

Учебное пособие

А.Н. Шихов, Р.К. Абдуллин

ФОНД КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КАРТ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А.Н. Шихов, Р.К. Абдуллин

ФОНД КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ
ДЛЯ СОЗДАНИЯ КАРТ

Одобрено Федеральным учебно-методическим объединением
в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей
и направлений подготовки 05.00.00 Науки о Земле
в качестве электронного учебного пособия
для студентов образовательных организаций высшего образования,
обучающихся по основным образовательным программам высшего образования
по направлению 05.00.03 Картография и геоинформатика, уровень бакалавриат



Пермь 2024

УДК 528.8(075.8)

ББК 26.17(я73)

Ш653

Шихов А.Н., Абдуллин Р.К.

Ш653 Фонд космических снимков для создания карт [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.Н. Шихов, Р.К. Абдуллин; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Электронные данные. – Пермь, 2024. – 34,12 Мб; 115 с. – Режим доступа: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/SHihov-Abdullin-Fond-kosmicheskikh-snimkov-dlya-sozdaniya-kart.pdf>. – Заглавие с экрана.

ISBN 978-5-7944-4116-1

Учебное пособие посвящено современному мировому фонду спутниковых снимков и созданным на его основе тематическим продуктам. Рассматривается история развития и современное состояние мирового фонда спутниковых снимков в различных спектральных диапазонах, современные тенденции развития фонда снимков и рынка данных дистанционного зондирования Земли из Космоса, основные области применения данных, полученных различными съемочными системами; тематические продукты, созданные на основе спутниковых данных для глобального картографирования природных ресурсов и их многолетней динамики, а также глобальные цифровые модели рельефа, созданные по спутниковым данным.

Пособие предназначено для студентов географического факультета, обучающихся по направлениям «Картография и геоинформатика» и «Геодезия и дистанционное зондирование». Оно также будет полезно для студентов других географических специальностей университетов, а также для широкого круга специалистов, использующих спутниковые снимки и тематические продукты их обработки для решения научных и практических задач, в географических исследованиях и при создании карт.

УДК 528.8(075.8)

ББК 26.17(я73)

Издается по решению ученого совета географического факультета
Пермского государственного национального исследовательского университета

Рецензенты: кафедра картографии и геоинформационных систем Института наук о Земле Тюменского государственного университета (зав. кафедрой, к.г.н., доцент И. Р. Идрисов); к.г.н., научный сотрудник кафедры картографии и геоинформатики МГУ им. М.В. Ломоносова П.Г. Илюшина

ISBN 978-5-7944-4116-1

© ПГНИУ, 2024

© Шихов А.Н., Абдуллин Р.К., 2024

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. МИРОВОЙ ФОНД КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ.	
ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ.....	6
1.1. Основные свойства мирового фонда космических снимков.....	6
1.2. История формирования и современное состояние мирового фонда снимков из Космоса.....	8
1.2.1. Фотосъемка Земли из Космоса.....	9
1.2.2. Спутники метеорологического и океанографического назначения.....	12
1.2.3. Программы глобального спутникового мониторинга Земли (Landsat, EOS, Copernicus).....	22
1.2.4. Важнейшие национальные программы спутникового мониторинга.....	36
1.2.5. Основные коммерческие компании – поставщики данных ДЗЗ.....	44
1.2.6. Основные мировые тенденции развития отрасли ДЗЗ из Космоса.....	52
1.2.7. Российская группировка спутников ДЗЗ из Космоса.....	54
ГЛАВА 2. ТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРОДУКТЫ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДЗЗ.....	58
2.1. Тематические продукты, получаемые по спутниковым данным ДЗЗ низкого пространственного разрешения.....	59
2.2. Тематические продукты, получаемые по спутниковым данным ДЗЗ среднего пространственного разрешения.....	67
ГЛАВА 3. ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА И ПОВЕРХНОСТИ, ПОЛУЧАЕМЫЕ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ.....	77
3.1. Основные особенности цифровых моделей рельефа и способы их получения.....	77
3.2. Открытые данные о рельефе Земли.....	81
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	98
ЛИТЕРАТУРА.....	99
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	105

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) из Космоса, история развития которого насчитывает уже более 60 лет, в настоящее время стало важнейшим способом получения актуальных и объективных данных о процессах и явлениях, происходящих на поверхности суши, в атмосфере и гидросфере. Если еще в начале XXI века всего несколько стран имели свои спутниковые системы ДЗЗ из Космоса, а в открытом доступе спутниковых данных практически не было, то к настоящему времени свои спутники ДЗЗ имеют уже более 20 стран, а всего на орбите находится свыше 1000 космических аппаратов. Они обеспечивают получение данных в разнообразных диапазонах спектра (от видимого до радиоволнового), с различным пространственным разрешением (от 0,25 м до 25 км), и частотой получения снимков (от одного раза в минуту до 1–2 раз в год). Непрерывно возрастает значимость спутниковых данных как источника актуальной и объективной информации для исследований в большинстве наук о Земле, так и для решения различных прикладных задач (от получения прогнозов погоды до градостроительного планирования). Накопленные за десятилетия архивы данных ДЗЗ из Космоса и поступающие новые данные служат источником для изучения происходящих на Земле изменений, связанных с ростом антропогенного воздействия на природу и изменением климата. Доступность данных ДЗЗ из Космоса непрерывно увеличивается благодаря снижению их стоимости, появлению новых открытых данных (с пространственным разрешением до 10 м), а также открытых картографических подложек и сервисов, таких как Google Earth. Непрерывно появляются новые источники данных и тематические продукты, которые упрощают работу с данными ДЗЗ и позволяют решать на их основе новые задачи.

Последним учебным пособием, в котором детально рассматривался мировой фонд космических снимков, был классический учебник географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова [Книжников и др., 2011]. Однако за 12 лет представленная в соответствующих разделах информация существенно устарела и требует актуализации. В настоящем пособии представлен обзор истории развития и современного (на 2023 год) состояния мирового фонда спутниковых снимков, обзор каталогов для получения данных, а также тематических продуктов, созданных на основе спутниковых данных и используемых для глобального картографирования и мониторинга природных ресурсов. Отдельный раздел посвящен цифровым моделям рельефа, созданным на основе данных ДЗЗ из Космоса. Для разных типов данных и тематических продуктов рассмотрены области их применения. Иллюстрации, созданные на основе снимков и тематических продуктов, характеризуют их особенности и возможности применения.

Учебное издание построено в соответствии с программой одноимённого курса, который читается на кафедре картографии и геоинформатики географического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ) с 2015 г. Пособие рассчитано на студентов, уже имеющих базовые знания в данной области. Помимо данного пособия, предполагается использование при изучении курса ранее опубликованных учебников [Балдина, Лабутина, 2021; Шихов и др., 2020].

Авторы выражают благодарности за внимательное прочтение пособия и ценные и советы по содержанию:

- рецензентам: кафедре картографии и геоинформационных систем Института наук о Земле Тюменского государственного университета (зав. кафедрой, к.г.н., доцент И. Р. Идрисов) и к.г.н., научному сотруднику кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова П.Г. Илюшиной;
- эксперту Федерального учебно-методического объединения в системе высшего образования по наукам о Земле к.г.н. А.И. Прасоловой;
- специалисту департамента производства тематических продуктов ООО ИТЦ «СКАНЭКС» Е.С. Перминовой.

ГЛАВА 1

МИРОВОЙ ФОНД КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ. ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ

1.1. Основные свойства мирового фонда космических снимков

Понятие о мировом фонде космических снимков как о едином глобальном архиве данных ДЗЗ из Космоса, который непрерывно формируется операторами космических аппаратов (КА), было впервые введено в классическом учебнике Ю.Ф. Книжникова и В.И. Кравцовой [Книжников и др., 2011]. Мировой фонд снимков из Космоса является информационной основой для решения множества задач, в частности для инвентаризации, мониторинга и картографирования природных ресурсов, состояния экосистем, создания географических информационных систем (ГИС) различного целевого назначения и территориального охвата.

Мировой фонд спутниковых снимков имеет несколько отличительных особенностей, которые позволяют рассматривать его именно как глобальный архив данных ДЗЗ из Космоса, а не как совокупность изолированных архивов данных, которые принадлежат различным поставщикам – государственным или коммерческим организациям. В этом состоит принципиальное отличие мирового фонда спутниковых снимков и рынка данных ДЗЗ из Космоса от рынка данных аэрофотосъемки.

Во-первых, получение спутниковых снимков в настоящее время не имеет ограничений, связанных с секретностью. С 2014 г. все спутниковые данные, имеющиеся на рынке (с пространственным разрешением до 0,3 м) доступны для гражданских специалистов из большинства стран мира, за исключением государств или организаций, против которых введены санкции. Причем такие ограничения распространяются не на весь фонд снимков, а только на его часть (в случае России они введены некоторыми поставщиками данных из стран Европы и Северной Америки).

Вторым важнейшим свойством мирового фонда снимков является взаимное перекрытие архивов данных, которые принадлежат различным организациям. Это означает, что в мире присутствуют как минимум несколько поставщиков снимков, которые обладают близким пространственным разрешением и частотой получения (и, как следствие, имеют близкое целевое назначение). При этом такие данные доступны пользователю, находящемуся в любой точке мира. Так, снимки со спутников серии Landsat (оператор – Геологическая служба США USGS) и Sentinel-2 (оператор – Европейское космическое агентство ESA) имеют одну и ту же область применения и находятся в открытом доступе. Данные со спутников, ведущих съемку со сверхвы-

соким пространственным разрешениям, которые принадлежат компаниям из США, Франции, Индии, Китая и других стран, также могут быть приобретены пользователем, находящимся в любой точке мира. Съемка также может быть заказана для любой территории (за исключением зон военных действий). От подобного перекрытия архивов данных разных поставщиков выигрывает конечный пользователь – это приводит к повышению доступности снимков, частоты их получения и снижению цен (для коммерческих данных).

Третье важнейшее свойство мирового фонда снимков – это отлаженные процедуры поиска, заказа и приобретения данных через Интернет (как для открытых, так и для коммерческих данных). В настоящее время существуют десятки различных онлайн-сервисов для заказа и получения спутниковых снимков и тематических продуктов их обработки. Большинство из них имеют интуитивно понятный интерфейс и обеспечивают для пользователя возможность бесплатной загрузки или приобретения снимков на любой регион Земли вне зависимости от геолокации пользователя (опять же, за исключением специально установленных ограничений).

Глобальный фонд снимков непрерывно пополняется и обновляется, причем скорость его пополнения имеет признаки экспоненциального роста. Такой рост обусловлен разработкой и запуском группировок микро- и наноспутников (каждая из которых может включать десятки или сотни аппаратов), а также выходом на рынок новых государств и коммерческих компаний. Основные поставщики спутниковых данных конкурируют между собой на открытом глобальном рынке, а не только внутри своих государств. Это ведет к повышению доступности спутниковых данных для конечного пользователя, повышению частоты получения снимков, снижению цен на коммерческие данные и увеличению объема открытых (бесплатных) данных.

Спутниковые снимки Земли принадлежат организациям, разрабатывающим и эксплуатирующим спутники ДЗЗ и поставляющим данные на рынок (либо в открытый доступ). Такие государственные или коммерческие организации называются операторами или держателями фонда снимков. В России можно выделить два основных государственных оператора спутниковых данных: Научный центр оперативного мониторинга Земли Федерального космического агентства (НЦ ОМЗ Роскосмоса) и Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» (НИЦ «Планета»). НЦ ОМЗ Роскосмоса является государственным оператором и поставщиком данных российской орбитальной группировки ДЗЗ, тогда как НИЦ «Планета» формирует архивы данных российских и зарубежных спутников для решения гидрометеорологических задач, различные тематические продукты на их основе, и обеспечивает ими структурные подразделения Росгидромета. Особенности получения данных с российских спутников ДЗЗ более детально рассматриваются в Разделе 1.2.

Среди крупнейших зарубежных поставщиков данных ДЗЗ можно выделить ряд

государственных организаций, межгосударственных объединений и коммерческих компаний. К первой группе относятся Национальное аэрокосмическое агентство США (NASA), Национальное управление по океану и атмосфере США (NOAA) и Геологическая служба США (USGS). Каждой из перечисленных организаций принадлежит одна или несколько спутниковых группировок, которые детально рассмотрены ниже. Наиболее известным межгосударственным оператором является Европейское космическое агентство ESA – оператор спутников программы Copernicus. Среди коммерческих компаний-поставщиков данных ДЗЗ наиболее известны следующие: американские Maxar Technologies (бывшая Digital Globe) и Planet Labs, европейская Airbus Defence and Space, индийская NewSpace India Limited, китайские Beijing Space View Technology и Chang Guang Satellite Technology Corporation (см. подробнее Раздел 1.2).

1.2. История формирования и современное состояние мирового фонда снимков из Космоса

История формирования мирового фонда спутниковых снимков, которая берет начало с 1959–1960 гг., неразрывно связана с разработкой и внедрением различных технологий получения информации о поверхности Земли из Космоса. В начале космической эры спутниковые снимки Земли получали в основном в аналоговом режиме (фотографическая съемка). Также для наблюдения за состоянием атмосферы и океана с 1960-х гг. ведется съемка Земли в тепловом диапазоне спектра. Первые цифровые снимки Земли в оптическом диапазоне были получены с помощью технологии оптико-механического сканирования. Первым спутником, который поставлял цифровые снимки Земли, был Landsat-1 с сенсором Multi-Spectral Scanner (MSS), запущенный в 1972 г. Современная спутниковая съемка в оптическом и тепловом диапазонах ведется с помощью технологии оптико-электронного сканирования, впервые реализованной в 1986 г. на спутниках SPOT (Франция). Сущность данной технологии заключается в захвате энергии излучения оптической системой и регистрации его посредством электронных приемников излучения, чувствительных к различным спектральным диапазонам электромагнитного излучения (подробнее см. [Книжников и др., 2011; Балдина, Лабутина, 2021]). С конца 1970-х гг. развивается радиолокационная съемка – технология активного ДЗЗ, основанная на использовании SAR – радиолокаторов с синтезированной апертурой (подробнее см. [Балдина, Лабутина, 2021]). И наконец, в экспериментальном режиме с 1980-х гг. ведется съемка Земли в микроволновом диапазоне спектра (первый сенсор, работающий в этом диапазоне, был установлен на борту спутников NOAA). При этом основой современного глобального рынка данных ДЗЗ из Космоса остаются снимки оптического и радиолокационного диапазонов спектра.

1.2.1. Фотосъемка Земли из Космоса

Фотографическая (аналоговая) съемка Земли из Космоса изначально имела военное назначение. В СССР и США были созданы соответствующие государственные программы (в СССР – «Зенит», в США – «Согопа»), в рамках которых были разработаны и запущены на орбиту сотни космических аппаратов для видовой разведки. Так, в СССР программа «Зенит» была запущена в 1959 г. С 1964 г. до конца 1970-х гг. ежегодно на орбиту выводили 8–11 спутников «Зенит». В конце 1970-х гг. были разработаны усовершенствованные спутники видовой разведки в рамках программы «Янтарь». На них устанавливалась камера KBP-1000, которая обеспечивала пространственное разрешение снимков до 2 м и точность геопривязки до 10 м, что позволило впервые применять эти данные для картографирования в масштабе 1:10 000. В 1990-е гг. данные со спутников «Янтарь» прошли процедуру конверсии и получили название «Комета», часть их стала доступной для гражданских пользователей.

