняющих продуктов, постоянно обновляемых и верифицируемых, что позволяет решать широкий спектр научных и прикладных задач — от моделирования глобальных биогеохимических циклов до управления сельскохозяйственными ресурсами на региональном уровне.

Сравнительный анализ продуктов осложняется различиями в подходах к валидации. Один из основных параметров — общая точность (*англ.* overall accuracy), которая указывается самими разработчиками карт. Эта величина не является полностью сопоставимой между разными продуктами, поскольку методы её оценки (например, размер и стратегия формирования валидационной выборки) существенно различаются. Для части продуктов были проведены независимые кросс-сравнения на едином наборе данных, ссылки на которые будут также приведены в обзоре. Тем не менее в большинстве случаев заявленная авторами продукта общая точность остаётся единственной доступной количественной мерой, позволяющей провести первичное сравнение.

Далее представлены подходящие под описанные выше критерии спутниковые продукты земельного покрова с акцентом на методы их получения, пространственные, спектральные, временные характеристики и области применения.

Данные низкого пространственного разрешения (100+ м)

Продукты низкого пространственного разрешения (ПР), обладающие размером пикселя от 100 м и более, ориентированы на макромасштабный мониторинг растительного покрова, обеспечивая глобальное покрытие и высокую частоту наблюдений. Ограниченная детализация компенсируется регулярностью съёмки, что позволяет анализировать сезонную динамику и осуществлять оперативный контроль состояния растительности. Они часто применяются для оценки влияния климатических изменений и глобальных экологических процессов. Некоторые из этих данных уникальны своей архивной временной серией, и благодаря этому выявлены долгосрочные тренды, которые важны в науке по сей день.

Исторически первым продуктом, выпущенным в 1990 г., считается **CORINE LC** (*англ.* Coordination of Information on the Environment Land Cover) (<https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover>). Разработанная в рамках программы по охране окружающей среды база данных CORINE охватывает территорию Европы с ПР 100 м. Выделяется среди прочих своей частотой обновления: раз в 6 лет, начиная с 1986 г. Система классификации содержит 44 класса, организованных в трёхуровневую иерархию, уступая по количеству лишь схожим сельскохозяйственным ресурсам, описанным дальше. Отличительная черта — слой изменений, фиксирующий динамику растительности между базисными годами. Продукт CORINE LC получил широкий временной охват за счёт объединения данных как устаревших, так и современных спутниковых систем Landsat, SPOT (*фр.* Satellite Pour l'Observation de la Terre) и Sentinel. Средняя точность карты составляет 92 % и проверяется независимыми экспертами с использованием справочных данных. Здесь и далее следует ещё понимать варьирование доли (в %) точности в зависимости от региона, года, сезона. Высокий процент точности данного продукта обусловлен особым методом обработки данных — CAPI (*англ.* Computer Assisted Photointerpretation). Преимущество метода заключается в полуавтоматической обработке серии снимков, где эксперту совместно с изображением объекта предлагаются

«подсказки», основанные на машинной интерпретации. Такой подход существенно увеличивает скорость и пропускную способность обработки информации, но при этом растёт достоверность, особенно в случае со сложными визуальными признаками объектов.

Если предыдущий продукт стал исторически первым, то **IGBP-DISCover** (IGBP-DIS — *англ.* International Geosphere-Biosphere Programme Data and Information System) — первый продукт глобального пространственного охвата (Belward et al., 1999). Карта выпущена в 1997 г. с ПР 1000 м, а построена на основе спутниковых данных с апреля 1992 по апрель 1993 г. и более не обновлялась. Проект разработан в рамках Международной программы «Геосфера — Биосфера» (IGBP-DIS) на основе данных радиометра NOAA (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration) AVHRR (*англ.* Advanced Very High Resolution Radiometer) и был направлен на создание высококачественного продукта на весь мир с целью использования в научных исследованиях и разработке экологической политики, преимущественно в контексте изменения климата. Одна из задач проекта DISCover заключалась в достижении точности в 85 %, однако реальный показатель варьируется в пределах 67 %. Продукт используется крайне редко, однако служит отправной точкой для оценки динамики с 90-х гг. прошлого столетия.

Ещё одним глобальным продуктом с разрешением 1000 м представляется **GLC2000** (*англ.* Global Land Cover 2000), разработанный в сотрудничестве Европейского центра исследований JRC (*англ.* Joint Research Centre) и более чем 30 научных институтов (Mayaux et al., 2006). Он создан на основе данных, полученных со спутника SPOT VGT (*англ.* VEGETATION) за 12 месяцев 2000 г., и более не обновлялся. Содержит 22 класса в международной системе LCCS (*англ.* Land Cover Classification System), однако в зависимости от регионов их количество меняется (например, в Северной Америке их 28). Точность карты (в глобальном масштабе) остаётся неизвестной, имеются лишь приблизительные оценки в 69 %. Такой эффект возникает в результате децентрализованной координации над проектом, где каждый из региональных центров использовал свой метод классификации, поэтому итоговая карта становится мозаикой из регионов, вследствие чего при переходе между ними может меняться принадлежность пикселей к классам. С другой стороны, возникают и положительные свойства — данный продукт может быть полезен при работе на региональном уровне, поскольку местные центры лучше разбираются в своей локальной зоне. Равно как и DISCover, GLC2000 имеет свои ограничения. Его ПР понижает качество классификации, однако продукт может быть полезен как эталон начала XXI в. для оценки долговременной динамики, если его использовать в связке с имеющимися картами.

Преемником GLC2000 выступает продукт **GlobCover**, разработанный Европейским космическим агентством ESA (*англ.* European Space Agency) и ставший первым с ПР 300 м (Bicheron et al., 2008). Имеет два основных релиза: в 2008 г. (за период с декабря 2004 по июнь 2006 г.) и в 2010 г. (с января по декабрь 2009 г.). Карта является глобальной и в обеих версиях использовались данные спутника Envisat (прибор MERIS (*англ.* Medium-Resolution Imaging Spectrometer) с 15 спектрами). На сегодняшний день не обновляется, однако существует возможность обновить продукт с помощью данных последних лет. По сравнению со своим предшественником трёхкратно увеличилось разрешение, появилась единая методология, которая позволила стандартизировать классификацию по системе LCCS вне зависимости от региона. Всего 22 класса со средней точностью в 75 % (у первого релиза — 74 %, у второго — 77 %). Сегодня GlobCover используется для сравнения с современными данными, чтобы охватить промежуток с 2000 по 2010 г.

Следующим продуктом, разработанным ESA, стала ежегодно обновляемая карта **CCI Land Cover** (*англ.* Climate Change Initiative Land Cover) с ПР 300 м. Впервые она была представлена в 2010 г. в рамках «Инициативы по изменению климата» (CCI) (<https://esa-land-cover-cci.org/>). Включает в себя серию карт с 1992 по 2022 г. Такой широкий охват удалось достичь за счёт объединения временных рядов AVHRR (1992–1998), SPOT VGT (1998–2012) и MERIS (2003–2012), а также PROBA-V (*англ.* PProject for On-Board Autonomy — Vegetation) и Sentinel-3. Содержит 22 класса в системе LCCS. По независимым оценкам точность классификации составляет 71 %. Помимо основных карт, у CCI Land Cover выпускаются четыре

«флага» качества. Это позволяет оценить степень достоверности каждого пикселя в классе: Pixel Reliability Flag — уровень уверенности модели в классификации пикселя; Change Flag — наличие изменений между годами; Seasonal Variation Flag — влияние сезонных колебаний спектра (или возможна ли путаница классов); Multi-Year Consistency Flag — стабильность классификации во времени. Ежегодное обновление и высокая тематическая детализация с флагами делают этот набор данных привлекательным, в первую очередь, для климатического моделирования, а также для исследований учёта земель, мониторинга лесов и опустынивания. Фактически данный продукт остаётся ключевым набором данных непрерывной серии для исследования динамики за 30-летний период.