В США первый спутник в рамках программы «Согопа» был запущен на орбиту уже в августе 1960 г. Далее в рамках этой программы было разработано три поколения спутников. К середине 1960-х гг. пространственное разрешение снимков уже достигало 3–5 м (рис. 1.1), а к 1980-м гг. было доведено до 1,2 м. В 1995 г. данные спутников программы «Согопа» были рассекречены Министерством Обороны США, оцифрованы и опубликованы в USGS EROS Data Center. В настоящее время они доступны через Единый каталог USGS [USGS EarthExplorer, 2023]. Часть данных распространяется бесплатно, часть – на коммерческой основе (в пределах 30\$ за сцену). Данные первого поколения спутников доступны за период с 1964 г. и представляют собой старейший из имеющихся в открытом доступе источников спутниковых снимков Земли. Они активно используются научным сообществом для анализа изменений земной поверхности, в частности роста площади городов, таяния ледников, экзогенных рельефообразующих процессов и природных катастроф [Fekete, 2020]. Так, по снимкам Согопа удалось оценить некоторые характеристики катастрофического ледового обвала на вулкане Уаскаран в 1970 г. (рис. 1.2).

Фотосъемка Земли из Космоса для гражданских целей в СССР начала развиваться с 1975 г. Первые такие спутники были запущены в рамках программы «Фрам» в 1975 г. Всего с 1975 по 1985 г. было запущено 27 спутников этой серии. Спутники имели следующие характеристики: продолжительность работы на орбите 13 сут, пространственное разрешение снимков на черно-белой пленке 20–30 м, на спектральной пленке – 30–50 м, обзорность – 180 км, производительность – 17 млн. км². Снимки использовались для актуализации среднемасштабных карт.

Наибольшую известность получила серия советских спутников Ресурс-Ф, которые запускались на орбиту в период с 1979 по 1993 г. для целей среднемасштабного топографического и тематического картографирования. Всего в рамках этой серии

было запущено свыше 100 спутников, которые обеспечили многократное покрытие снимками всей территории бывшего СССР. Пространственное разрешение снимков Ресурс-Ф росло по мере совершенствования фотокамер. Так, на первых спутниках устанавливалась камера КАТЭ-200 с пространственным разрешением 20–30 м, более совершенные камеры КФА-1000 и КФА-3000 обеспечивали пространственное разрешение 6–8 м и 2–3 м соответственно (примеры снимков приведены на рис. 1.3). Также совершенствование спутников Ресурс-Ф шло в направлении увеличения продолжительности их работы на орбите. Роль данных со спутников Ресурс-Ф в научных исследованиях сложно переоценить. В частности, они стали одной из основ фундаментального Атласа снежно-ледовых ресурсов мира, опубликованного Институтом географии РАН в 1997 г.



Рис. 1.1. Снимок территории г. Перми, полученный со спутника миссии Soyuz 02.02.1966 г.

Таким образом, аналоговая съемка из Космоса внесла значительный вклад в изучение и картографирование природных ресурсов Земли. Однако ее фундаментальным недостатком была невозможность оперативного получения снимков, поскольку снимки доставлялись на Землю в спускаемом аппарате. Между получением снимка и его анализом могло проходить несколько месяцев. Кроме того, недостатком аналоговой технологии была дороговизна, обусловленная необходимостью большого числа запусков, поскольку срок работы одного КА на орбите не превышал две-три недели.

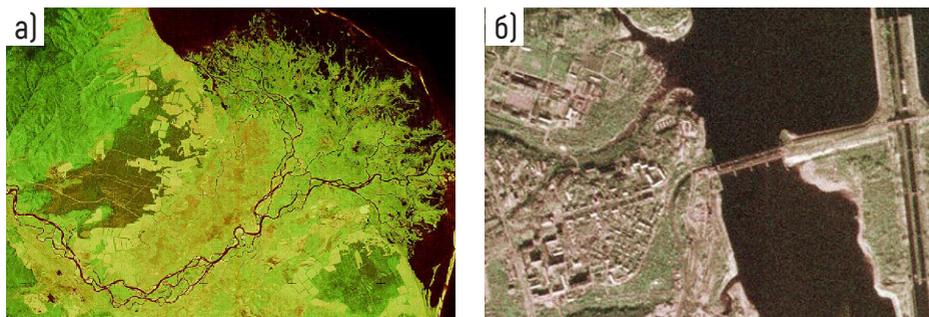


Рис. 1.2. Снимки территории, пострадавшей от катастрофического обвала на вулкане Уаскаран: а) – до события (снимок со спутника Corona), б) – после события (аэрофотоснимок) [Fekete, 2020]

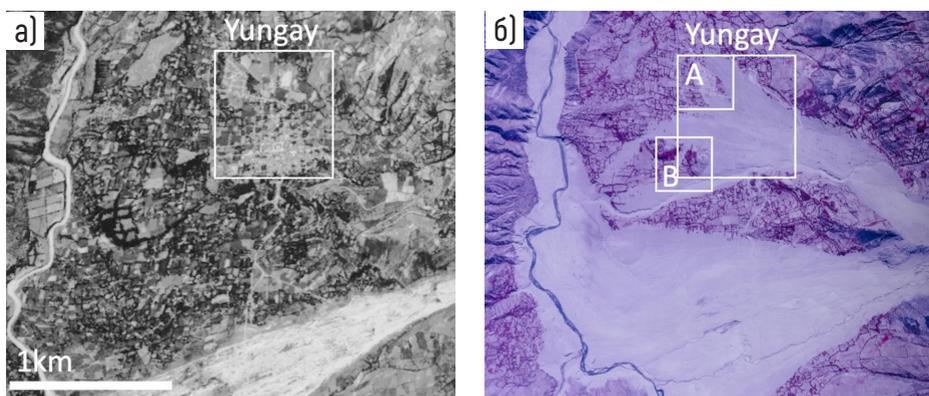


Рис. 1.3. Снимки со спутников серии Ресурс-Ф: а) – с камеры КАТЭ-200 (дельта р. Селенги), б) – с камеры КФА-1000 (Камская ГЭС)

Наряду со спутниковой фотосъемкой, вплоть до 1990-х гг. важную роль играла съемка с пилотируемых космических кораблей и орбитальных станций. Первые снимки Земли с пилотируемого космического корабля были получены еще Германом Титовым в 1961 г. С 1969 г. фотосъемка стала одной из частей программ полетов в Космос, когда на корабле «Союз» была установлена автоматическая фотокамера. В 1970-е и 1980-е гг. фотосъемка Земли велась с борта советских орбитальных станций «Салют» и «Мир» с помощью камер КАТЭ-140, МКФ-6 и МОМС. Пространственное разрешение снимков с камеры МОМС достигало 6,5 м. В США в рамках пилотируемых полетов также производилась фотосъемка Земли с космических кораблей многократного использования «Шаттл». Также в 2000 г. с борта одного из шаттлов была выполнена съемка Земли с помощью двух радиолокаторов для получения первой глобальной цифровой модели рельефа SRTM (см. подробнее Раздел 3).

С конца XX века по мере увеличения числа действующих на орбите спутников ДЗЗ роль пилотируемых полетов как источника данных ДЗЗ резко снизилась. Однако с борта Международной космической станции (МКС) такая съемка производится до настоящего времени (рис. 1.4). Полученные данные используются в программе «Космос и крупные катастрофы».



Рис. 1.4. Снимок вулкана Фудзияма, полученный с борта МКС

1.2.2. Спутники метеорологического и океанографического назначения

Спутники для мониторинга атмосферы и океана могут запускаться на низкие (полярные) и удаленные (геостационарные) орбиты. Первые группировки метеорологических спутников, созданные в СССР и США, были полярно-орбитальными, а программы съемки с геостационарной орбиты начали разрабатываться с середины 1970-х гг. Важно отметить, что данные со всех спутников метеорологического и океанографического назначения в настоящее время распространяются бесплатно.

Первый в мире экспериментальный метеорологический спутник TIROS-1 (Television InfraRed Observation Satellite) был разработан NASA, выведен на орбиту 1 апреля 1960 г. и проработал до 15 июня того же года. Целью его запуска была оценка возможности получения и использования изображений облачного покрова из Космоса. Снимки имели низкое пространственное разрешение (8 км). Всего в рамках программы TIROS было запущено 10 спутников в период с 1960 по 1965 г.

Несмотря на низкое пространственное разрешение и узкую полосу обзора (всего 1000 км), данные TIROS оказались исключительно полезными для понимания процессов развития облачного покрова Земли и дали много новой информации о тропических циклонах.

В СССР полярно-орбитальные метеорологические спутники начали разрабатываться с 1967 г. в рамках программы Метеор. Всего было создано и выведено на орбиту более 50 аппаратов. Спутники Метеор первого поколения по своим характеристикам были близки к американским TIROS. Они вели съемку на телевизионные камеры с узкой полосой обзора (1000 км) и пространственным разрешением 3–8 км. Спутники второго поколения уже были близки по характеристикам к американским метеоспутникам NOAA. Съемка была сканерной (цифровой), с пространственным разрешением 1–2 км в полосе обзора 2500 км в трех спектральных каналах – видимом, ближнем инфракрасном (далее – ИК) и тепловом. Спутники третьего поколения имели аналогичные характеристики и проработали на орбите до 2004 г. Новые спутники Метеор (имеющие название Метеор-М) выводятся на орбиту с 2009 г., более подробные сведения о них будут приведены ниже.

Важнейшим этапом в развитии спутникового мониторинга атмосферы и подстилающей поверхности стала разработка и запуск полярно-орбитальных спутников серии NOAA, которые действуют на орбите с 1978 г. по настоящее время. Всего в этой серии запущено 19 спутников (последний запуск состоялся в феврале 2009 г.). На борту спутников NOAA установлен радиометр AVHRR (The Advanced Very High Resolution Radiometer). Съемка ведется в пяти спектральных диапазонах: красном, ближнем ИК, среднем ИК (3,5 мкм) и двух тепловых (10–12 мкм), с пространственным разрешением 1100 м, в полосе обзора шириной 2700 км (примеры снимков на рис. 1.5).

Снимки со спутников NOAA всегда были общедоступными, что обусловило их широкое применение научным сообществом. Разработанный в рамках этой программы формат передачи данных HRPT (High Resolution Picture Transmission) стал стандартом для других группировок метеоспутников. Первые российские станции приема спутниковых снимков, разработанные компанией СКАНЭКС, также были рассчитаны на прием данных со спутников NOAA. Основной областью применения снимков NOAA является мониторинг облачного покрова и краткосрочный прогноз погоды. Однако в конце XX века (до запуска более современных спутников Terra и Aqua с радиометром MODIS) снимки NOAA использовались также для мониторинга природных пожаров и картографирования типов подстилающей поверхности. Так, по данным со спутников NOAA в 1991 г. была создана первая глобальная карта растительности и землепользования Global Land Cover 1991, в которой было выделено 14 классов поверхности.

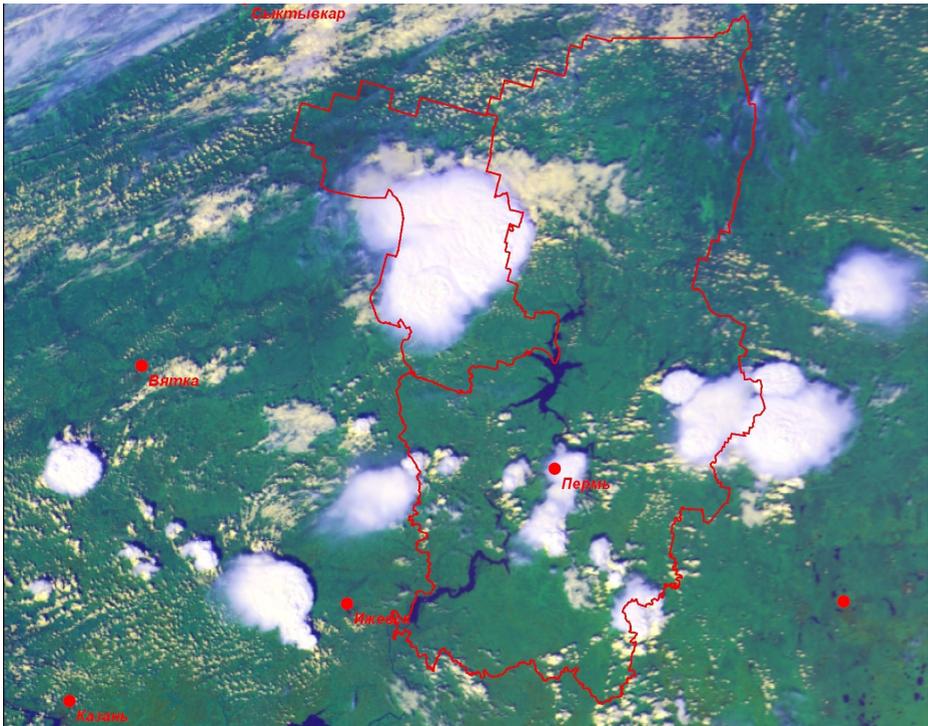


Рис. 1.5. Фрагмент снимка со спутника NOAA, полученного 04.07.2012 г. Облака вертикального развития (кучево-дождевые) имеют ярко-белый цвет, перистые облака – синий полупрозрачный, кучевые облака – желтый

Благодаря свободному доступу к данным NOAA, они успешно применяются исследовательскими центрами в России и за рубежом для генерации различных тематических продуктов. Так, научно-исследовательским центром (НИЦ) космической гидрометеорологии «Планета» разработаны алгоритмы определения по спутниковым данным NOAA ряда характеристик облачности: температуры и высоты верхней границы облаков (ВГО), типов облачности, водозапаса облаков и максимальной интенсивности осадков. Эти продукты публикуются на сайте НИЦ «Планета» [ФГБУ НИЦ «Планета», 2023], а также предоставляются в оперативном режиме региональным структурным подразделениям Росгидромета. В настоящее время архив снимков NOAA AVHRR за период с 1980-х гг. доступен на ресурсах Европейского космического агентства (см. Приложение 1).

Существенно позже (уже в XXI веке) группировки полярно-орбитальных метеоспутников, близких по характеристикам к NOAA, были созданы в Евросоюзе (ЕС) и Китае. Так, европейская группировка спутников получила название MetOp (Meteorological Operational satellite). В ее составе было запущено три спутника

(в 2005, 2012 и 2018 гг.). Помимо основного сенсора AVHRR-3, близкого по характеристикам к оригинальному AVHRR, на них также установлен ряд дополнительных приборов: инфракрасный зондировщик IASI, микроволновой зондировщик для определения влажности MHS, скаттерометр для определения скорости и направления ветра над поверхностью океана, прибор для мониторинга содержания озона GOME-2. Спутниковые зондировщики решают задачу построения профилей температуры и влажности в атмосфере, которые являются важнейшим источником данных для глобальных моделей численного прогноза погоды (ЧПП), тогда как скаттерометр обеспечивает определение скорости ветра вблизи морской поверхности и высоты волн.

В рамках китайской программы развития метеоспутников FengYun («Облака и Ветер») с 1988 г. разработано 4 поколения спутников. Так, спутники второго поколения ведут съемку в 10 спектральных каналах с пространственным разрешением 1000 м. Снимки со спутников третьего поколения имеют максимальное пространственное разрешение 250 м. Спутники 4-го поколения являются геостационарными. Всего в настоящее время на орбите действует 9 спутников программы FengYun, данные которых можно получить через специальный портал [FengYun... 2023].

Основную часть фонда спутниковых снимков метеорологического назначения составляют снимки с геостационарных спутников, которые ведут съемку с удаленных орбит, находящихся на расстоянии около 36 тыс. км от Земли. Главным преимуществом съемки с геостационарной орбиты является высокая частота получения снимков (вплоть до 60 раз в час), которую ограничивает только скорость передачи и обработки данных. Это критически важно для наблюдения быстроразвивающихся процессов в атмосфере (напр., глубокой конвекции). Также геостационарная съемка обеспечивает максимальную обзорность (4–5 спутников достаточно для глобального покрытия территории данными). В то же время геостационарная съемка имеет и недостатки. Пространственное разрешение снимков, как правило, ограничено величиной 500–1000 м (а в отдельных спектральных каналах и менее) по причине удаленности орбиты от Земли. Вторым недостатком геостационарной орбиты является недоступность съемки полярных областей.

В настоящее время в мире существует пять группировок геостационарных спутников: американская GOES, европейская Meteosat, японская Himawari (GMS/MTSat), китайская FengYun и российская Электро (GOMS). Наиболее совершенные геостационарные спутники созданы в Японии и США – в странах, для которых повышение точности прогноза особо опасных явлений погоды (тропических циклонов, сильных ливней, торнадо) имеет критическое значение.

Первый в мире геостационарный метеоспутник был выведен на орбиту в 1975 г. в США. За последующие годы в рамках американской программы GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) были разработаны 4 поколения спутников. На-

более современными являются спутники 4-го поколения GOES-R (первый из них выведен на орбиту в 2016 г., второй – в 2022 г.). Основными инструментами на борту этих спутников являются радиометр Advanced Baseline Imager (ABI), ведущий съемку в 16-ти спектральных каналах, в том числе в 10-ти каналах теплового диапазона, и первый в мире спутниковый грозопеленгатор GLM (Geostationary Lightning Mapper). Съемка с помощью радиометра ABI ведется с рекордно высокой частотой (до 60 раз в час) и с пространственным разрешением до 0,5 км, что позволяет получать высококачественные анимации развития облачности (рис. 1.6), тогда как грозопеленгатор GLM позволяет идентифицировать зоны с грозовой активностью внутри облачных систем.

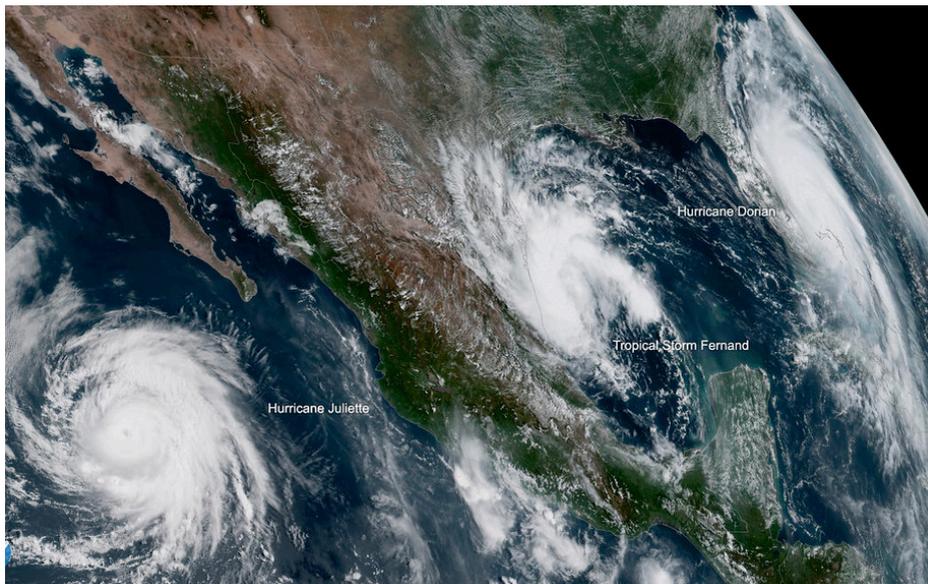


Рис. 1.6. Облачные системы тропических штормов на снимке с геостационарного спутника GOES-R в видимом диапазоне спектра

Также к числу наиболее современных геостационарных спутников относится японский Himawari-8, выведенный на орбиту в 2014 г. На его борту установлен 16-канальный радиометр видимого и ИК диапазона Advanced Himawari Imager (AHI), аналогом которого является сенсор ABI, установленный на спутниках GOES-R. Спутник Himawari-8 обеспечивает покрытие территории Азиатско-Тихоокеанского региона, а также восточной части России (к востоку от 90° в.д. и к югу от 60° с.ш.) высококачественными снимками с пространственным разрешением от 500 м и частотой съемки каждые 2,5 мин. Они успешно используются не только для наблюдения за процессами в атмосфере и океане, но и для мониторинга природных пожаров

в режиме реального времени на Дальнем Востоке России. Данные со спутника Himawari-8 доступны через официальный сайт спутникового метеорологического агентства Японии [Meteorological Satellite Center, 2023] или через FTP-каталог (где в том числе доступен архив за период с 2015 г.).

Европейские геостационарные спутники Meteosat работают с 1977 г. и обеспечивают покрытие данными территории Европы, Африки и Атлантического океана. До настоящего времени на орбиту было выведено 11 спутников. Первые семь спутников относились к первому поколению. Они вели съемку в видимой и тепловой зонах спектра с пространственным разрешением 2,5 км и 5 км соответственно, с частотой получения снимков каждые 30 мин. Следующие 4 спутника Meteosat относятся ко второму поколению (Meteosat Second Generation, MSG). Первый из них был выведен на орбиту в 2002 г. На спутниках MSG установлен радиометр SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager), который ведет съемку в 12 спектральных каналах (табл. 1.1) каждые 15 мин. Пространственное разрешение снимков составляет 1000 м в канале высокого разрешения (High Resolution Visible) и 3000 м в остальных спектральных каналах.

Таблица 1.1

Спектральные каналы радиометра SEVIRI, установленного на спутниках MSG

Название канала	Длина волны	Пространственное разрешение, м
VIS 0.6 (Видимый)	0,56 – 0,71	3000
VIS 0.8 (Ближний ИК)	0,74 – 0,88	3000
IR 1.6 (Средний ИК)	1,5 – 1,78	3000
IR 3.9 (Дальний ИК)	3,48 – 4,36	3000
WV 6.2 (Водяной пар)	5,35 – 7,15	3000
WV 7.3 (Тепловой)	6,85 – 7,85	3000
IR 8.7 (Тепловой)	8,3 – 9,1	3000
IR 9.7 (Тепловой)	9,38 – 9,94	3000
IR 10.8 (Тепловой)	9,8 – 11,8	3000
IR 12.0 (Тепловой)	11 – 13	3000
IR 13.4 (Тепловой)	12,4 – 14,4	3000
HRV (Видимый высокого разрешения)	0,5 – 0,9	1000

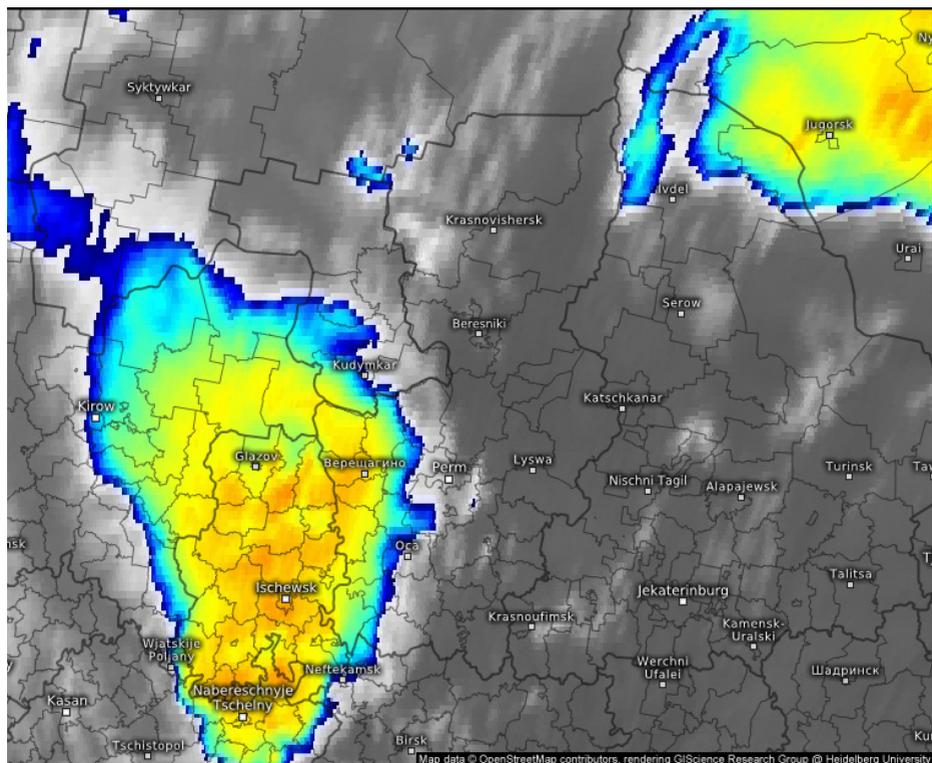
Данные со спутников серии Meteosat давно и успешно используются российскими специалистами в области мониторинга и прогноза опасных явлений погоды, поскольку они покрывают наиболее населенные районы страны (см. напр., [Chernokulsky et al., 2023]). Однако до 2017 г. качественные снимки можно было получить только для запада и юга Европейской территории России. Остальные районы были слишком сильно удалены от точки наблюдения, которая находится над пересечением экватора и Гринвичского меридиана. Однако в июне 2016 г. спутник Meteosat-8 был смещен на точку съемки с долготой 41,5° в.д. для обеспечения проекта Indian Ocean Data Coverage (IODC). В результате в зону покрытия качественной съемкой попала вся ЕТР, Урал и Западная Сибирь (кроме крайнего Севера).

Еще одним важным преимуществом данных Meteosat является доступность тематических продуктов, создаваемых на их основе. Архивы данных и тематических продуктов доступны через Eumetsat Data Center [Eumetsat..., 2023]. По спутниковым данным оцениваются температура и высота ВГО, влагозапас облаков. Наиболее простые тематические продукты, в частности температура ВГО, публикуются в режиме реального времени на специализированном ресурсе для синоптиков-прогнозистов (<https://kachelmannwetter.com/de/sat>). Они могут быть совмещены с данными сетей грозопеленгации, что позволяет отслеживать потенциально опасные облачные системы, способные вызвать шквалы, град, смерчи в районах, где отсутствуют данные метеорологических радиолокаторов (рис. 1.7). В России в НИЦ «Планета» также накоплен значительный опыт создания тематических продуктов по данным SEVIRI/Meteosat, которые применялись для прогноза опасных явлений погоды и метеорологического обеспечения авиации (см. напр., [Алексеева и др., 2006]). Эти продукты доступны для специалистов Росгидромета, в открытом доступе их нет.

Современная российская группировка метеорологических спутников представлена полярно-орбитальными спутниками Метеор-М, геостационарными спутниками Электро-Л и двумя спутниками Арктика-М на высокоэллиптической орбите.

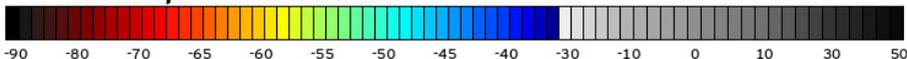
Первый из серии спутников Метеор-М был запущен в 2009 г. и проработал на орбите до 2014 г. В 2014 г. был выведен на орбиту спутник Метеор-М2, а в 2019 г. – Метеор М №2-1. Основным сенсором на борту двух работающих в настоящее время спутников является многозональное сканирующее устройство малого разрешения (МСУ-МР), целевым назначением которого является глобальный и региональный мониторинг облачности и температуры поверхности океана. Радиометр МСУ-МР по характеристикам близок к американскому радиометру AVHRR, но является несколько более совершенным. Он ведет съемку в шести спектральных каналах с пространственным разрешением 1000 м, в полосе 2800 км, а передача данных ведется в формате LRPT (аналог NOAA HRPT). Помимо данного радиометра, на борту обоих спутников установлены дополнительные приборы, в частности КМСС (комплекс многозональной спутниковой съемки с полосой обзора 450×900 км и про-

странственным разрешением 50×100 м) и модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы (МТВЗА) с полосой обзора 2000 км и разрешением 12–75 км. Данные последнего прибора используются для получения профилей температуры, влажности воздуха и параметров ветра над морской поверхностью.



Satellit Top Alarm (°C)

Do. 16.07.2020, 22:00 Uhr MESZ



© Kachelmann GmbH - Download nur für den privaten Gebrauch!
Bitte benutzen Sie zum Teilen die Share-Buttons oben rechts
Perm



Satellitendaten: EUMETSAT

Рис. 17. Изображение температуры верхней границы облаков при прохождении разрушительного конвективного шторма над Удмуртией, полученное по данным радиометра SEVIRI (дата съемки 16.07.2020)

Российские геостационарные спутники Электро (международное название Geostationary Operational Meteorological Satellite, GOMS) начали разрабатываться еще с 1980-е гг. в СССР. Первый спутник Электро проработал на орбите с 1994 по

1998 г. Он вел съемку в видимом и ИК диапазонах с пространственным разрешением в надире 1,25 км и 6,25 км соответственно. В 1990-е гг. работы были прекращены и возобновлены с 2001 г. в НПО им. Лавочкина. В результате в 2011 г. был выведен на орбиту спутник Электро-Л №1, который имел более конкурентоспособные характеристики (пространственное разрешение 1–4 км, частота съемки каждые 30 мин). Однако эти данные относительно мало использовались в связи со сложностью их получения.

В декабре 2015 г. был выведен на орбиту спутник Электро-Л №2 (GOMS-3), первые снимки с которого получены в 2016 г. В конце 2016 г. спутник переведен в режим эксплуатации. Наконец, в декабре 2019 г. был выведен на орбиту спутник «Электро-Л» №3, который стал вторым в составе геостационарной группировки «Электро». Первые снимки Земли в видимом и ИК диапазонах были переданы 07.02.2020 г. Спутник находится на геостационарной орбите в точке стояния 165,8° в.д. над Тихим океаном. На основе данных со спутников Электро-Л специалистами НИЦ «Планета» создается ряд тематических продуктов. Использование данных со спутников Электро-Л ограничивается отсутствием общедоступных веб-сервисов для их получения. Архив данных доступен на FTP-сервере НЦ ОМЗ Роскосмоса только в виде непривязанных изображений формата .jpg. В результате российские специалисты нередко предпочитают использовать данные зарубежных спутников (Meteosat или Himawari-8).

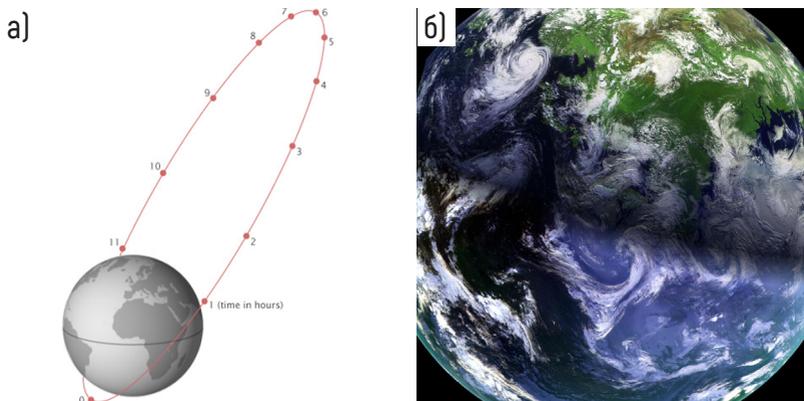


Рис. 1.8. Высокоэллиптическая орбита спутника Арктика-М (а) и пример снимка (б)

Основной проблемой глобального спутникового мониторинга облачности, особенно актуальной для территории России, является отсутствие регулярного покрытия снимками арктических территорий. Для решения этой проблемы в 2021 г. был спроектирован и выведен на орбиту новый спутник гидрометеорологического назначения Арктика-М №1, работающий на высокоэллиптической орбите (рис. 1.8). Для спутника Арктика-М №1 удаление от Земли в апоцентре (над северным полу-

шарием) достигает 39425 км, в перицентре (над южным полушарием) – 1036 км. Но для получения непрерывного потока данных требуется как минимум два спутника. Второй спутник Арктика-М выведен на орбиту в декабре 2023 г.