Несмотря на появление более детальных данных, **MODIS LC** (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Land Cover) (версии MCD12Q1 с ПР 500 м и MCD12C1 с разрешением 0,05°) стал уникальным продуктом с точки зрения длительности ряда (<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod12.php>). Продукт разработан в NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration) и начиная с 2001 г. представляет ежегодную последовательность глобальных карт по шести разным классификациям (IGBP, UMD (*англ.* University of Maryland), LAI (*англ.* Leaf Area Index), BGC (*англ.* BIOME-Biogeochemical Cycles), PFT (*англ.* Plant Functional Types), LCCS). Спутники Terra и Aqua покрывают данными весь земной шар каждые 1–2 дня, что делает MODIS LC ключевым источником для отслеживания динамики покрова. Точность классификации в среднем составляет 75 % и варьируется в зависимости от класса или расположения. Продукт MODIS LC применяется в основном при климатическом моделировании, где не требуется высокая детализация изображений.

Продукт **CGLS-LC100** (*англ.* Copernicus Global Land Service — Land Cover 100m) разработан в рамках программы Copernicus под руководством Фламандского института технологических исследований (*нид.* Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek — VITO) в 2015 г. (Buchhorn et al., 2020). Отличается высоким ПР 100 м, содержит 23 класса по системе LCCS, источником данных стал спутник PROBA-V. Карты включают данные за период 2015–2019 гг., но планируется сделать ежегодно обновляемый продукт на основе данных Sentinel. Ключевая особенность — двойной слой карты: дискретная классификация (23 класса) и непрерывные слои, в которых содержится информация о доле покрытия, где на одном пикселе могут быть представлены несколько классов. Средняя точность продукта составляет 80 %.

Отдельно стоит отметить **карты растительного покрова Института космических исследований (ИКИ РАН)** (Барталев и др., 2016). Они ежегодно обновляются с 2001 г. по сегодняшний день. Разрешение 230 м позволяет соблюсти баланс между детализацией и охватом, а автоматическая обработка спутниковых данных программы MODIS позволяет выпускать карты каждый год по мере накопления данных. Для их создания использовалась локально-адаптивная классификация LAGMA (*англ.* Locally Adaptive Global Mapping Algorithm) (Bartalev et al., 2014), основанная на методе RF (*англ.* Random Forest). Институт космических исследований РАН ежегодно выпускает серию карт, позволяющих получить ценные сведения о растительном покрове Северной Евразии: карта типов растительности (23 класса); породный состав лесов; запасы древесины; категории сельскохозяйственных земель. Продукты доступны на ресурсах Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019) или по запросу. Данные картографические продукты представляют большой интерес из-за своего временного охвата, межгодовой сопоставимости и разнообразия выделяемых классов. Однако полномасштабная оценка точности этих продуктов не проводилась или пока не была опубликована.

Данные среднего пространственного разрешения (30 м)

Размер пикселя 30 м стал эталонным из-за длительного применения данных со спутников американской группировки Landsat. Такие данные позволяют перейти от изучения глобальных процессов к анализу региональных ландшафтов, включая выделение основных

типов растительных сообществ, картографирование границ сельскохозяйственных полей и лесных массивов, а также анализ последствий природных и антропогенных катастроф. Универсальность этих данных заключается в большей верификации и детализации мелко-масштабных продуктов, но при этом они не представляются избыточными по стоимости и объёму.

Набор данных **GLC30** (*англ.* GlobeLand30) стал первым глобальным набором данных о земном покрове с ПР 30 м, созданным Национальным центром геоматики Китая NGCC (*англ.* National Geomatics Center of China) как результат инициативы Global Land Cover Mapping at Finer Resolution (<https://www.un-spider.org/links-and-resources/data-sources/land-cover-map-globeland-30-ngcc>). Продукт был впервые представлен в 2014 г., а его официальный релиз состоялся в 2015 г. Первоначальные версии охватывали 2000 и 2010 гг., но в 2020 г. продукт был обновлён и это закрепило периодичность выпуска каждые десять лет. Основными источниками данных послужили многоспектральные снимки Landsat-4/5/7, дополненные изображениями с китайского спутника Huanjing-1 для эпохи 2010 г. Для GLC30 выбрана гибридная схема распознавания ПОК (*англ.* pixel—object—knowledge): методология построена на интеграции пиксельных и объектно-ориентированных классификаторов с использованием спектральных, текстурных и контекстуальных признаков (Chen et al., 2015). Классификация земной поверхности основана на 10 базовых тематических классах — это подчёркивает соответствие международным классификациям и решениям глобальных задач. Точность оценивалась, в частности, на национальном уровне в Италии, где сравнивалась с детальными региональными наборами данных, и она превысила 80 %. При этом наиболее надёжно определяются леса, водные объекты и сельхозугодья, тогда как болота и тундра остаются наиболее сложными для распознавания (Brovelli et al., 2015). Продукт часто применяется в качестве «базисного» слоя в исследованиях согласованности глобальных спутниковых карт покрова, а также считается вспомогательным инструментом для уточнения параметров земной поверхности в моделях рассеивания загрязняющих веществ, таких как AERMOD (*англ.* American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model) (Балтер и др., 2021).

Ещё один глобальный набор данных — **GLC_FCS30D** (*англ.* Global 30 m Land-Cover Dynamics monitoring product with a Fine Classification System) — разработан в Институте дистанционного зондирования и цифровой Земли при Академии наук Китая (*англ.* Institute of Remote Sensing and Digital Earth (RADI), Chinese Academy of Sciences (CAS)) и выпущен в 2023 г. (<https://doi.org/10.5281/zenodo.8239305>). Продукт создан на основе плотных серий многолетних композитов Landsat, охватывающих период с 1985 по 2022 г., а для обработки данных использован алгоритм машинного обучения CCDC (*англ.* Continuous Change Detection and Classification), который непрерывно анализирует все доступные изображения для каждого пикселя и позволяет определять изменения (Zhang et al., 2024). Пространственно-временная классификация выделяет 35 категорий земного покрова. Глобальная средняя точность достигает 81 %, что делает продукт сопоставимым с другими современными спутниковыми картами, но его особенностью оказывается акцент на динамическом обновлении и высокой детализации временных рядов (Liu, Zhang, 2024). Набор данных GLC_FCS30D особенно ценен для исследований глобальных экологических изменений и задач управления земельными ресурсами. Так, например, благодаря этому продукту было выявлено, что за последние 37 лет наиболее значимые изменения связаны с сокращением лесных площадей (чистая потеря около 2,5 млн км²) и расширением сельскохозяйственных угодий (чистый прирост примерно 1,3 млн км²) (Zhang et al., 2024).

Серия карт **AGLC-2000-2015** (*англ.* Annual Global Land Cover 2000—2015), созданная на основе данных Landsat и опубликованная в 2021 г. (Xu et al., 2021), стала ещё одним глобальным продуктом из Китая в сочетании с другими источниками, такими как GLC30, FROM-GLC (*англ.* Finer Resolution Observation and Monitoring of Global Land Cover), GLC-FCS30 (<https://zhushandata.com/pages/6e57a6/>). Был сформирован 16-летний временной ряд с 2000 по 2015 г. для анализа межгодовых изменений земной поверхности. Продукт включает 10 классов земного покрова, классифицированных с использованием спектрально-времен-

ного анализа и алгоритмов машинного обучения (в том числе RF и CCDC для выявления изменений). Общая точность классификации продукта составляет 76 %. Важной отличительной чертой AGLC-2000-2015 представляется наличие в его метаданных оценки достоверности для каждого пикселя. Так, с помощью этого продукта уже было зафиксировано заметное расширение городов в дельте Чжуцзяна и «зеркала воды» (поверхности озера) в районе Силинг-Цо, а также значительное обезлесение в долине реки Амазонки. Набор данных доступен для исследований через платформу GEE (*англ.* Google Earth Engine) (Gorelick et al., 2017).

Отметим, что доступ ко многим рассмотренным далее продуктам также предоставляется через систему GEE (<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/tags/landcover>). Этот сервис обеспечивает эффективную обработку больших объёмов данных и способствует их активному использованию в научных и прикладных задачах.

Далее в разделе рассмотрен ряд продуктов, созданных в лаборатории GLAD (*англ.* Global Land Analysis and Discovery) (<https://glad.geog.umd.edu/>) при Университете Мэриленда UMD (*англ.* University of Maryland). Эта лаборатория известна целым рядом глобальных картографических продуктов, которые играют ключевую роль в мониторинге растительного покрова. Созданные там картографические продукты отличаются модульным подходом: вместо единой классификации они предоставляют набор тематических слоёв, включая непрерывные показатели (например, высота древостоя, доля голого грунта) и бинарные классы (например, водные объекты, поселения). Это позволяет пользователям комбинировать слои для создания собственных классификаций, соответствующих местным или региональным определениям земного покрова. Все продукты GLAD имеют ПР 30 м и глобальный охват между 75° с. ш. и 56° ю. ш. Организация придерживается принципов открытых данных, поэтому продукты доступны для скачивания через сайт лаборатории (<https://glad.geog.umd.edu/dataset>) или GEE (<https://glad.earthengine.app/>).

Набор данных **GLAD GLCLUC** (*англ.* Global Land Cover and Land Use Change), опубликованный в 2022 г., охватывает период 2000–2020 гг. и акцентируется на динамике пяти больших категорий: лесов, сельскохозяйственных угодий, застроенных территорий, поверхностных вод и зон многолетнего снега и льда (Potapov et al., 2022). Продукт оперирует 106 градиентными классами, что позволяет гибко комбинировать признаки. Основой данных служат многолетние ряды спутниковых данных Landsat-5/7/8, нормализованных в формате GLAD ARD (*англ.* Analysis Ready Data); формирует регулярно обновляемую серию нормализованных снимков с 16-дневной периодичностью (с 1997 г.) (Potapov et al., 2020). Для классификации применяются несколько методов: деревья решений используются для выявления сельскохозяйственных угодий и постоянных снежников, регрессионные модели на основе лидарных данных миссии GEDI (*англ.* Global Ecosystem Dynamics Investigation) — для оценки высоты древостоя, а свёрточные нейронные сети — для идентификации застроенных территорий с привлечением данных OpenStreetMap. Точность варьируется по темам: для лесного покрова она превышает 90 %, для динамических классов (например, прирост или утрата леса) или для застроенных территорий из-за включения в этот класс внутригородской растительности несколько ниже.

Сопутствующий продукт — **GLAD GLCLU** (*англ.* Global Land Cover and Land Use 2019) — также выпущен в 2022 г. (Hansen et al., 2022). В отличие от динамического набора, этот продукт представляет собой статичную карту с 14 упрощёнными классами земного покрова за 2019 г., но его модульная структура включает как тематические слои, так и непрерывные. Для её построения использовались методы глубокого обучения, обеспечившие общую точность порядка 78–85 %.

Стоит отметить, что одним из наиболее цитируемых в GLAD выступает набор данных **GFC** (*англ.* Global Forest Change), впервые опубликованный в 2013 г. под руководством М.С. Хансена и коллег (Hansen et al., 2013). Он также основан на обработке многолетних серий изображений Landsat и обеспечивает глобальную оценку лесного покрова с 2000 г., фиксируя как ежегодные потери и прирост леса, так и исходное распределение деревьев. Его валидация показала высокую точность, что сделало GFC фактически стандартом для глобального мониторинга лесов.

Следовательно, продукт GFC считается специализированным для анализа динамики лесов, тогда как продукты GLCLUC и GLCLU расширяют подход и создают многоотраслевые карты земного покрова: первый обеспечивает исследование долгосрочных процессов изменения земной поверхности, а второй служит эталонным срезом состояния растительного покрова и землепользования на 2019 г.

Ещё один продукт, который следует отметить, это выпущенный в 2024 г. **SBTN NLM** (*англ.* Science Based Targets Network Natural Lands Map) (<https://landcarbonlab.org/insights/natural-lands-map-companies-no-conversion-targets/>). Карта служит базовым слоем для выявления природных территорий, критически важных для сохранения биоразнообразия и экосистемных услуг, и создана для поддержки устойчивого корпоративного управления и выполнения природоохранных регламентов. В основе карты лежит синтез различных данных ДЗЗ, включая уже рассмотренные глобальные карты земного покрова, а также доступные региональные для сложных экосистем, что обеспечивает пространственное разрешение в 30 м по всему миру. Продукт имеет глобальный охват с фокусом на ключевые экологические регионы. Базовым временным срезом для анализа выбран 2020 г., при этом проект предусматривает возможность будущих периодических обновлений по мере поступления новой спутниковой информации. Система классификации объединяет бинарное разделение на *natural/non-natural* и более детальные классы, выделяющие области высокой природоохранной ценности, формируемые с использованием экологических моделей и сложного алгоритмического пространственного анализа (Mazur et al., 2025). Из-за такого подхода общая точность карты превышает 91 %. Данные открытые, доступны на платформе GEE и интегрированы в интернет-ресурс GFW (*англ.* Global Forest Watch) (<https://www.globalforest-watch.org/>).

Таким образом, на основе длительных архивов съёмок с ПР 30 м сформирован ряд глобальных картографических продуктов, обеспечивающих единые методологические принципы классификации растительного покрова и создающих основу для глобального мониторинга фенологических и ландшафтных изменений. В свою очередь крупные страны мира развивают собственные региональные атласы и тематические карты, адаптированные к национальным экосистемным особенностям и специфике землепользования, что обеспечивает более высокую точность локальных оценок. Такое сочетание глобальных и национальных продуктов, построенных на однородном пространственном разрешении, формирует сквозную иерархию, способствующую всестороннему анализу растительного покрова на различных масштабах. Хотя большинство из этих продуктов напрямую не затрагивают территорию интереса настоящей статьи, они добавлены в обзор из-за схожести ряда ландшафтных областей и возможности использовать применённые авторами этих работ подходы к картографированию.

Один из таких продуктов — национальная база покрова земель США **NLCD** (*англ.* National Land Cover Database), которая создана Геологической службой США (*англ.* United States (U.S.) Geological Survey — USGS) в рамках межведомственного консорциума MRLC (*англ.* Multi-Resolution Land Characteristics) и впервые опубликована в 2001 г. (<https://www.mrlc.gov/documentation>). Основой служат снимки спутников семейства Landsat, дополненные цифровыми моделями рельефа и вспомогательными геоданными на территории континентальной части США, а также Аляски, Гавайев и Пуэрто-Рико. Классификация проводится по иерархической схеме и делится на два уровня: на уровне I 9 обширных классов; на уровне II (схема Андерсона) насчитывается 16 классов (до 2020 г. было 20 классов), а также дополняется легендами непрерывных полей (доли непроницаемых поверхностей (*англ.* *impenetrable surface*) и доли древесного полога (*англ.* *tree canopy cover*)). Данные варьируют в пределах 72–86 % точности на уровне всего континента, находятся в открытом и бесплатном доступе через платформы MRLC Viewer (<https://www.mrlc.gov/viewer/>), GEE и портал USGS EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Для аграрного мониторинга Национальной службой сельскохозяйственной статистики (*англ.* National Agricultural Statistics Service — NASS) Министерства сельского хозяйства США (*англ.* U.S. Department of Agriculture — USDA) разработан **CDL** (*англ.* Cropland Data Layer).