На борту спутника Арктика-М установлен основной сенсор МСУ-ГС (многозональное сканирующее устройство гидрометеорологического обеспечения) и несколько дополнительных приборов. Сенсор МСУ-ГС ведет съемку в 10 спектральных каналах, от видимого до теплового диапазонов. Данные с него используются для картографирования облачности, снегов и льдов, оценки содержания водяного пара в атмосфере, общего содержания озона, температуры поверхности и ряда других параметров. Как и в случае с данными Электро-Л, основным ограничением для более широкого применения снимков со спутника Арктика-М является отсутствие общедоступного интернет-каталога данных и тематических продуктов. Примеры изображений и тематических продуктов доступны на сайте НИЦ «Планета» [ФГБУ НИЦ «Планета», 2023].

Океанографические спутники

Помимо метеорологических спутников, с 1970-х гг. XX века создавали специализированные океанографические спутники. Как и метеоспутники NOAA, они также вели съемку с полярных орбит, в широкой полосе обзора и с относительно низким пространственным разрешением (около 1000 м). Однако основным объектом исследования с таких спутников были оптические свойства океанской воды, прежде всего концентрация фитопланктона. Поэтому съемка с океанографических спутников производилась в большем количестве спектральных каналов видимого и ближнего ИК диапазонов, тогда как для метеоспутников основным является тепловой диапазон спектра.

Впервые спутниковые карты концентрации фитопланктона в океане были созданы при помощи сканера CZCS (Coastal Zone Color Scanner), установленного на спутнике Nimbus-7. Съемка проводилась регулярно с 1978 по 1986 г., в видимой и ближней ИК зонах спектра с разрешением около 1 км. С 1997 по 2011 г. аналогичные задачи решал океанографический спутник SeaStar (прибор SeaWIFS), который вел съемку в 8 каналах видимого и ближнего ИК диапазонов спектра (пример карты на рис. 1.9). После запуска спутников Terra и Aqua в рамках программы Earth Observing System (EOS), часть океанографических задач решается по снимкам с этих спутников.

Множество океанографических задач решается также с помощью съемки в радиолокационном диапазоне спектра: определение аномалий уровня моря (спутниковая альтиметрия), скаттерометрия для оценки скорости и направления ветра у поверхности воды, оценка распространения и характеристик морских льдов, а также загрязнения воды нефтепродуктами. В 1978 г. на орбиту был выведен океанографический спутник SeaStar, который позволял решать все перечисленные задачи.

Он также был одним из первых спутников, на котором был установлен радиолокатор бокового обзора с синтезированной апертурой антенны (SAR). Аналогичные радиолокаторы сейчас используются на всех спутниках, работающих в радиодиапазоне. Архивные данные Seasat доступны в интерактивном каталоге спутникового центра Аляски [Alaska Satellite Facility, 2023].

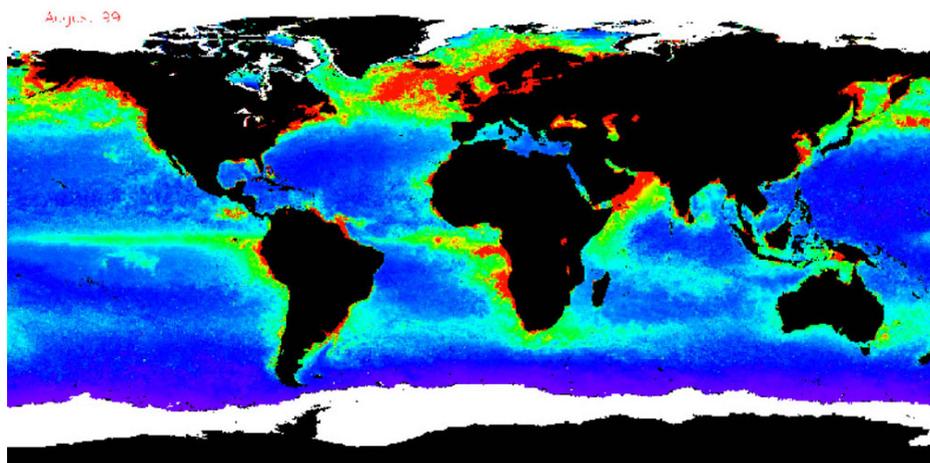


Рис. 1.9. Распределение хлорофилла в Мировом океане в августе 1999 г. по данным сканера цвета моря SeaWiFS [Межуниверситетский аэрокосмический центр МГУ, 2023]

1.2.3. Программы глобального спутникового мониторинга Земли (Landsat, EOS, Copernicus)

В настоящее время действует три основных программы глобального спутникового мониторинга, обеспечивающих бесплатное предоставление данных мировому научному сообществу: это программа Landsat (оператор – USGS), программа EOS (оператор – NASA) и программа Copernicus (оператор – ESA). При этом программа Landsat изначально была коммерческой, и только с 2009 г. данные были опубликованы в открытом доступе. Две другие программы изначально создавались как некоммерческие. Общей особенностью всех программ глобального мониторинга является их целеполагание: системы спутникового мониторинга создаются для исследования Земли как системы, мониторинга глобальных экологических проблем и предоставления открытых данных мировому научному сообществу. Кроме того, в рамках этих программ разрабатываются и внедряются алгоритмы предварительной обработки и тематического анализа данных и создания различных тематических продуктов (по сути – автоматического дешифрирования). Тематические продукты являются общедоступными, как и исходные снимки (см. Раздел 2 данного пособия).

Программа Landsat является самой продолжительной среди всех программ

спутникового мониторинга Земли, и действует уже более 50 лет. Всего было выведено на орбиту 9 спутников серии Landsat с четырьмя типами сенсоров: MSS (Multi-Spectral Scanner), TM (Thematic Mapper), ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) и OLI (Operational Land Imager). Все спутники Landsat вели съемку в одинаковой полосе обзора (185 км) и с одинаковой частотой (каждые 16 суток на экваторе). Пространственное разрешение снимков (кроме теплового и панхроматического каналов) остается неизменным (30 м) с момента разработки сенсора TM в 1982 г. Это обеспечивает возможность получения однородного ряда спутниковых наблюдений Земли за период продолжительностью около 40 лет.

Спутник Landsat-1 с сенсором MSS, выведенный на орбиту в 1972 г., стал первым источником данных ДЗЗ из Космоса в цифровом формате. Съемка велась в четырех спектральных каналах (синий, зеленый, красный и ближний ИК) с пространственным разрешением 80 м (табл. 1.2). Уже в середине 1970-х гг. на основе спутниковых данных Landsat-1 MSS был получен обширный опыт цифровой обработки изображений. Несмотря на низкое пространственное разрешение, по этим снимкам были впервые выполнены оценка состояния сельскохозяйственных угодий, обнаружение различных нарушений лесного покрова [Sayn-Wittgenstein and Wightman, 1975] и некоторых видов загрязнения природных вод [Alexander et al., 1973].

Сенсор TM впервые установлен на спутнике Landsat-4, выведенном на орбиту в 1982 г., а затем также на спутниках Landsat-5 и Landsat-6. Дольше всего на орбите проработал спутник Landsat-5 – 27 лет (с 1984 по 2011 г.), что является мировым рекордом до настоящего времени. Его данные стали основой глобальных проектов по мониторингу растительного покрова и землепользования (см. Раздел 2). В отличие от сенсора MSS, сенсор TM вел съемку в 7 спектральных зонах (были добавлены два канала среднего ИК диапазона, а также тепловой канал с пространственным разрешением 120 м). Добавление съемки в среднем ИК диапазоне позволило успешно выделять водные, снежно-ледовые поверхности и растительный покров (рис. 1.10).

На спутнике Landsat-7, выведенном на орбиту в 1999 г., был установлен новый сенсор ETM+. Он имел два основных отличия от сенсора TM: был добавлен панхроматический канал с пространственным разрешением 15 м, а детальность съемки в тепловом канале была увеличена до 60 м. Данные ETM+ считались эталоном качества спектральной калибровки, т.е. значения коэффициентов спектральной яркости после атмосферной коррекции были близки к наземным спектрометрическим измерениям. Однако сенсор проработал в штатном режиме всего три года. С 2003 г. после сбоя Scan Line Corrector (SLC-off), снимки имеют характерные артефакты в виде черных полос, расширяющихся от центра сцены (где их нет) к краям (рис. 1.11). Тем не менее, спутник работает на орбите до настоящего времени, а его данные (как и данные Landsat-5 TM) стали основой глобальных проектов по мониторингу растительного покрова и землепользования.

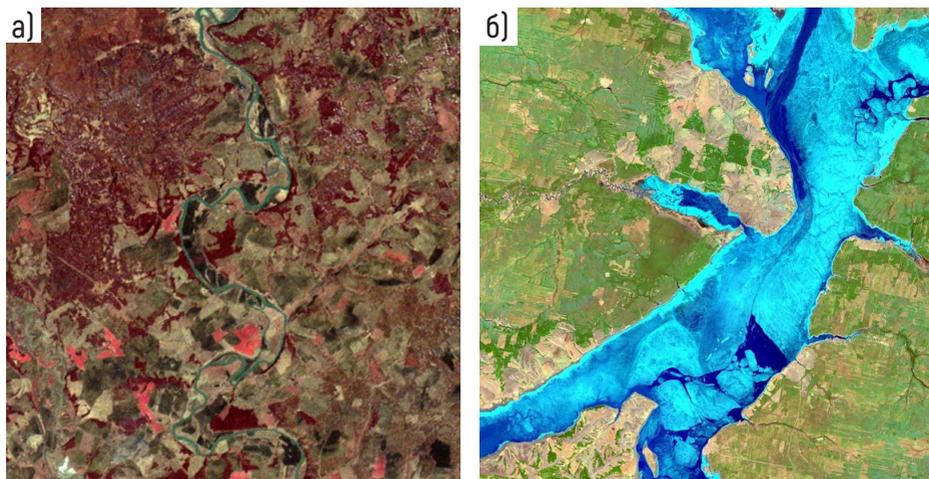


Рис. 1.10. Фрагменты снимков Landsat, сенсоры MSS (а) и ТМ (б)

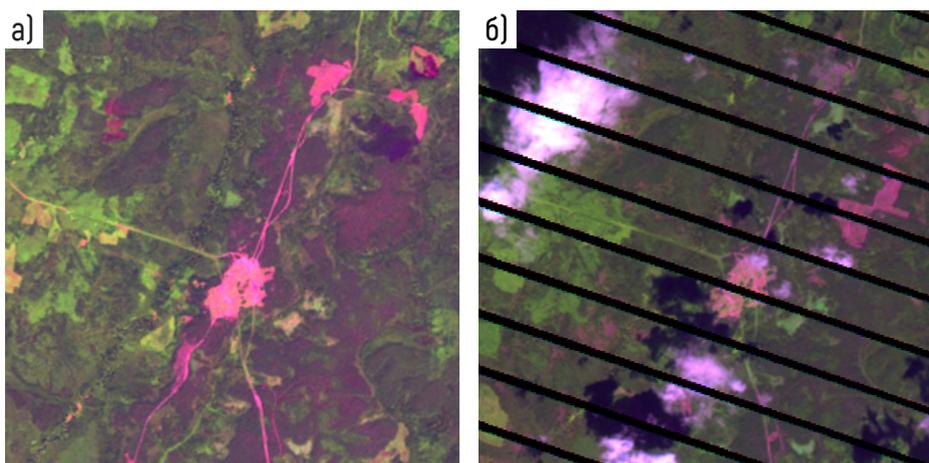


Рис. 1.11. Фрагмент снимка Landsat 7 ETM+ до сбоя Scan Line Corrector (а) и после него (б)

До 2008 г. данные со спутников Landsat распространялись на коммерческой основе. Однако с 2009 г. в связи с наличием дефекта SLC-off у снимков Landsat-7, все снимки были опубликованы в открытом доступе в интернет-каталоге USGS, а затем и в других каталогах. Это привело к многократному увеличению объемов загрузки снимков и началу их активного использования в научных проектах, в том числе способствовало созданию тематических продуктов на их основе (см. Раздел 2). В последние годы на основе данных Landsat было разработано множество таких про-

дуктов, а также были усовершенствованы алгоритмы предварительной обработки данных, что сделало программу Landsat важнейшим источником данных для глобального и регионального спутникового мониторинга.

Таблица 1.2

Спектральные каналы сенсоров Landsat (MSS, TM, ETM+ и OLI-TIRS)

Landsat MSS		Landsat TM		Landsat ETM+		Landsat OLI/TIRS	
Название	λ, мкм	Название	λ, мкм	Название	λ, мкм	Название	λ, мкм
Blue	0,5 – 0,6	Blue	0,45 – 0,52	Blue	0,45 – 0,515	Coastal/ Aerosol	0,433 – 0,453
Green	0,6 – 0,7	Green	0,52 – 0,605	Green	0,525 – 0,605	Blue	0,450 – 0,515
Red	0,7 – 0,7	Red	0,63 – 0,69	Red	0,63 – 0,69	Green	0,525 – 0,600
NIR	0,8 – 1,1	NIR	0,76 – 0,9	NIR	0,76 – 0,9	Red	0,630 – 0,680
		SWIR1	1,55 – 1,75	SWIR1	1,55 – 1,75	NIR	0,845 – 0,885
		SWIR2	2,08 – 2,35	TIR	10,4 – 12,5	SWIR1	1,560 – 1,660
		TIR	10,4 – 12,5	SWIR2	2,08 – 2,35	SWIR2	2,100 – 2,300
				PAN	0,52 – 0,9	PAN	0,500 – 0,680
						Cirrus	1,360 – 1,390
						TIRS1	10,60 – 11,19
						TIRS2	11,60 – 12,51

Примечания: Coastal/ Aerosol – фиолетовый, NIR – ближний ИК, SWIR1 – средний ИК 1, SWIR2 – средний ИК2, PAN – панхроматический, Cirrus – полоса поглощения перистых облаков, TIR – тепловой

В 2013 г. на орбиту был выведен новый спутник Landsat-8, на борту которого были установлены сенсоры Operational Land Imager (OLI) и Thermal Infrared Sensor (TIRS). Сенсор OLI ведет съемку в 9 спектральных зонах (разрешение 30 м) и в панхроматической зоне с детальностью 15 м. В сравнении с прибором ETM+, добавлены каналы Coastal/Aerosol и Cirrus/SWIR (см. табл. 1.2). Пространственное разрешение

тепловых каналов составляет 100 м. Но главное отличие от TM и ETM+ состоит в увеличении радиометрического разрешения до 16 бит, что значительно повышает информативность снимков, особенно в период со снежным покровом. Также после запуска спутника Landsat-8 оперативность предоставления данных возросла до 6–12 ч от момента съемки (до этого она составляла 1–2 недели). В сентябре 2021 г. на орбиту был выведен новейший спутник в серии – Landsat-9. На его борту установлены такие же сенсоры OLI и TIRS, как и на Landsat-8, но данные отличаются улучшенной радиометрической калибровкой и геометрической точностью.