Созданный в 2008 г. для континентальной части США проект предоставляет ежегодные карты покрова с детализацией до конкретных культур (https://www.nass.usda.gov/Research_and_Science/Cropland/SARS1a.php). Основными источниками данных служат снимки со спутников Landsat-8/9 и Sentinel-2. Для классификации применяются алгоритмы машинного обучения, изначально DT (*англ.* Decision Tree) (Lin et al., 2022), а в последние годы — RF, что позволяет различать до 133 классов сельскохозяйственных культур (согласно FSA (*англ.* Farm Service Agency)) и других типов растительности. Вдобавок в метаданных содержатся ежегодные оценки точности и сводные площади по регионам, а каждому пикселю присваивается значение уровня достоверности (*англ.* confidence score). Для основных культур, таких как кукуруза и соя, точность в среднем достигает 81 % и выше, при этом важно учитывать, что несельскохозяйственные классы формируются из внешних источников. Данные обновляются ежегодно и находятся в открытом доступе через платформу CroplandCROS (*англ.* Cropland Collaborative Research Outcomes System), а с 2024 г. ещё и в GEE. Стоит отметить, что с того же 2024 г. NASS официально выпускает CDL с ПР 10 м, и это существенно улучшило детализацию контуров полей и границ культур.

Ближайшая к США Канада тоже в своё время создала картографический продукт на основе спутниковых данных. Ежегодная инвентаризация сельскохозяйственных культур Канады (*англ.* Annual Crop Inventory — ACI) разработана Министерством сельского хозяйства и продовольствия Канады (*англ.* Agriculture and Agri-Food Canada — AAFC) в 2009 г. (<https://open.canada.ca/data/en/dataset/ba2645d5-4458-414d-b196-6303ac06c1c9>). Продукт является национальной картой землепользования и сельскохозяйственных культур (Fisette et al., 2013). Он обновляется ежегодно и охватывает все регионы страны, включая северные территории. На протяжении длительного периода использовались разные многолетние временные ряды данных ДЗЗ, но в последнее время это в основном оптические Landsat и Sentinel-2, а также радиолокационные снимки от RCM (*англ.* RADARSAT Constellation Mission). Комбинация оптических и SAR-данных (*англ.* synthetic-aperture radar) позволяет эффективно картографировать посевы в условиях облачности и уточнять различия между культурами. Классификация выполняется с помощью алгоритма DT, использующего спектральные и временные признаки, в том числе сезонные вегетационные индексы, а также текстурные характеристики радиолокации. Легенда продукта включает свыше семидесяти детализированных классов, среди которых зерновые, бобовые, масличные, овощные, садовые и специальные культуры, а ещё леса, болота и урбанизированные территории. По основным сельскохозяйственным культурам достигается средняя точность порядка 85 %. Данные распространяются бесплатно через правительственный портал Open Government Portal и платформу GEE. Благодаря многолетней последовательности и ежегодным обновлениям сельскохозяйственные продукты широко применяются для мониторинга аграрного производства, оценки изменений агроландшафтов и не только.

Лесной службой США (*англ.* U.S. Forest Service — USFS) в 2012 г. разработана система мониторинга изменений ландшафтов LCMS (*англ.* Landscape Change Monitoring System), которая предназначена для отслеживания за экосистемами по всей территории Соединённых Штатов (Housman et al., 2022). Продукт использует длительный временной ряд начиная с 1985 г. и по сей день. В отличие от остальных карт ландшафтного покрова, LCMS одновременно формирует три слоя — изменения растительности, земельный покров и землепользование, что позволяет интерпретировать причины нарушений, включая пожары, вырубки, насекомых, болезни или гидрологические преобразования. Методика основана на анализе временных рядов Landsat (в последние годы добавлены данные Sentinel-2 для повышения временного покрытия) с применением двух алгоритмов сегментации LandTrendr (Kennedy et al., 2018) и CCDC и ансамблевой модели RF. Система классифицирует изменения по типам, выделяя классы быстрой и медленной потери растительности, её прироста и стабильных участков. Точность классификации, оцениваемая с помощью кросс-валидации и сравнения с эталонными данными, в целом достигает 79 %, варьируясь в зависимости от класса и региона. Продукт обновляется ежегодно и доступен свободно через LCMS Data Explorer (<https://apps.fs.usda.gov/lcms-viewer/>) и GEE.

В 2021 г. Китай также представил свой региональный набор данных **CLCD** (*англ.* China Land Cover Dataset) (<https://doi.org/10.5281/zenodo.15853565>). Он разработан группой исследователей из Уханьского университета (*англ.* Wuhan University) (Yang, Huang, 2021) и представляет собой первую долгосрочную серию (с 1990 г.) ежегодных карт земельного покрова страны с ПР 30 м. Для его формирования применялись всё те же снимки, а обработка данных осуществлялась сразу на платформе GEE с использованием RF и применением спектральных и фенологических метрик; постобработка обеспечила согласованность между годами. Легенда включает девять основных классов. Средняя общая точность составляет около 79 %, что сопоставимо по сравнению с глобальными китайскими спутниковыми продуктами. Данные распространяются свободно через международные репозитории, однако в Китае доступ к ним регулируется национальными информационными порталами.

Данные высокого пространственного разрешения (10 м)

Снимки с разрешением 10 м открывают возможности для детального картографирования растительного покрова на уровне отдельных участков. Несмотря на ограниченную площадь съёмки, меньшую периодичность наблюдений, необходимость в значительном объёме данных и повышенных требованиях к вычислительным ресурсам, их использование способствует уточнению продуктов более низкого пространственного разрешения. Эти данные обеспечивают переход от регионального к локальному масштабу и незаменимы для решения задач точечного земледелия, лесного хозяйства, мониторинга антропогенного воздействия.

Все доступные продукты с таким ПР имеют много общих характеристик. Например, исследуемые наборы данных в этом разделе являются глобальными картами земного покрова, основанными на данных европейского спутника Sentinel-2. Также они придерживаются схожего стандарта классификации, включающего девять основных категорий: водная поверхность, водно-болотные угодья, древесная, кустарниковая и травянистая (пастбища) растительность, сельскохозяйственные земли, антропогенная застройка, «голая» земля (пустыни) и постоянный снежный или ледяной покров. Такое деление согласуется с международными системами FAO (*англ.* Food and Agriculture Organization of the United Nations) и IGBP и облегчает сопоставимость между глобальными продуктами. Но есть ряд различий, которые представлены далее подробно.