В настоящее время данные Landsat в каталоге USGS доступны в разных уровнях обработки: Level1T (геометрически скорректированные данные в картографической проекции UTM), Level2 (данные, прошедшие атмосферную коррекцию) и Level3 (готовые тематические продукты). Также были созданы две коллекции данных Landsat. Под коллекцией понимается набор данных, которые прошли определенный цикл алгоритмов предварительной обработки. В настоящее время оперативные данные Landsat доступны в Коллекции 2 (усовершенствованные алгоритмы предварительной обработки для ее создания были разработаны в 2020 г.). Основными особенностями Landsat Collection 2 являются более высокая геометрическая точность, которая обеспечивается ортотрансформированием по более детальной ЦМР и более качественная радиометрическая калибровка для данных Landsat-5 и Landsat-8. Также в Коллекцию 2 входят данные улучшенного качества о коэффициентах отражения и температуре подстилающей поверхности (Science Product). Отметим, что тематические продукты Landsat Level3 (surface water extent, snow-covered area, burned area) пока доступны лишь для территории США.

Программа NASA Earth Observing System (EOS) стала первой программой глобального спутникового мониторинга Земли. Началом ее работы стал 1999 г., когда на орбиту был выведен спутник Terra, а в 2002 г. – аналогичный спутник Aqua. На борту каждого спутника находится несколько приборов, но основным является спектрорадиометр среднего разрешения MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Он ведет съемку в полосе обзора шириной 2300 км с пространственным разрешением 250 м (в красном и ближнем ИК каналах), 500 м (в 7 каналах видимого, ближнего и среднего ИК диапазонов) и 1000 м (в 36 каналах с длиной волны от 0,4 до 14 мкм). Частота съемки со спутников Terra и Aqua для каждой точки на поверхности Земли составляет не менее четырех раз в сутки (два раза днем и два раза ночью), а для приполярных районов – не менее 6 раз в сутки.

Радиометр MODIS является многофункциональной съемочной системой. На основе его данных оцениваются различные характеристики атмосферы, океана и подстилающей поверхности на глобальном уровне или для крупных регионов (пример снимка на рис. 1.12). Данные MODIS позволили частично заменить данные полярно-орбитальных метеоспутников NOAA и океанографических спутников. Наиболее

значимыми объектами мониторинга являются облачность, атмосферные аэрозоли, температура поверхности океана и суши, цветность океана, растительность суши, снежно-ледовые поверхности и тепловые аномалии. Для оценки их характеристик по данным MODIS в автоматическом режиме генерируются десятки тематических продуктов с различным пространственным и временным разрешением, которые публикуются в оперативном режиме и в открытом доступе, как и сами снимки (см. Раздел 2 и Приложение 2). Распространение данных и тематических продуктов MODIS производится через информационную систему NASA EOSDIS (Earth Observing System Data and Information System). Она включает несколько интерактивных каталогов, основными из которых являются LAADS DAAC [Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System, 2023] и LP DAAC [Land Processes Distributed Active Archive Center, 2023], разработанные соответственно NASA и USGS.

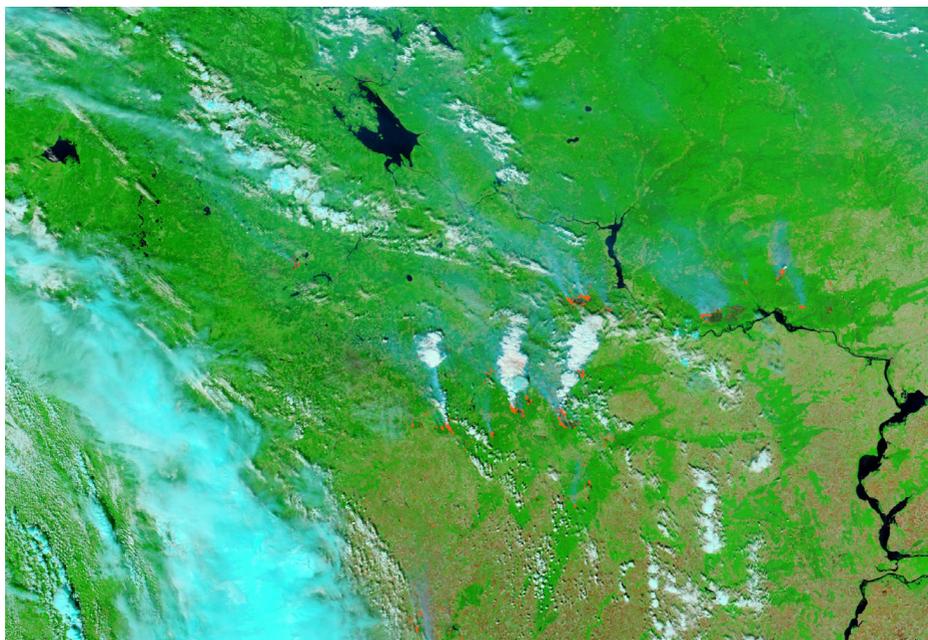


Рис. 1.12. Фрагмент снимка Aqua/MODIS на Европейскую территорию России с нанесенными тепловыми аномалиями (пожарами) за 29.07.2010 г. в комбинации каналов средний ИК – ближний ИК – красный

Помимо спектрорадиометра MODIS, на борту спутника Terra также установлен радиометр ASTER, который ведет съемку в трех каналах (ближний ИК, красный, зеленый) с пространственным разрешением 15 м, в шести каналах среднего ИК диапазона с пространственным разрешением 30 м и в пяти тепловых каналах с пространственным разрешением 90 м. Данные Terra ASTER стали первыми бесплат-

но распространяемыми снимками среднего и высокого разрешения. Также сенсор ASTER вел съемку в стереорежиме, что позволило создать на его основе глобальную цифровую модель рельефа ASTER GDEM (см. Раздел 3). Основными недостатком сенсора ASTER в сравнении с сенсорами спутников Landsat является малая обзорность (размер сцены 60×60 км) и, как следствие, – низкая производительность съемки.

На спутнике Aqua также установлено несколько дополнительных приборов, в основном предназначенных для изучения атмосферы: спутниковые зондировщики AIRS, AMSU-A и HSB, предназначенные для построения профилей температуры и влажности атмосферы и для оценки характеристик облачного покрова и парниковых газов в атмосфере; микроволновой сенсор AMSR-E, используемый для оценки запасов воды в снеге (в настоящее время не работает); прибор CERES для сканирования верхних слоев атмосферы, который позволяет определять свойства облаков, включая высоту, толщину и размеры частиц в облаке.

Спутники Terra и Aqua работают на орбите уже более 20 лет, в связи с чем длительное время актуален вопрос об их замене. В 2011 г. в рамках программы NASA NPOESS, которая была нацелена на создание группировки полярно-орбитальных метеорологических спутников нового поколения, был выведен на орбиту спутник Suomi NPP. На его борту находится несколько приборов, основным из которых является сенсор Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) – 22-канальный радиометр видимого и ИК диапазонов спектра (0.45–12 мкм). VIIRS в целом близок по характеристикам к MODIS, но ведет съемку в меньшем числе спектральных каналов (22 вместо 36), с пространственным разрешением 350 и 700 м в полосе обзора 3000 км, что обеспечивает съемку любой точки Земли не менее двух раз в сутки. На основе данных VIIRS также генерируются многочисленные тематические продукты, но основным направлением их применения является мониторинг природных пожаров (поскольку чувствительность сенсора VIIRS значительно выше, чем у MODIS). Данные VIIRS используются в российских и зарубежных системах спутникового мониторинга природных пожаров (FIRMS, Scanex Fire Monitoring System, ИСДМ-Послехоз), которые рассматриваются в Разделе 2. Помимо радиометра VIIRS, на спутнике NPP установлены дополнительные приборы: микроволновый радиометр ATMS для построения профилей влажности и температуры, интерферометр CrIS для построения профилей влажности и атмосферного давления, набор спектрометров OMPs для мониторинга состояния озонового слоя и радиометр для измерения тепловых потоков CERES.

В 2017 г. была запущена новая программа Joint Polar Satellite System (NASA JPSS) для перспективной замены спутников Terra и Aqua. Всего в рамках программы планируется запуск 4 спутников. Первый из них (NOAA-20) был выведен на орбиту в ноябре 2017 г. и находится в оперативной эксплуатации. На спутнике NOAA-20 уста-

новлены те же сенсоры, что и на SUOMI NPP. Таким образом, группировка NASA по глобальному ежедневному мониторингу Земли с полярно-орбитальных спутников насчитывает 4 аппарата: Terra, Aqua, Suomi NPP и NOAA-20.

Программа Copernicus

В 1998 г. для обеспечения всеобъемлющего мониторинга окружающей среды руководством ЕС было принято решение о развертывании программы GMES (Global Monitoring for Environment and Security) под эгидой Еврокомиссии в партнерстве с ESA и Европейским агентством по окружающей среде (EEA). Позднее программа была переименована в Copernicus. Ее целью является создание группировки спутников, обеспечивающих глобальный мониторинг с высоким пространственно-временным разрешением, независимость от других систем мониторинга, для оценки и снижения негативных последствий изменения климата и развития цивилизации в целом. Объем затрат на программу составил 4,3 млрд. евро за 2014–2020 гг. Программа включает 5 типов спутников (миссий), по два спутника в каждой миссии, оператором которых является ESA.

В рамках программы Copernicus создана система обработки и распространения данных, которая включает собственный интерактивный каталог [Copernicus Open Access Hub, 2023], через который могут быть загружены данные миссий Sentinel-1, 2 и 3. Кроме того, данные миссий Sentinel доступны и на внешних каталогах. Так, данные Sentinel-2 доступны через каталоги нового поколения, которые включают возможности не только выбора и загрузки, но и удаленной обработки снимков [EOS..., 2023; EO Browser, 2023], а Sentinel-3 – через каталог LAADS DAAC, созданный NASA для распространения данных низкого пространственного разрешения и тематических продуктов.

Первой миссией программы Copernicus являются спутники Sentinel-1A и Sentinel-1B, выведенные на орбиту в 2014 и 2016 гг. (спутник Sentinel-1B в настоящее время уже выведен из эксплуатации). Спутники стали первым источником бесплатных данных в радиолокационном диапазоне. На них установлены радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), более подробное описание данной съемочной системы дано в учебнике [Балдина, Лабутина, 2021].

Данные со спутников Sentinel-1 могут быть получены в различных режимах съемки, от чего зависит пространственное разрешение, обзорность и частота получения снимков (рис. 1.13). Так, режим IW является основным для съемки поверхности суши, режим StripMap используется для мониторинга чрезвычайных ситуаций (ЧС), т. к. обеспечивает самое высокое пространственное разрешение, а режим EW предназначен для наблюдения за полярными областями, морским льдом, загрязнением морской акватории и решения других задач. Пространственное разрешение для режимов StripMap, IW и EW составляет 5×5, 5×20 и 20×40 м соответственно, а ширина съемочной полосы – 80, 250 и 400 км.

Данные Sentinel-1 могут быть получены в различных поляризациях: согласованной горизонтальной (HH), вертикальной (VV) и перекрестной (HH+HV и VV+VH). Пример радиолокационного изображения в синтезе поляризаций приведен на рис. 1.14. Понятие «поляризация» и особенности цветосинтезированных изображений, получаемых на основе данных в различных поляризациях, рассматриваются в учебнике [Балдина, Лабутина, 2021]. На основе данных Sentinel-1 также генерируются продукты различного уровня обработки. Доступны «сырые» данные (RAW), продукты первого уровня обработки SLC (single look complex) и GRD (ground range detected), и продукты второго уровня обработки для оценки характеристик морской поверхности. Более детально эти продукты и особенности их применения также рассмотрены в учебнике [Балдина, Лабутина, 2021].

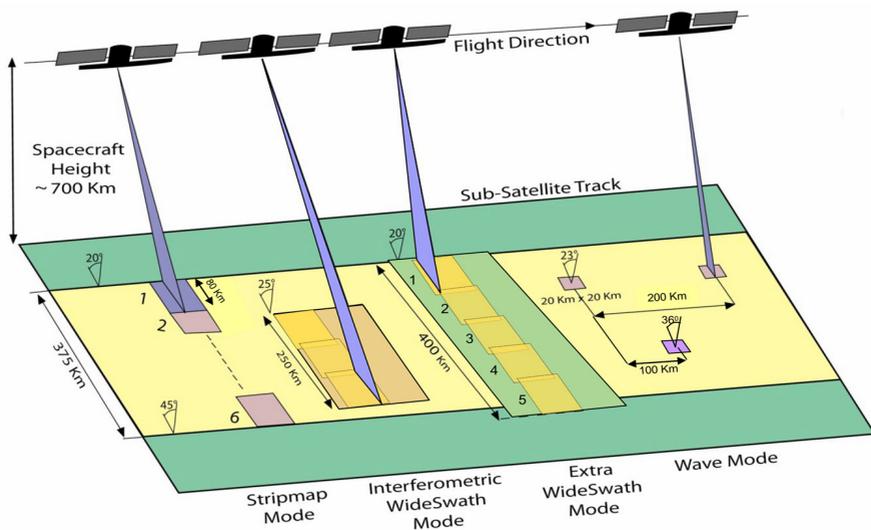


Рис. 1.13. Режимы работы радиолокатора Sentinel-1

Области применения данных Sentinel-1 разнообразны, но наибольшее практическое значение имеет мониторинг морских акваторий, в частности ледовой обстановки и разливов нефти (рис. 1.15). Для мониторинга поверхности суши данные Sentinel-1 также применяются достаточно широко. В частности, они используются для глобального картографирования растительности и землепользования в рамках проекта ESA WorldCover 2020 (см. подробнее Раздел 3), оценки состояния сельскохозяйственных угодий, мониторинга наводнений и решения ряда других задач, требующих независимости получения данных от условий облачности. Наконец, продукты уровня обработки SLC, содержащие информацию о фазе сигнала, широко применяются для решения различных задач методами радарной интерферометрии (построения цифровых моделей поверхности и выявления изменений высот

объектов).

Миссия Sentinel-2 является наиболее значимой для мониторинга поверхности суши в программе Copernicus. Она включает два спутника: Sentinel-2A и Sentinel-2B. На их борту находится радиометр MSI (Multi-Spectral Imager), который ведет съемку в 13-ти каналах видимого, ближнего и среднего ИК диапазонов спектра в полосе обзора 290 км, с пространственным разрешением 10–60 м (табл. 1.3, рис. 1.16). Частота получения снимков достигает 4 раз за 10 дней при условии отсутствия облачности. Это обеспечило значительное повышение оперативности спутникового мониторинга с 2018 г., когда оба спутника были введены в эксплуатацию. Помимо более высокого пространственного и временного разрешения, преимуществом данных Sentinel-2 является наличие спектральных каналов зоны «инфракрасного склона» или «красного крайнего» (Red Edge), что дает большой объем информации о состоянии растительности, в частности посевов сельхозкультур. В остальном спектральные диапазоны сенсора MSI близки к таковым у сенсора OLI.