Набор данных **FROM-GLC10**, разработанный в Университете Цинхуа (*англ.* Tsinghua University) (Китай), является важным историческим продуктом, первым предложившим глобальное покрытие с разрешением 10 м в 2017 г. (Gong et al., 2019). В основу классификации легли данные за 2015 г. и использовался алгоритм RF, обученный на ограниченной, но репрезентативной выборке из более чем 300 тыс. точек по всему миру. Легенда состоит из 10 обобщённых классов, в которую также входят тундровые зоны. Глобальная итоговая точность составила около 73 % (для повышения точности комбинировались пиксельный и объектно-ориентированный подходы), что сопоставимо с 30-метровыми продуктами, но обеспечивает гораздо более детальную пространственную структуру. Набор данных FROM-GLC10 стал одним из первых в мире глобальных общедоступных продуктов такого высокого разрешения, что открыло новые возможности для детального мониторинга изменений земной поверхности в глобальном масштабе.

Карта **ESA WorldCover** от Европейского космического агентства и консорциума под руководством VITO появилась позднее, в 2021 г. (Zanaga et al., 2022). Она построена на основе не только оптических данных компании Copernicus, но и с использованием радарных Sentinel-1. Продукт охватывает состояние поверхности за 2020–2021 гг. и состоит из 11 классов земного покрова: вдобавок к базовым добавлены отдельные классы мангровых зарослей и мхов/лишайников. Для классификации использовался передовой алгоритм машинного обучения — градиентный бустинг, основанный на деревьях решений, и это позволило достичь самой лучшей общей точности классификации среди схожих продуктов на уровне

77 %. В перспективе ESA планирует дополнить карту параметрами структуры растительности и биомассы, что значительно расширит её прикладной потенциал.

Компания ESRI (*англ.* Environmental Systems Research Institute) в партнёрстве с Impact Observatory и Microsoft выпустила собственный продукт **LULC** (*англ.* Land Use Land Cover) (Karra et al., 2021). В отличие от прошлых продуктов он ежегодно обновляется с 2017 г. и по сей день. Классификация выполняется моделью глубокого обучения на архитектуре U-Net, которая была обучена на миллиарде пикселей эталонных данных, размеченных человеком, что обеспечивает разную точность в зависимости от класса и региона, и автоматически распределяет пиксели по девяти классам, адаптированным из системы классификации FAO LCCS. Ключевой особенностью продукта представляется его полная открытость и бесшовная интеграция с экосистемой ESRI: данные находятся в свободном доступе через платформу ArcGIS Living Atlas of the World, а также через Microsoft Planetary Computer и GEE.

Ещё один важный продукт в этой высокодетальной серии — созданный компанией Google и Институтом мировых ресурсов (*англ.* World Resources Institute — WRI) **Dynamic World** (Brown et al., 2022). Хотя публичный запуск состоялся в 2022 г., его разработка и обучение модели велись с 2020 г. Уникальность Dynamic World заключается в его способности предоставлять информацию в почти реальном времени: благодаря ежедневной обработке тысяч новых снимков обновление данных для любой территории происходит каждые 2–5 дней в зависимости от уровня облачности. Алгоритмической основой продукта является свёрточная нейронная сеть, которая классифицирует каждый пиксель снимка по одному из девяти тематических классов земного покрова. Средняя точность классификации составляет порядка 74 %, что является высоким показателем для глобального продукта с такими частыми обновлениями. В то время как ESA WorldCover предлагает 11 классов земного покрова, но не обновляется, а ESRI LULC применяет дополнительную пространственную фильтрацию для уменьшения шума, Dynamic World фокусируется на максимальной актуальности благодаря непрерывному потоку данных и предоставлению вероятностных оценок для каждого класса. Это делает его хорошим инструментом для мониторинга быстропротекающих процессов: вырубки лесов, последствий стихийных бедствий, динамики сельхозугодий. Как и многие, эти данные распространяются открыто и бесплатно.

Говоря о точности и сопоставимости представленных в данном разделе продуктов, необходимо отметить, что уже есть работы, проводящие их совместную оценку, например (Venter et al., 2022; Xu et al., 2024). В этих исследованиях получены различные значения точности для разных классов, однако из них очевидно следует, что локальная точность каждого продукта может значительно отличаться от общей глобальной точности. Например, продукт Dynamic World имеет значительные проблемы на засушливых территориях, путая классы сельскохозяйственных угодий, травянистой и кустарниковой растительности, в то же время в умеренных широтах такой проблемы нет. Это дополнительно говорит о необходимости валидировать и уточнять оценки, полученные с помощью каждого такого набора данных на конкретной области исследования.

Таким образом, представленный текстовый обзор демонстрирует значительное разнообразие существующих картографических продуктов растительного покрова, различающихся по своей цели, методике и областям применения. Множественность и вариативность ключевых атрибутов обуславливают необходимость их систематизации и наглядного сопоставления. Для комплексного сравнительного анализа основных характеристик рассмотренных продуктов далее следует сводная *таблица*, структурирующая их по следующим критериям: год издания, использованные системы ДЗЗ, пространственное разрешение, охват, временной период, обновляемость, количество классов и модель обработки. Данная таблица служит основой для последующего анализа и выявления ключевых тенденций в области спутникового картографирования земельного покрова.

Сводная таблица картографических продуктов

Название	Год издания	Система ДЗЗ	ПР, м	Территория	Годы	Обновление (периодичность)	Количество классов	Модель
CORINE LC	1990	Sentinel-1/2, Landsat-8 (панее Landsat-5/7, SPOT-4/5, IRS-P6, RapidEye)	100	Европа	1986–2018	6 лет	44	Semi-Automatic Computer Assisted Photointerpretation
IGBP-DISCover	1997	NOAA AVHRR	1000	Глобальная	1992–1993	–	17	Unsupervised Classification
GLC2000	2003	SPOT VGT	1000	Глобальная	2000	–	21	Supervised and Unsupervised Classifications
GlobCover	2008	Envisat MERIS	300	Глобальная	2004–2009	–	22	Spectro-Temporal Classification
ESA CCI LC	2010	MERIS, AVHRR, PROBA-V, Sentinel-2/3	300	Глобальная	1992–2022	–	22	Spectro-Temporal Classifications
MODIS LC	2010	MODIS (Terra, Aqua)	500	Глобальная	2001–2023	Ежегодно	9–17	Decision Tree
CGLS-LC100	2015	PROBA-V	100	Глобальная	2015–2019	–	23	Random Forest
Карты ИКИ РАН	2016	MODIS (Terra, Aqua)	230	Северная Евразия	2001–2024	Ежегодно	23	LAGMA
GLC30	2015	Landsat-4/5/7, Huanjing-1	30	Глобальная	2000–2020	10 лет	10	Pixel–Object–Knowledge
GLC_FCS30D	2023	Landsat composites	30	Глобальная	1985–2022	–	35	Spatiotemporal Classification, Temporal-Consistency Optimization
AGLC-2000-2015	2021	Landsat-5/7/8	30	Глобальная	2000–2015	–	10	Random Forest
GLCLUC (GLAD)	2022	Landsat composites	30	Глобальная	2000–2020	–	5 (106 под-классов)	Decision Tree, CNN, Regression Models
GLCLU (GLAD)	2022	Landsat composites	30	Глобальная	2019	–	14	Bagging Decision Tree Ensembles, U-Net CNN
GFC	2013	Landsat composites	30	Глобальная	2000–2024	Ежегодно	2 (бинарная)	Decision Tree
SBTN NLM	2024	Sentinel and Landsat composites	30	Глобальная	2020	–	11	Series of Overlays and Decision Rules
USGS NLCD	2001	Landsat-4/5/7/8	30	США	1992–2021	2–3 года	по 2019 г. — 20, в 2021 г. — 16	Decision Tree
USDA NASS CDL	2008	Landsat-8/9, Sentinel-2	30	США	1997–2024	Ежегодно	133	Decision Tree, с 2024 г. — Random Forest