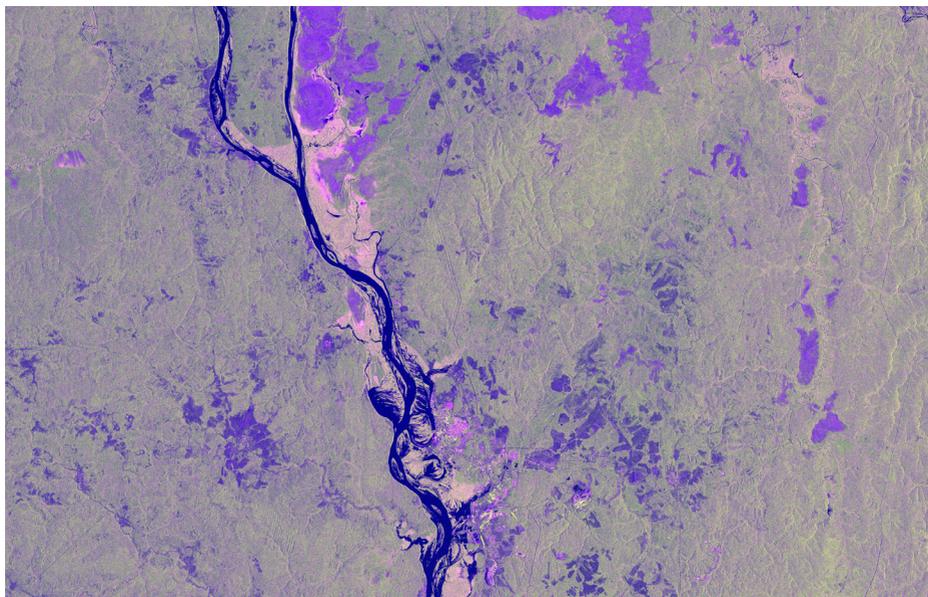


Рис. 1.14. Пример изображения на основе данных Sentinel-1 в синтезе поляризаций Red – HH; Green – HV; Blue – отношение HH/HV

Области применения данных Sentinel-2 в основном совпадают с таковыми для данных Landsat: мониторинг наземных экосистем, рек и внутренних водоемов, береговых зон, снежного покрова и ледников, лесного и сельского хозяйства, изменения растительности и землепользования на глобальном и региональном уровне. В настоящее время данные Sentinel-2 являются основой множества систем кос-

мического мониторинга регионального, национального и континентального уровней, а также отраслевых проектов для сельского и лесного хозяйства. По данным Sentinel-2 также созданы некоторые глобальные тематические продукты, но пока их значительно меньше, чем продуктов, созданных по данным Landsat.

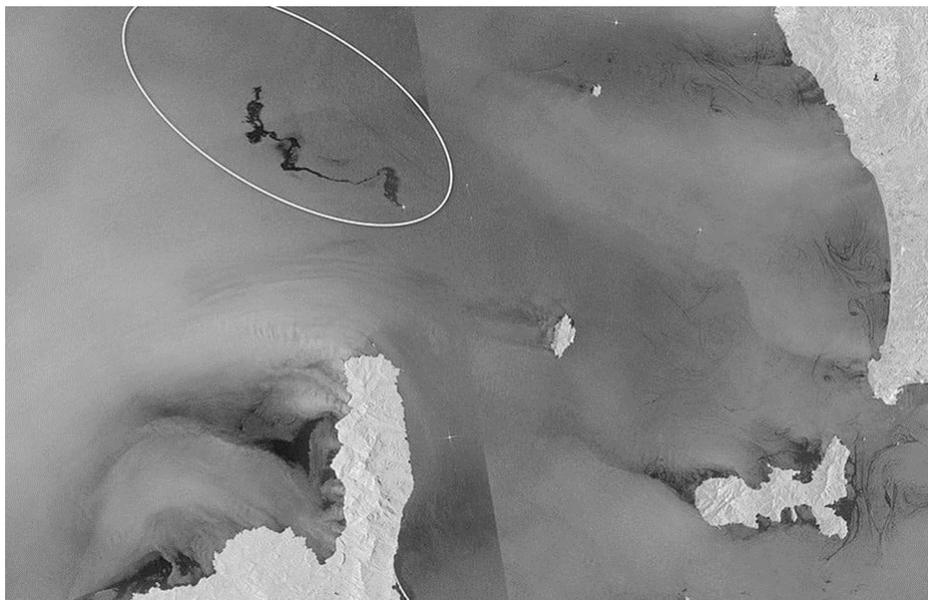


Рис. 1.15. Спутниковый снимок Sentinel-1, показывающий разлив нефти, произошедший в результате столкновения двух судов в Средиземном море к северу от острова Корсика 08.10.2021 [Картографирование..., 2022]

Данные Sentinel-2 могут быть получены через несколько каталогов: Copernicus Open Access Hub, EO Browser и EOS LandViewer. Поскольку полный размер сцены достигает 6–10 Гб, то производится ее нарезка на фрагменты (тайлы) размером 110×110 км и объемом до 0,7 Гб. Данные доступны в двух уровнях обработки: Level 1C и Level 2A. Данные Level 1C проходят процедуры геометрической и радиометрической коррекции, а Level 2A – также атмосферную коррекцию с помощью алгоритма Sen2Cor. При загрузке данных Level 2A пользователю доступны дополнительные продукты, полученные с помощью алгоритма Sen2Cor: результаты классификации поверхности (выделяются такие классы, как облака, облачность верхнего яруса, снег, вода, участки, лишенные растительности) и аэрозольная оптическая толщина атмосферы.

В настоящее время спутниковые данные Sentinel-2 особенно важны для систем дистанционного мониторинга сельскохозяйственных угодий, которые решают зада-

чи оперативной оценки состояния посевов и прогноза урожайности. Как правило, именно по данным Sentinel-2 производится регулярный расчет вегетационного индекса NDVI и оценка его динамики, на основе которой и определяется состояние посевов. Также они могут применяться для своевременного определения наступления неблагоприятных явлений (гибели посевов от засухи и т.п.) и оценки нанесенного ущерба. В России такие информационные системы впервые были созданы лидерами отрасли спутникового мониторинга – компаниями СКАНЭКС [КосмосАгро, 2023] и Совзонд [Геоаналитика.Агро, 2023]. Они представляют собой облачные геоинформационные веб-сервисы, предназначенные для поддержки принятия решений в области сельского хозяйства, предоставляющие доступ к массиву разнообразной и обновляемой информации о состоянии посевов, условиях произрастания и характере землепользования. Также данные Sentinel-2 стали информационной основой для крупнейшего европейского проекта в области мониторинга сельскохозяйственных угодий OneSoil [OneSoil, 2023]. В рамках него была создана интерактивная карта пахотных земель на территории всей Европы, которая включает данные о границах полей, сельскохозяйственных культурах (всего 27 культур) и севооборотах (все эти характеристики определены по снимкам Sentinel-2 методами машинного обучения), динамике NDVI, а также ряд инструментов для поддержки точного земледелия.

Таблица 1.3

Спектральные каналы съемочной системы Sentinel-2 MSI

Название	Длина волны середины диапазона (мкм)	Пространственное разрешение, м
Band 1 – Coastal aerosol	0,443	60
Band 2 – Blue	0,49	10
Band 3 – Green	0,56	10
Band 4 – Red	0,665	10
Band 5 – Vegetation Red Edge	0,705	20
Band 6 – Vegetation Red Edge	0,74	20
Band 7 – Vegetation Red Edge	0,783	20
Band 8 – NIR	0,842	10
Band 8A – Vegetation Red Edge	0,865	20
Band 9 – Water vapour	0,945	60
Band 10 – SWIR – Cirrus	1,375	60
Band 11 – SWIR	1,61	20
Band 12 – SWIR	2,19	20



Рис. 1.16. Фрагмент снимка со спутника Sentinel-2 в натуральных цветах (территория Большого Камского болота)

Миссия Sentinel-3 состоит из двух спутников (Sentinel-3A и Sentinel-3B), которые были выведены на орбиту в 2016 и 2018 гг. соответственно и продолжают более ранние проекты ESA для глобального мониторинга и картографирования растительности – миссии ERS2 и ENVISAT. Основной ее целью является наблюдение за топографией поверхности океана, температурой поверхности моря и суши, цветом океана и суши для поддержки систем прогнозирования состояния океана, а также для мониторинга окружающей среды и климата. На спутниках Sentinel-3 установлено несколько сенсоров. Температурный радиометр SLSTR с пространственным разрешением 1000 м предназначен для определения температуры поверхности суши и океана, а сенсор OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) разработан для обеспечения непрерывности измерений, сделанных ранее с помощью спектрометра среднего разрешения ENVISAT MERIS. Он ведет съемку в 21 канале достаточно узкого спектрального диапазона – от 400 до 1020 нм, поэтому может считаться гиперспектральным сенсором. Пространственное разрешение снимков OLCI составляет 300 м, а ширина полосы съемки – 1270 км. Данные Sentinel-3 доступны через каталог Copernicus Scientific Hub. На борту спутника установлены двухчастотный радиолокационный высотомер Synthetic Aperture Radar Altimeter (SRAL), обеспечивающий измерения уровня моря с пространственным разрешением 300 м, и микроволновой радиометр MWR.

Миссии Sentinel-4 и Sentinel-5 предназначены для обеспечения данными о составе атмосферы соответствующих сервисов Copernicus. В частности, спектрометр TROPOMI, установленный на спутнике Sentinel-5P, является одним из важнейших сенсоров для мониторинга концентрации парниковых газов и аэрозолей в атмосфере. Данный спектрометр измеряет отраженное от Земли или уходящее излучение в семи каналах ультрафиолетового и коротковолнового ИК диапазонов спектра (0,27–2,385 мкм), в полосе шириной 2600 нм, с пространственным разрешением $7 \times 3,5 \text{ км}^2$ для всех спектральных диапазонов, за исключением диапазонов UV1 ($7 \times 28 \text{ км}^2$) и SWIR ($7 \times 7 \text{ км}^2$). Основной областью его применения является глобальный мониторинг концентрации метана и атмосферных аэрозолей, влияющих на изменение климата.

Иные программы для мониторинга парниковых газов из Космоса

Большое внимание, которое уделяется на мировом уровне парниковому эффекту и современному глобальному потеплению климата, способствует разработке множества космических аппаратов и сенсоров для мониторинга парниковых газов в атмосфере. Как правило, такие сенсоры обеспечивают получение данных с грубым пространственным разрешением (1–20 км) без возможности выявления отдельных источников эмиссий. Некоторые из них также имеют ограничения по условиям облачности и времени суток.

В настоящее время находятся на орбите или разрабатываются 33 спутниковые миссии, обеспечивающие возможности мониторинга парниковых газов из космоса [GHG Monitoring, 2021]. Эти миссии имеют потенциал для использования при составлении и уточнении национальных кадастров выбросов парниковых газов. Основное внимание уделяется трем основным газам, перечисленным в Парижском соглашении: диоксиду углерода (CO_2), метану (CH_4) и закиси азота (N_2O). Большинство действующих на орбите спутников обеспечивают глобальный мониторинг CO_2 , CH_4 и N_2O в атмосфере, в том числе на разных высотах [GHG Monitoring, 2021]. Пространственное разрешение не позволяет оценивать на основе этих данных эмиссии, связанные с конкретными источниками. Однако в процессе разработки находятся спутники и сенсоры, с помощью которых будет возможно решать и эти задачи. Так, гиперспектральная миссия ScepterSat, разрабатываемая в США, должна обеспечить обнаружение точечных источников загрязнения атмосферы и получение региональных количественных оценок по парниковым газам. Планируется установить на данном спутнике несколько сенсоров, с помощью которых будет возможно впервые создать систему мониторинга качества атмосферного воздуха на основе спутниковых данных. Еще одна проектируемая миссия MethaneSAT обеспечит обнаружение точечных источников выбросов метана, а также повысит точность региональных оценок. Запуск этой миссии в эксплуатацию позволит существенно улучшить качество мониторинга источников метана и его распространения в тропосфере, в том

числе эмиссий, связанных с сельским хозяйством.

1.2.4. Важнейшие национальные программы спутникового мониторинга

Национальные программы спутникового мониторинга отличаются от рассмотренных выше программ глобального мониторинга тем, что они ориентированы в первую очередь на решение задач, актуальных для страны-оператора спутников, а данные для пользователей доступны на коммерческой основе. Первой такой программой была программа Landsat (до 2008 г., когда все данные стали открытыми). Наиболее успешные национальные программы спутникового мониторинга были созданы во Франции (SPOT), Индии (IRS), Китае (программа Гаофэнь), Южной Корее (Kompasat), Японии (ALOS). Спутниковые данные этих операторов стабильно пользовались высоким спросом на мировом рынке.

SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) – французская программа космической съемки Земли, которая развивается с 1980-х гг. Спутник SPOT-1 был выведен на орбиту в 1986 г. Установленный на нем сенсор HRV (High Resolution Visible) стал первым прибором, который производил съемку с помощью технологии оптико-электронного сканирования. В настоящее время данная технология стала общепринятой. Съемка велась в трех спектральных каналах (ближний ИК, красный, зеленый), с пространственным разрешением 20 м и в панхроматическом канале (10 м). Недостатком всех спутников серии SPOT, кроме современных SPOT-6/7, была низкая производительность съемки, обусловленная тем, что ширина съемочной полосы составляла всего 60 км. В результате повторная съемка одной и той же точки могла быть получена лишь каждые 26 сут без учета облачности. Данные первых пяти спутников SPOT имели радиометрическое разрешение 8 бит, что затрудняло их использование в период со снежным покровом.

Спутники SPOT-4 и SPOT-5 были запущены в 1997 и 2002 гг. соответственно, а проработали до 2013 и 2015 гг. В отличие от спутников SPOT-1 и SPOT-2, они вели съемку также в среднем ИК канале. На спутнике SPOT-4 помимо сенсора HRVIR (High Resolution Visible and Infrared), был установлен прибор SPOT-Vegetation для глобального мониторинга растительного покрова и его изменений. Он вел съемку в видимом, ближнем и среднем ИК спектральных диапазонах с пространственным разрешением 1100 м и использовался при создании глобальных карт растительного покрова в рамках проекта Global Land Cover 2000 (см. Раздел 2).

Спутник SPOT-5 имел на борту два сенсора: HRG (High Resolution Geometric) и HRS (High Resolution Stereoscopic). Съемка в панхроматическом режиме сенсором HRG велась с пространственным разрешением 5 м, однако в результате постобработки детальность могла быть повышена до 2,5 м. Мультиспектральная съемка имела пространственное разрешение 10 м, кроме среднего ИК канала (20 м). Также на данном спутнике была реализована возможность поворота камеры под углом до 30°, что позволяло проводить съемку в режиме заказа с периодом ожидания

до 3–4 сут. Геометрическая точность этих данных была достаточна для обновления карт масштаба 1:25000, и они получили широкое применение при картографировании сельскохозяйственных и лесных угодий. Данные стереосъемки с сенсора HRS использовались для создания глобальной ЦМР SPOT Reference 3D. Однако проект не был доведен до конца, поскольку из-за недостаточной производительности съемки данными удалось покрыть только 80 млн. км² площади суши (см. Раздел 3).

Современные спутники SPOT-6/7 были выведены на орбиту в 2012 и 2014 гг. (пример снимка на рис. 1.17). Они ведут съемку с высоким пространственным разрешением (панхром – 1,5 м и мультиспектр – 6,0 м) и имеют ряд отличий от спутника SPOT-5. Перечень спектральных каналов включает красный, зеленый, синий и ближний ИК, радиометрическое разрешение доведено до 16 бит, значительно повышена геометрическая точность (ошибка геопривязки обычно не превышает 10 м даже без опорных точек). Ежедневная площадь съемки превышает 3 млн км² с каждого спутника. Такое сочетание высокой детальности, обзорности и точности геопривязки делает данные SPOT-6/7 оптимальными для проведения инвентаризации сельхозугодий, определения границ лесных выделов при лесоустройстве и решения ряда других прикладных задач.