Окончание таблицы

Название	Год издания	Система ДЗЗ	ПР, м	Территория	Годы	Обновление (периодичность)	Количество классов	Модель
AAFC ACI	2009	Landsat-8/9, Sentinel-2, RCM (ранее AWiFS, DMC, Gaofen-1, Landsat-5, SPOT, RADARSAT-2)	30	Канада	2009–2024	Ежегодно	73	Decision Tree
USFS LCMS	2012	Landsat-4/5/7/8/9, Sentinel-2	30	США	1985–2024	Ежегодно	LC – 14, LU – 6	Random Forest, Ensemble CART
CLCD	2021	Landsat-5/7/8	30	Китай	1985–2024	Ежегодно	9	Random Forest
FROM-GLC10	2017	Sentinel-2	10	Глобальная	2015	–	10	Stable Classification with Limited Global Sample
ESA WorldCover	2021	Sentinel-1/2	10	Глобальная	2020–2021	–	11	CatBoost
ESRI LULC	2021	Sentinel-2	10	Глобальная	2017–2024	Ежегодно	9	U-Net CNN
Dynamic World	2020	Sentinel-2	10	Глобальная	2015–2025	2–5 дней	9	Fully Convolutional Neural Network

Примечание: IRS-P6 (англ. Indian Remote-Sensing Satellite-P6); AWiFS (англ. Advanced Wide Field Sensor); DMC (англ. Disaster Monitoring Constellation); CNN (англ. Convolutional Neural Network). Цветом обозначены: 1) ПР согласно разделам в статье; 2) зелёный цвет — обновляются (сколько раз), красный — нет (—).

Общий анализ картографических продуктов

Историческая последовательность издания (*рис. 1*) иллюстрирует общее увеличение частоты выпуска новых продуктов в период до и после 2008 г.: с одного раза в интервале 4–7 лет (1990–2008) до нескольких раз в промежутке 1–3 года (2008–2025). Также прослеживается тенденция на постоянное улучшение пространственного разрешения (*рис. 2*).

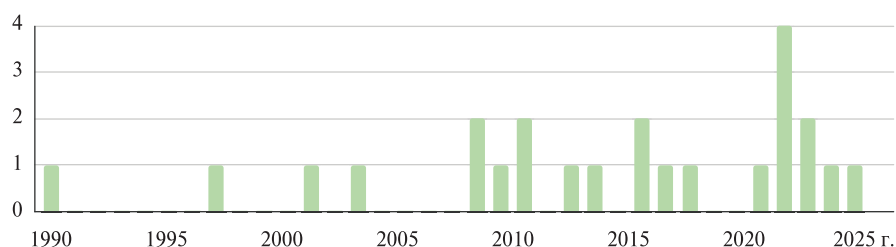


Рис. 1. Появление рассмотренных продуктов спутникового картографирования по годам

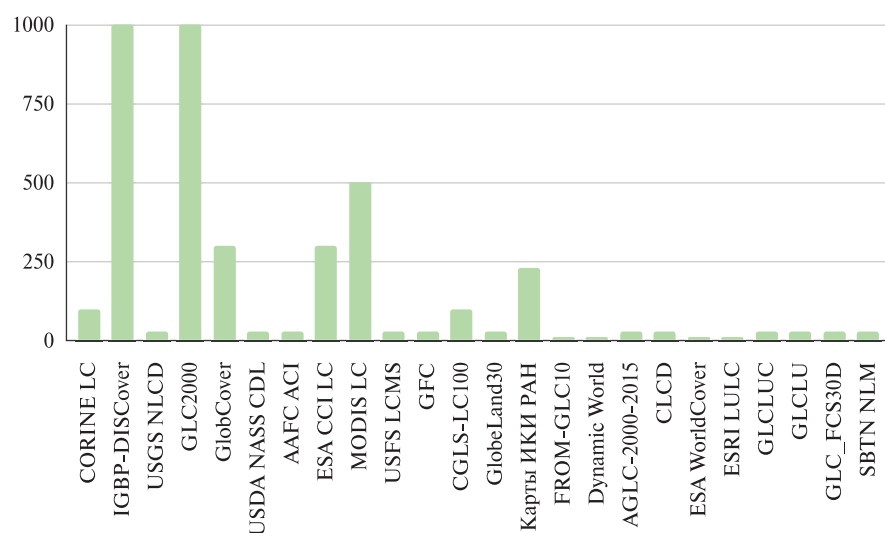


Рис. 2. Динамика ПР (в м) всех выпускаемых продуктов (в хронологической последовательности)

При выборе продукта стоит учитывать территориальный охват и серийность выпуска. Поэтому на *рис. 3, 4* (см. с. 39) представлены временные периоды глобальных и региональных карт соответственно с указанием их обновляемости.

Заключение

Проведённый обзор 24 картографических спутниковых продуктов растительности демонстрирует их ключевую роль в решении задач мониторинга состояния экосистем, учёта земель и оценки углеродного баланса. Наблюдается устойчивая положительная динамика в развитии данной области: ежегодно появляются новые продукты, а существующие последовательно совершенствуются. Ключевыми тенденциями выступают повышение пространственного разрешения, что позволяет детализировать структуру растительности, и рост общей точности классификации за счёт применения более совершенных алгоритмов на основе машинного обучения и использования данных мультисенсорных спутниковых систем.

Большинство рассмотренных продуктов, особенно глобальные карты с разрешением 10–30 м, демонстрируют высокий потенциал для их применения в качестве базового слоя для

оценки изменений типов землепользования, в частности, при составлении национального кадастра парниковых газов. В то же время для повышения достоверности расчётов, особенно на обширных и неоднородных территориях, актуальной задачей остаётся проведение дополнительных исследований. Потенциальные задачи следующие:

- проведение валидации имеющихся картографических продуктов на территории России с учётом специфики её природных зон и структуры землепользования для определения их реальной точности;
- сопоставление имеющихся картографических продуктов как между собой, так и между различными годами для определения возможности их совместного использования;
- оценка соотношения между классами в картографических наборах данных и категориями, используемыми в национальной методике расчёта парниковых газов.

Решение этих задач позволит перейти к обоснованному использованию имеющихся спутниковых карт растительного покрова и типов землепользования в климатической отчётности.