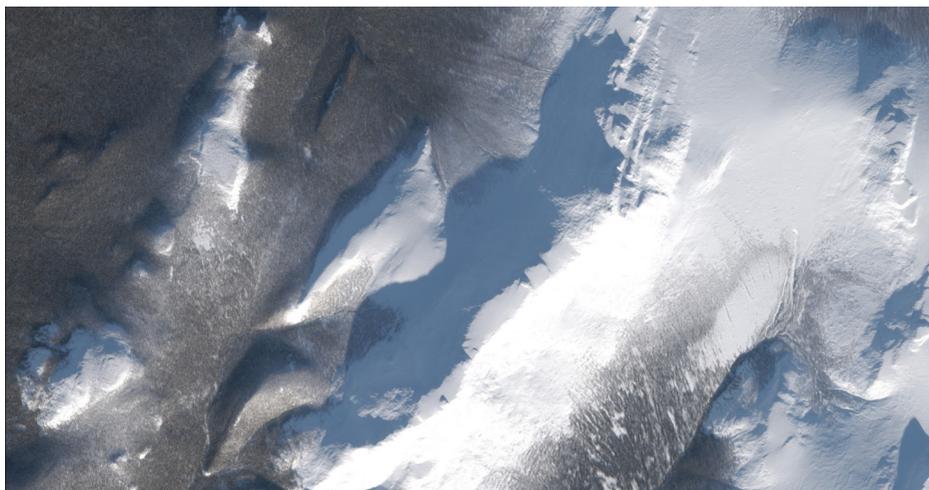


Рис. 1.17. Фрагмент снимка со спутника SPOT-6 (горы Северного Урала)

Оператором программы SPOT является компания Airbus (структурное подразделение Airbus Defence and Space), а дистрибьютором данных в России до 2022 г. была группа компаний (ГК) СКАНЭКС, благодаря которой эти данные получили широкое распространение и использовались во множестве крупных проектов, в том числе в качестве базовой подложки на картографическом сервисе «Яндекс.Карты».

Индийская программа спутникового мониторинга IRS (Indian Remote Sensing

Satellite System) также начала развиваться с 1986 г. В 1996 и 1997 гг. в рамках нее были выведены на орбиту спутники IRS-1C и IRS-1D, которые по некоторым характеристикам превосходили спутники SPOT-2/4. Установленная на спутнике IRS-1C камера PAN вела съемку с пространственным разрешением 5,8 м в полосе шириной 70 км, что делало эти данные наиболее качественными по сочетанию детальности и обзорности (рис. 1.18). В то же время они имели всего 64 уровня яркости. Камера IRS-LISS также превосходила зарубежные аналоги, в том числе сенсор TM (Landsat) по пространственному разрешению (23 м), и имела полосу обзора 140 км. Съемка велась в видимом, ближнем и среднем ИК диапазонах спектра. Дистрибьютором этих данных в России была ГК СКАНЭКС, поэтому они использовались в ряде крупных проектов (в частности, в Пермском крае) с середины 2000-х гг. Еще одним важным этапом развития индийской программы ДЗЗ стал запуск спутника IRS-P6 с сенсором AWIFS в 2003 г., что было первой попыткой создать систему мониторинга с широкой полосой обзора (740 км) и пространственным разрешением 56 м для регулярного еженедельного мониторинга сельхозугодий. На глобальном уровне эта задача была решена только после запуска спутников Sentinel-2.

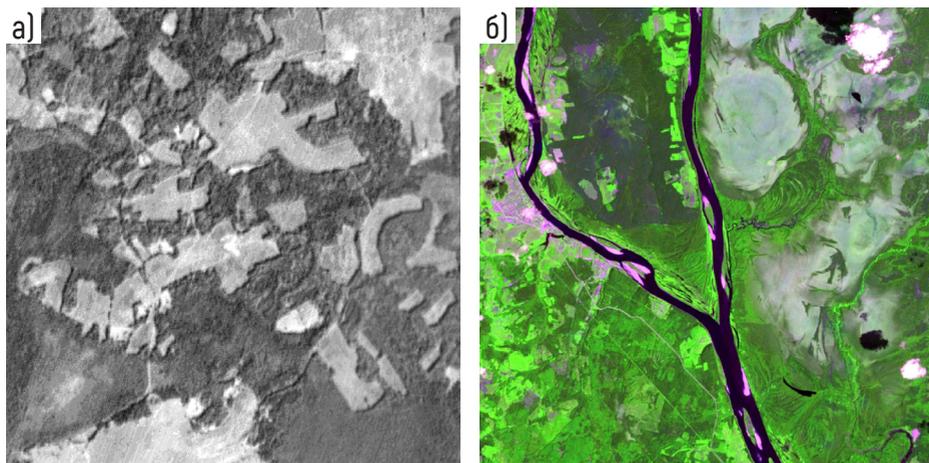


Рис. 1.18. Фрагменты снимков IRS-1C сенсоров PAN (а) и LISS (б)

Современная программа космического мониторинга в Индии включает решение задач картографирования и мониторинга, для чего созданы две спутниковые группировки – Cartosat и ResourceSat, которые по своим характеристикам не уступают лучшим мировым аналогам. Также создана группировка радарных спутников RISAT, которые позволяют получать данные с пространственным разрешением до 1 м. Разработчиком спутников является государственная компания ISRO (Indian Space Research Organization).

В ноябре 2019 г. на орбиту был выведен спутник Cartosat-3 – один из самых современных и дорогостоящих КА, действующих на орбите (пример снимка на рис. 1.19). Снимки Cartosat-3 распространяются компанией NewSpace India Limited на коммерческой основе. Спутник ведет съемку в панхроматическом, мульти- и гиперспектральном режимах и имеет двойное назначение (военная разведка и гражданское применение). Пространственное разрешение панхроматической и мультиспектральной съемки, которая ведется в полосе шириной 16 км, является самым высоким в мире (0,25 м и 1,14 м соответственно). Гиперспектральный сенсор позволяет получать снимки с детальностью 12 м в полосе обзора шириной 5 км. Также на спутнике установлен уникальный сенсор MWIR, который ведет съемку с разрешением 5,7 м в диапазоне длин волн 3–5 мкм для высокдетального мониторинга тепловых аномалий.

Группировка ResourceSat включает спутники, предназначенные для мониторинга стихийных бедствий, управления водными и земельными ресурсами. Установленные на них сенсоры LISS-IV также обеспечивают сочетание высокого пространственного разрешения (6 м) и обзорности (70 км) при съемке в мультиспектральном режиме. В 2025 г. планируется запуск новых спутников ResourceSat-3.

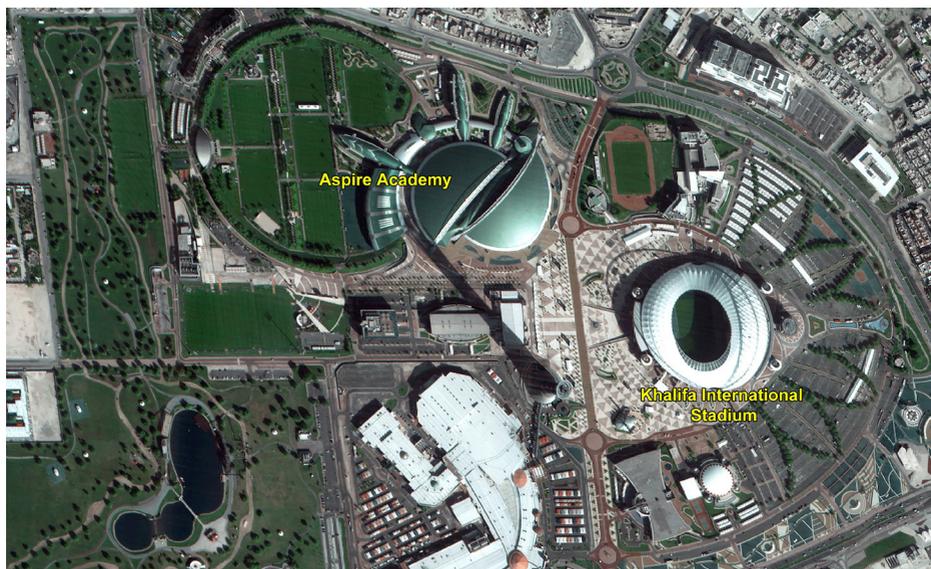


Рис. 1.19. Фрагмент снимка со спутника Cartosat-3

Японская программа ДЗЗ из Космоса имеет название ALOS (Advanced Land Observing Satellite) и развивается с 1996 г. Ее оператором является Японское аэрокосмическое агентство JAXA. В рамках данной программы было запущено сравни-

тельно небольшое число спутников, однако их данные имели уникальные характеристики на мировом рынке.

Первый японский спутник ДЗЗ спутник ADEOS был выведен на орбиту в 1996 г. На нем был установлен сенсор AVNIR (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer). Он вел съемку с пространственным разрешением 8 м и 16 м в панхроматическом и мультиспектральном режимах, в полосе обзора шириной 70 км. По качеству эти данные превосходили данные SPOT.

Наиболее известным спутником JAXA стал ALOS-2, который проработал на орбите всего пять лет – с 2006 по 2011 г. На его борту были установлены три съемочных системы: оптические сенсоры PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping) и AVNIR-2, а также радар PALSAR. ALOS/PRISM представлял собой уникальный сенсор для стереосъемки с пространственным разрешением 2,5 м. Он отличался не только высоким качеством данных, но и уникальной производительностью. За 5 лет работы было создано почти сплошное покрытие снимками всей поверхности суши Земли, на основе чего была создана глобальная ЦМР ALOS World Topographic Data (см. Раздел 3). Также данные ALOS/PRISM использовались в России для создания мозаичного покрытия снимками территорий субъектов РФ. Дистрибьютором данных в России была компания «Совзонд». Сенсор AVNIR-2 вел съемку в видимом и ближнем ИК каналах с пространственным разрешением 10 м, в полосе шириной 70 км.

Радиолокатор ALOS PALSAR на момент запуска не имел аналогов в мире, поскольку работал в L-диапазоне радиоволн (длина волны 28 см), тогда как все другие спутниковые SAR-системы работали в коротковолновых диапазонах X и C. Радиоволны L-диапазона способны частично проникать под полог леса, что обеспечивало существенные преимущества данных ALOS PALSAR при создании ЦМР лесопокрытых территорий.

Современная японская программа ДЗЗ включает спутники ALOS-3 и JERS (Japanese Earth Resource Satellite), которые принадлежат JAXA и министерству промышленности и торговли Японии (METI). Спутник ALOS-3 является усовершенствованной версией спутника ALOS-2 и имеет на борту сенсор PRISM-2 для стереосъемки с еще более высокой детальностью (0,8 м) и точностью геолокации (5 м), чем PRISM-1. Мультиспектральная съемка выполняется с детальностью 2,5 м (рис. 1.20). Спутники JERS имеют на борту гипер- и мультиспектральный сенсор HISUI (Hyperspectral Imager Suite) для мониторинга окружающей среды, сельского и лесного хозяйства. HISUI также обеспечивает сочетание высокого пространственного разрешения снимков (5 м) и обзорности (90 км). Гиперспектральная съемка ведется с пространственным разрешением 20 м, в полосе обзора 20 км в 185 узких спектральных зонах. Таким образом, японские данные ДЗЗ характеризуются сочетанием высокого пространственного разрешения, обзорности и точности геолокации.



Рис. 1.20. Фрагмент снимка со спутника ALOS-3

Также в 2012 г. был выведен на орбиту спутник GCOM-W1 (Сидзуку), на борту которого установлен микроволновой радиометр AMSR-2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer-2). Ранее аналогичный радиометр был установлен на спутнике Aqua в рамках программы EOS, но в 2015 г. он вышел из строя, и радиометр AMSR-2 оказался единственным подобным датчиком, действующим на орбите. Данный радиометр позволяет измерять важнейшие характеристики энергетического и гидрологического циклов Земли, включая характеристики водяного пара в атмосфере и степень влажности поверхности. На основе данных AMSR-2 генерируется 8 тематических продуктов в формате HDF: количество водяного пара в атмосфере, количество жидкой воды в облачном слое, температура поверхности моря, скорость ветра на поверхности моря, концентрация морского льда на поверхности океана, толщина снежного покрова, влажность почвы. Получение данных не зависит от времени суток и условий облачности. Пространственное разрешение данных на разных длинах волн составляет от 3×5 км до 35×62 км и является наиболее высоким из доступных для данных в микроволновом диапазоне спектра.

Китайская программа ДЗЗ из Космоса является наиболее быстро развивающейся в мире. Китай располагает интенсивно развивающейся группировкой спутников ДЗЗ многоцелевого назначения и является лидером по числу запусков спутников в последние годы (в 2021 г. Китай осуществил 55 запусков спутников). Множество спутников в Китае принадлежат не только государственным операто-

рам, но и коммерческим компаниям (подробнее см. Раздел 1.2.5). В 2016 году в Китае был принят закон о частной космонавтике, после чего за 5 лет было создано порядка 140 коммерческих компаний, который вывели на орбиту сотни космических систем ДЗЗ.

Первое поколение китайских спутников ДЗЗ включало спутники видовой разведки Yaogan (сверхвысокого разрешения), метеорологические спутники FengYun (в настоящее время действует 9 спутников), океанографические спутники Haiyang, спутники для мониторинга природных ресурсов Zi Yuan, спутники TH1/TH2, поставляющие снимки высокого пространственного разрешения (2 м), и радарные спутники Huan Jing.

В 2013–2017 гг. была реализована программа космического мониторинга Гаофэнь (Gaofen), в рамках которой были выведены на орбиту спутники ДЗЗ различного целевого назначения. Так, спутники Гаофэнь 1–3 и 6 ведут съемку в оптическом диапазоне с высоким пространственным разрешением (1–2 м), Гаофэнь-5 оснащен сенсором для гиперспектральной съемки, Гаофэнь-7 ведет съемку в стереорежиме. Уникальным является спутник Гаофэнь-4, который является геостационарным, но при этом ведет съемку с пространственным разрешением 50 м в оптическом диапазоне и 400 м в тепловом диапазоне, для области размером 400×400 км. Такой мониторинг с геостационарной орбиты с высокой частотой съемки может быть эффективным инструментом мониторинга пожаров. Часть спутников, разработанных в рамках программы Гаофэнь, имеет военное назначение, и информация об их характеристиках в открытых источниках недоступна. Всего в рамках данной программы выведено на орбиту 25 спутников.

Корейская программа ДЗЗ KOMPSAT (Korean Multi-Purpose Satellite) ориентирована на получение снимков высокого пространственного разрешения как для гражданского, так и для военного применения. Оператором спутников является Корейский институт аэрокосмических исследований (KARI). Первые два спутника KOMPSAT имели военное назначение, гражданское назначение имеют спутники KOMPSAT-3, KOMPSAT-3a и KOMPSAT-5. Спутники KOMPSAT-3, KOMPSAT-3a ведут съемку в оптическом диапазоне с пространственным разрешением 0,7 м и 0,5 м соответственно, а третий является радиолокационным и также позволяет получать данные с детальностью 1 м. Дистрибьютором этих данных в России является ГК СКАНЭКС, благодаря чему они получили достаточно широкое практическое применение.