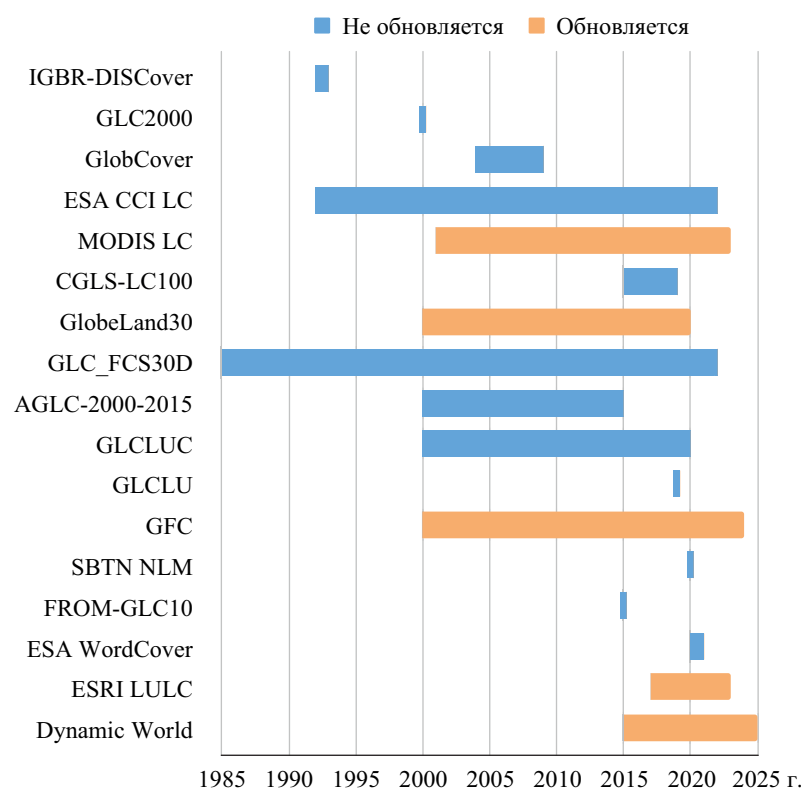


Рис. 3. Временной охват глобальных продуктов

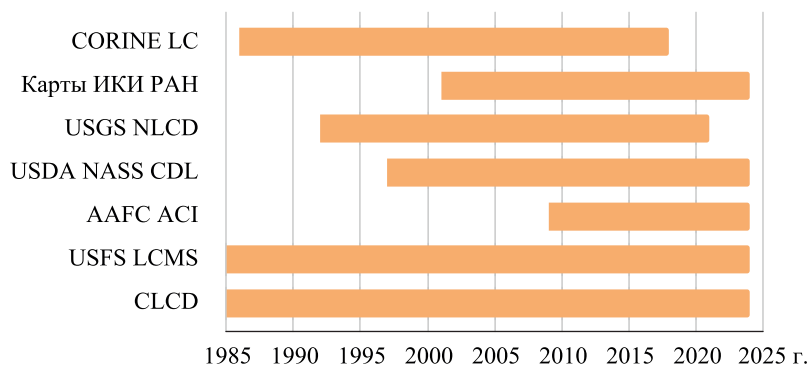


Рис. 4. Временной охват региональных продуктов

Работа выполнена в рамках темы ИКИ РАН «Мониторинг» (госрегистрация № 126031818938-6). Также авторы выражают благодарность Жарко Василию Олеговичу за ценные советы на этапе подбора работ для обзора.

Литература

1. Балтер Б. М., Балтер Д. Б., Егоров В. В. и др. Данные космических наблюдений параметров поверхности в модели рассеяния индустриальных загрязнений воздуха AERMOD. Часть 1. Обзор, данные, классификация землепользования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 97–111. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-97-111.
2. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
3. Лупян Е. А., Прошин А. А., Буцнев 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. Bartalev S. A., Egorov V. A., Loupian E. A., Khvostikov S. A. A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data // Remote Sensing Letters. 2014. V. 5. No. 1. P. 55–64. DOI: 10.1080/2150704X.2013.870675.
5. Belward A. S., Estes J. E., Kline K. D. The IGBP-DIS global 1-km land-cover data set DISCover: a project overview // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1999. V. 65. No. 9. P. 1013–1020.
6. Bicheron P., Defourny P., Brockmann C., Schouten L., Vancutsem C., Huc M., Bontemps S., Leroy M., Achard F., Herold M., Ranera F., Arino O. GlobCover — Products Description and Validation Report. Toulouse (France): MEDIAS-France, 2008. Article JRC49240.
7. Brovelli M. A., Molinari M. E., Hussein E. et al. The first comprehensive accuracy assessment of GlobeLand30 at a national level: Methodology and results // Remote Sensing. 2015. V. 7. No. 4. P. 4191–4212. DOI: 10.3390/rs70404191.
8. 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. No. 1. Article 251. DOI: 10.1038/s41597-022-01307-4.
9. Buchhorn M., Lesiv M., Tsendbazar N.-E. et al. Copernicus Global Land Cover layers — Collection 2 // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 6. Article 1044. DOI: 10.3390/rs12061044.
10. Chen J., Chen J., Liao A. et al. Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2015. V. 103. P. 7–27. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.09.002.
11. Fisette T., Rollin P., Aly Z. et al. AAFC annual crop inventory // 2nd Intern. Conf. on Agro-Geoinformatics. 2013. P. 270–274. DOI: 10.1109/Argo-Geoinformatics.2013.6621920.
12. Gong P., Liu H., Zhang M. et al. Stable classification with limited sample: transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017 // Science Bull. 2019. V. 64. No. 6. P. 370–373. DOI: 10.1016/j.scib.2019.03.002.
13. 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.
14. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R. et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change // Science. 2013. V. 342. No. 6160. P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.
15. Hansen M. C., Potapov P. V., Pickens A. H. et al. Global land use extent and dispersion within natural land cover using Landsat data // Environmental Research Letters. 2022. V. 17. No. 3. Article 034050. DOI: 10.1088/1748-9326/ac46ec.
16. Housman I., Campbell L., Heyer J., Goetz W., Finco M., Megown K., Pugh N. US Forest Service Landscape Change Monitoring System methods. Salt Lake City, UT: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Geospatial Technology and Applications Center, 2022. 27 p.
17. Karra K., Kontgis C., Statman-Weil Z. et al. Global land use / land cover with Sentinel 2 and deep learning // IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 2021. P. 4704–4707. DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553499.
18. Kennedy R. E., Yang Z., Gorelick N. et al. Implementation of the LandTrendr algorithm on Google Earth Engine // Remote Sensing. 2018. V. 10. No. 5. Article 691. DOI: 10.3390/rs10050691.
19. Lin L., Di L., Zhang C. et al. Validation and refinement of cropland data layer using a spatial-temporal decision tree algorithm // Scientific Data. 2022. V. 9. No. 1. Article 63. DOI: 10.1038/s41597-022-01169-w.
20. Liu L., Zhang X. Algorithm, Progresses, Datasets and Validation of GLC_FCS30D: the first global 30 m land-cover dynamic product with fine classification system from 1985 to 2022 // ISPRS Annals of

- the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2024. V. 10. No. 2. P. 137–143. DOI: 10.5194/isprs-annals-X-2-2024-137-2024.
21. *Mayaux P., Eva H., Gallego J. et al.* Validation of the global land cover 2000 map // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2006. V. 44. No. 7. P. 1728–1739. DOI: 10.1109/TGRS.2006.864370.
 22. *Mazur E., Sims M., Goldman E., Schneider M., Pirri M. D., Beatty C. R., Stolle F., Stevenson M.* SBTN Natural Lands Map — Technical Documentation. Version 1.1. Science Based Targets Network, 2025. 73 p.
 23. *Potapov P., Hansen M. C., Kommareddy I. et al.* Landsat analysis ready data for global land cover and land cover change mapping // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 3. Article 426. DOI: 10.3390/rs12030426.
 24. *Potapov P., Hansen M. C., Pickens A. et al.* The global 2000–2020 land cover and land use change dataset derived from the Landsat archive: First results // Frontiers in Remote Sensing. 2022. V. 3. Article 856903. DOI: 10.3389/frsen.2022.856903.
 25. *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.
 26. *Xu X., Li B., Liu X. et al.* Mapping annual global land cover changes at a 30 m resolution from 2000 to 2015 // National Remote Sensing Bull. 2021. V. 25. No. 9. P. 1896–1916. DOI: 10.11834/jrs.20211261.
 27. *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.
 28. *Yang J., Huang X.* The 30 m annual land cover and its dynamics in China from 1990 to 2019 // Earth System Science Data. 2021. V. 13. No. 8. P. 3907–3925. DOI: 10.5194/essd-13-3907-2021.
 29. *Zanaga D., Van De Kerchove R., Daems D. et al.* ESA WorldCover 10 m 2021 v200 // <https://zenodo.org>. 28.10.2022. DOI: 10.5281/zenodo.7254221.
 30. *Zhang X., Zhao T., Xu H. et al.* GLC_FCS30D: the first global 30 m land-cover dynamics monitoring product with a fine classification system for the period from 1985 to 2022 generated using dense-time-series Landsat imagery and the continuous change-detection method // Earth System Science Data. 2024. V. 16. No. 3. P. 1353–1381. DOI: 10.5194/essd-16-1353-2024.

Review of works in mapping of land use types in Russia based on remote sensing data

A. A. Miatlev¹, M. Yu. Kolobakhin¹, A. V. Kashnitskii²

¹ *Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*
E-mails: aamyat@mail.ru, ursus.lore@gmail.com

² *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: kashnizky@gmail.com

The article provides a review of 24 global and regional vegetation cover map products based on remote sensing data. The purpose of this work is to analyze their applicability to studying changes in land use types in Russia, which is essential for assessing the carbon balance and maintaining a national greenhouse gas inventory. The products are systematized by spatial resolution: low (100+ m), medium (30 m), and high (10 m). The key characteristics are examined for each product: satellite systems used, acquisition methods, classes allocated, time coverage, access features, updateability, accuracy, and application areas. The industry development trends are identified: increase in the frequency of data updates, improvement of spatial resolution, and widespread implementation of machine learning algorithms. It is noted that despite the high potential of many products, their use for the territory of Russia needs additional research, including assessment of accuracy and adaptation to national methods of greenhouse gas accounting.

Keywords: remote sensing, cartographic products, vegetation cover maps, satellite mapping, land classification, carbon balance, greenhouse gas inventory, vegetation monitoring

Accepted: 17.02.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-3-25-43

References

1. Balter B. M., Balter D. B., Egorov V. V. et al., Space observations of surface parameters for AERMOD modeling of industrial air pollution. Part 1. Literature review, data, land use classification, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 2, pp. 97–111 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-97-111.
2. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
3. Loupyan 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. Bartalev S. A., Egorov V. A., Loupian E. A., Khvostikov S. A., A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data, *Remote Sensing Letters*, 2014, V. 5, No. 1, pp. 55–64, DOI: 10.1080/2150704X.2013.870675.
5. Belward A. S., Estes J. E., Kline K. D., The IGBP-DIS global 1-km land-cover data set DISCover: a project overview, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1999, V. 65, No. 9, pp. 1013–1020.
6. Bicheron P., Defourny P., Brockmann C., Schouten L., Vancutsem C., Huc M., Bontemps S., Leroy M., Achard F., Herold M., Ranera F., Arino O., *GlobCover — Products Description and Validation Report*, Toulouse (France): MEDIAS-France, 2008, Article JRC49240.
7. Brovelli M. A., Molinari M. E., Hussein E. et al., The first comprehensive accuracy assessment of GlobeLand30 at a national level: Methodology and results, *Remote Sensing*, 2015, V. 7, No. 4, pp. 4191–4212, DOI: 10.3390/rs70404191.
8. 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, No. 1, Article 251, DOI: 10.1038/s41597-022-01307-4.
9. Buchhorn M., Lesiv M., Tsendbazar N.-E. et al., Copernicus Global Land Cover Layers — Collection 2, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, No. 6, Article 1044, DOI: 10.3390/rs12061044.
10. Chen J., Chen J., Liao A. et al., Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, V. 103, pp. 7–27, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.09.002.
11. Fisette T., Rollin P., Aly Z. et al., AAFC annual crop inventory, *2nd Intern. Conf. on Agro-Geoinformatics*, 2013, pp. 270–274, DOI: 10.1109/Argo-Geoinformatics.2013.6621920.
12. Gong P., Liu H., Zhang M. et al., Stable classification with limited sample: transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017, *Science Bull.*, 2019, V. 64, No. 6, pp. 370–373, DOI: 10.1016/j.scib.2019.03.002.
13. 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.
14. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R. et al., High-resolution global maps of 21st-century forest cover change, *Science*, 2013, V. 342, No. 6160, pp. 850–853, DOI: 10.1126/science.1244693.
15. Hansen M. C., Potapov P. V., Pickens A. H. et al., Global land use extent and dispersion within natural land cover using Landsat data, *Environmental Research Letters*, 2022, V. 17, No. 3, Article 034050, DOI: 10.1088/1748-9326/ac46ec.
16. Housman I., Campbell L., Heyer J., Goetz W., Finco M., Megown K., Pugh N., *US Forest Service Landscape Change Monitoring System methods*, Salt Lake City, UT: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Geospatial Technology and Applications Center, 2022, 27 p.
17. Karra K., Kontgis C., Statman-Weil Z. et al., Global land use / land cover with Sentinel 2 and deep learning, *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, 2021, pp. 4704–4707, DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553499.
18. Kennedy R. E., Yang Z., Gorelick N. et al., Implementation of the LandTrendr algorithm on Google Earth Engine, *Remote Sensing*, 2018, V. 10, No. 5, Article 691, DOI: 10.3390/rs10050691.
19. Lin L., Di L., Zhang C. et al., Validation and refinement of cropland data layer using a spatial-temporal decision tree algorithm, *Scientific Data*, 2022, V. 9, No. 1, Article 63, DOI: 10.1038/s41597-022-01169-w.
20. Liu L., Zhang X., Algorithm, Progresses, Datasets and Validation of GLC_FCS30D: the first global 30 m land-cover dynamic product with fine classification system from 1985 to 2022, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2024, V. 10, No. 2, pp. 137–143, DOI: 10.5194/isprs-annals-X-2-2024-137-2024.
21. Mayaux P., Eva H., Gallego J. et al., Validation of the global land cover 2000 map, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2006, V. 44, No. 7, pp. 1728–1739, DOI: 10.1109/TGRS.2006.864370.

22. Mazur E., Sims M., Goldman E., Schneider M., Pirri M. D., Beatty C. R., Stolle F., Stevenson M., *SBTN Natural Lands Map – Technical Documentation. Version 1.1*, Science Based Targets Network, 2025, 73 p.
23. Potapov P., Hansen M. C., Kommareddy I. et al., Landsat analysis ready data for global land cover and land cover change mapping, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, No. 3, Article 426, DOI: 10.3390/rs12030426.
24. Potapov P., Hansen M. C., Pickens A. et al., The global 2000–2020 land cover and land use change dataset derived from the Landsat archive: First results, *Frontiers in Remote Sensing*, 2022, V. 3, Article 856903, DOI: 10.3389/frsen.2022.856903.
25. 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.
26. Xu X., Li B., Liu X. et al., Mapping annual global land cover changes at a 30 m resolution from 2000 to 2015, *National Remote Sensing Bull.*, 2021, V. 25, No. 9, pp. 1896–1916, DOI: 10.11834/jrs.20211261.
27. 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.
28. Yang J., Huang X., The 30 m annual land cover and its dynamics in China from 1990 to 2019, *Earth System Science Data*, 2021, V. 13, No. 8, pp. 3907–3925, DOI: 10.5194/essd-13-3907-2021.
29. Zanaga D., Van De Kerchove R., Daems D. et al., ESA WorldCover 10 m 2021 v200, <https://zenodo.org>, 28.10.2022, DOI: 10.5281/zenodo.7254221.
30. Zhang X., Zhao T., Xu H. et al., GLC_FCS30D: the first global 30 m land-cover dynamics monitoring product with a fine classification system for the period from 1985 to 2022 generated using dense-time-series Landsat imagery and the continuous change-detection method, *Earth System Science Data*, 2024, V. 16, No. 3, pp. 1353–1381, DOI: 10.5194/essd-16-1353-2024.