Другие национальные программы космического мониторинга являются не такими комплексными, как вышеперечисленные, но ряд из них также имеет большое значение для развития отрасли ДЗЗ из Космоса. Так, многолетним лидером в области радиолокационного спутникового мониторинга была Канада, что обусловлено значительным интересом к развитию именно этого сегмента ДЗЗ по причине северного положения страны. Спутники Radarsat-1 (выведен на орбиту в 1995 г.)

и Radarsat-2 (выведен на орбиту в 2007 г.) долгое время успешно используются для мониторинга Арктической зоны (особенно морских льдов). Обширный успешный опыт применения его данных был накоплен и в России, когда дистрибьютором снимков была ГК СКАНЭКС. Также снимки Radarsat-2 на специальных условиях были доступны для проведения научных исследований. Пространственное разрешение их достигало 3 м.

В 2019 г. на замену спутнику Radarsat-2 была выведена на орбиту группировка RADARSAT Constellation Mission (RCM), состоящая из трех спутников. Их оператором является Канадское аэрокосмическое агентство. Спутники обеспечивают получение снимков с высокой частотой (вплоть до ежедневной) с различным пространственным разрешением – от 1×3 в режиме Spotlight (размер изображения 5×20 км), до 100 м в широкозахватном режиме (съемочная полоса шириной 500 км). Режимы съемки показаны на рис. 1.21. С 2023 г. данные находятся в открытом доступе в интерактивном каталоге Министерства природных ресурсов Канады [Natural Resources Canada, 2023]. Данная спутниковая группировка стала вторым (после Sentinel-1) источником бесплатных спутниковых данных в радиолокационном диапазоне, значительно превосходящим Sentinel-1 по производительности съемки, и является в настоящее время важнейшим инструментом мониторинга Арктического региона.

RCM Imaging Modes

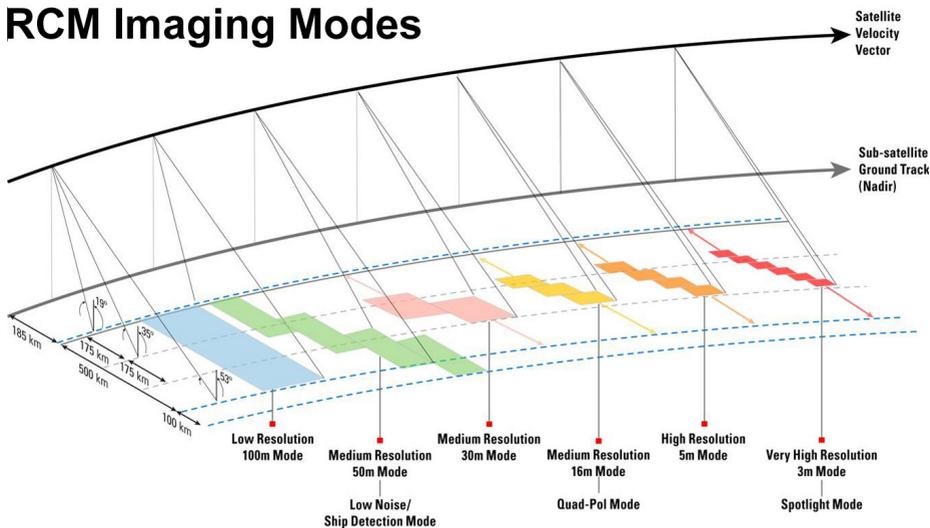


Рис. 1.21. Режимы радиолокационной съемки со спутников RCM [Natural Resources Canada, 2023]

Значительный вклад в развитие радиолокационного ДЗЗ из Космоса внесла также Германия. В 2007 г. немецким аэрокосмическим центром (DLR) и компанией EADS Astrium GmbH был выведен на орбиту спутник TerraSAR-X, который был

оснащен радаром с синтезированной апертурой, позволяющим выполнять радиолокационную съемку земной поверхности с пространственным разрешением до 1 м (это была первая подобная система в мире). В 2010 г. был выведен на орбиту второй аналогичный спутник TanDEM-X (пример снимка на рис. 1.22). Их совместное использование позволяло производить радарную интерферометрию (оценку высот поверхности и их изменений во времени по интерферометрической паре снимков) с сантиметровой точностью. Также на основе этих данных была создана высокоточная глобальная ЦМР WorldDEM (см. Раздел 3), причем для создания глобального покрытия данными потребовалось всего три года работы спутников. Дистрибьютором данных TerraSAR-X в России была компания Иннотер.



Рис. 1.22. Фрагмент радиолокационного изображения г. Москвы по данным спутника TanDEM-X

1.2.5. Основные коммерческие компании – поставщики данных ДЗЗ

В течение многих лет развитие крупных программ космического мониторинга в основном шло под управлением государственных операторов (национальных аэрокосмических агентств). Исключением были США, где первый коммерческий спутник для съемки со сверхвысоким пространственным разрешением был выведен на орбиту еще в 1999 г. В последние годы коммерческий сегмент ДЗЗ из Космоса активно развивается также в Китае.

Первый этап развития коммерческой спутниковой съемки со сверхвысоким пространственным разрешением связан с двумя компаниями из США – DigitalGlobe и GeoEye. Они конкурировали на рынке до 2013 г., и за это время вывели на орбиту несколько спутников, большинство из которых работает до настоящего времени. Компания «WorldView Imaging Corporation», предшественник DigitalGlobe, была ос-

нована в январе 1992 года в Калифорнии, незадолго до вступления в силу закона, который разрешил частным компаниям заниматься коммерческой деятельностью, связанной со спутниковой съемкой Земли. Первый спутник был выведен на орбиту в 1997 г. В 2013 г. компания GeoEye была поглощена компанией DigitalGlobe, а в 2017 г. DigitalGlobe получила новое название – Maxar Technologies, под которым известна и в настоящее время.

В 1999 г. компания Space Imaging (будущая GeoEye) вывела на орбиту спутник IKONOS, получение первых снимков с которого стало революцией в области ДЗЗ из Космоса. Пространственное разрешение снимков достигало 0,84 м в панхроматическом диапазоне и 4 м в спектральных каналах, что значительно выше, чем у всех ранее существовавших спутников. Спутник IKONOS работает на орбите и в настоящее время. Съемка ведется в полосе обзора шириной 11 км, под углом до 45° (что обеспечивает широкие возможности съемки по заказу). В результате цифровые спутниковые данные впервые обеспечили возможность крупномасштабного картографирования (1:10 000). Началась конкуренция аэрофотосъемки и космической съемки, которая продолжалась до начала массового использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в последнее десятилетие.

В последующие годы были выведены на орбиту спутники QuickBird (2001 г., DigitalGlobe), WorldView-1 (2007 г., DigitalGlobe), GeoEye-1 (2008 г., GeoEye) и WorldView-2 (2009 г., DigitalGlobe). Все они действуют на орбите до настоящего времени. Снимки с перечисленных спутников составили основу картографических подложек, опубликованных на сервисах Google Earth, Google Maps, Bing Maps, ESRI Imagery. Пространственное разрешение снимков в панхроматическом канале достигло 41 см (GeoEye-1) и 48 см (WorldView-2), в мультиспектральном режиме – от 1,6 до 2,0 м. Еще более важным достижением стало повышение геометрической точности снимков (для спутников WorldView-1,2 она достигает 3–8 м без использования опорных точек). Это позволило использовать снимки при крупномасштабном картографировании вплоть до масштаба 1:5000. Перечисленные спутники также отличаются достаточно высокой производительностью съемки, поскольку полоса обзора составляет 16 км. Особенностью спутника WorldView-1 является то, что он ведет съемку только в панхроматическом режиме. В свою очередь, спутник WorldView-2 ведет съемку в 8 спектральных каналах видимого и ближнего ИК диапазонов. Поставка данных возможна в полном и стандартном пакетах (8 и 4 каналов соответственно). Пример снимка WorldView-2 приведен на рис. 1.23.

До 2011 г. весь рынок спутниковых данных субметрового разрешения принадлежал компаниям DigitalGlobe и GeoEye. Затем близкие по характеристикам данные появились также у Франции, когда был выведен на орбиту спутник Pleiades-1A (через год запущен Pleiades-1B). Пространственное разрешение снимков с этих аппаратов достигало 0,7 м в панхроматическом режиме и 2 м – в мультиспектральном.

К середине второго десятилетия XXI века спутники для съемки с субметровым разрешением появились также у Индии, Китая, Южной Кореи, России. Однако точность геопривязки данных с этих спутников значительно ниже, чем у данных Digital Globe и GeoEye.



Рис. 1.23. Пример снимка последствий лесного пожара со спутника GeoEye-1 (Гайнский район Пермского края)

Все спутники, разработанные компаниями DigitalGlobe и GeoEye (начиная с WorldView-1), имеют двойное назначение, т.е. снимки используются как в гражданском сегменте, так и для целей видовой разведки (основным заказчиком данных является военное ведомство США). Но с 2014 г., когда в США были сняты ограничения на гражданское использование данных с детальностью выше 0,5 м, никаких различий между данными, используемыми гражданскими специалистами и военными, нет.

Последние два спутника, выведенные на орбиту компанией Digital Globe в 2014 и 2016 гг. (WorldView-3 и GeoEye-2 (он же WorldView-4)), являются одними из самых дорогостоящих КА, действующих на орбите. Пространственное разрешение панхроматических снимков достигает 31 см, а мультиспектральных – 1,24 – 1,28 м.

Спутник WorldView-3, помимо основных сенсоров PAN и VNIR (который ведет съемку в восьми каналах видимого и ближнего ИК диапазонов), имеет на борту также два дополнительных сенсора. Сенсор SWIR ведет съемку в 8 полосах коротковолнового ИК диапазона (от 1195 до 2365 нм), с пространственным разрешением 3,7–4,1 м, для детального мониторинга тепловых аномалий (пример изображения на рис. 1.24) и для геологической разведки. Сенсор CAVIS (Cloud, Aerosol, Water Vapor, Ice, Snow) ведет съемку в 12 узких спектральных зонах с разрешением 30 м. Также данные WorldView-3 имеют самую высокую в мире геометрическую точность – величина радиальной ошибки (Circular Error, CE) в 90% случаев не превышает 6,5 м даже без использования опорных точек. На спутнике WorldView-2, в отличие от WorldView-3, установлен только один сенсор – GeoEye Imaging System-2, ведущий съемку в панхроматическом и мультиспектральном режимах.



Рис. 1.24. Пример изображения лесного пожара с сенсора SWIR на спутнике WorldView-3

Следующим этапом развития спутниковой группировки компании Maxar Technologies является запуск созвездия спутников WorldView Legion, которые будут обеспечивать ежедневную съемку с пространственным разрешением до 29 см. Основным ее назначением будет военная разведка и мониторинг ЧС на суше и на море.

Коммерческие группировки миниспутников

Согласно современной классификации, малыми спутниками ДЗЗ считаются космические аппараты весом менее 500 кг, микроспутники имеют вес менее 100 кг, а наноспутники – 10 кг и менее. Малые спутники начали активно разрабаты-

ваться с первого десятилетия XXI века. Они имеют сразу несколько преимуществ: относительно низкая себестоимость, возможность запуска кластерным способом (несколько спутников одновременно), короткие сроки создания (1–3 года), возможность ориентации на конкретного потребителя и создания мониторинговых систем на основе группировок малых спутников, обеспечивающих высокую повторяемость съемки. Первые малые спутники разрабатывались в Европе. Так, в Великобритании компанией SSTL была создана группировка DMC (Disaster Monitoring Constellation), которая включала пять малых спутников для оперативного мониторинга районов стихийных бедствий со средним пространственным разрешением. В продолжение этого проекта были созданы спутники DMC-3 (TripleSat), которые ведут съемку с пространственным разрешением 1 м. С 2015 г. группировка из трех спутников TripleSat принадлежит китайской компании 21AT (Twenty First Century Aerospace Technology Company) и работает до настоящего времени (данные пользуются спросом и в России).

Наиболее успешной программой оперативного мониторинга на основе миниспутников является группировка RapidEye. Пять спутников RapidEye были разработаны в Германии и выведены на орбиту в 2008 г. Они ведут съемку с пространственным разрешением 6,5 м и с производительностью (5 млн. км² в сутки) в пяти спектральных диапазонах: синем, зеленом, красном, ближнем ИК и красном крайнем, что делает их важнейшим инструментом для мониторинга сельского и лесного хозяйства. Основным их назначением является создание подсистемы дистанционного мониторинга для технологий точного земледелия (пример снимков на рис. 1.25). В настоящее время спутники принадлежат американской компании Planet Labs.

Микро- и наноспутники. Компания Planet Labs

Наиболее известными группировками микро- и наноспутников являются американские группировки SkySat и Planet Labs и китайская группировка «Цзилнь». Группировка SkySat начала разрабатываться с 2010 г. компанией Skybox Imaging. Первый спутник был выведен на орбиту в 2013 г., и в настоящее время группировка включает 18 идентичных спутников весом по 120 кг. Спутники Skysat ведут съемку в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра с пространственным разрешением 0,9 м (панхром) и 2,0 м (спектральные каналы). Но главной их особенностью является впервые реализованная возможность видеосъемки из Космоса с пространственным разрешением 1,1 м. Видеоряд может иметь продолжительность до 80 с, съемка ведется в полосе шириной 880 м. Эта технология открывает новые перспективы использования спутниковых данных для оперативного мониторинга зон стихийных бедствий, координации спасательных работ, перемещения колонн техники в зонах военных конфликтов.

Группировка спутников PlanetScope (Dove) была создана в 2017–2018 гг., и в последующие годы обновлялась. Это первая в мире крупная группировка наноспут-

ников, созданных с применением «индустриальной» электроники, не предназначенной для работы в Космосе (что обеспечило многократное снижение себестоимости). Спутники были разработаны компанией Planet Labs в 2016 г. Они ведут съемку в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра с пространственным разрешением 3–5 м.

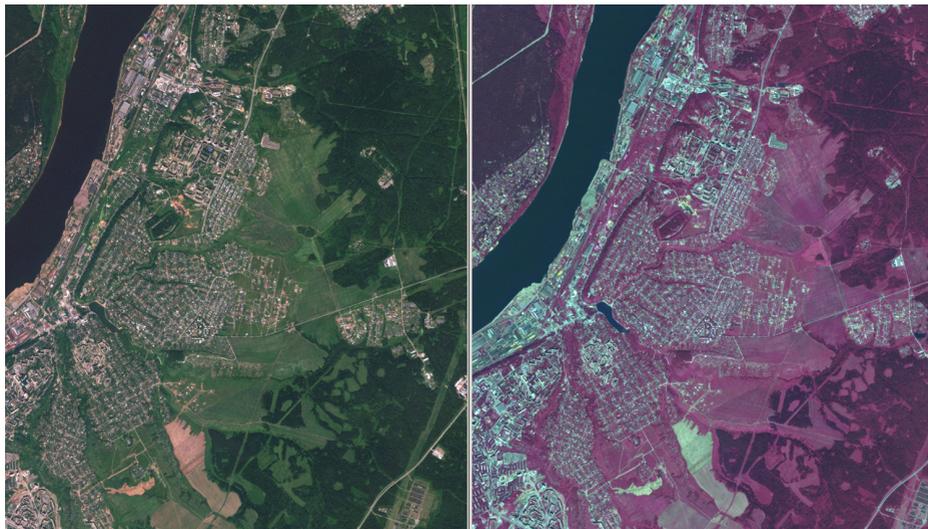


Рис.1.25. Фрагмент снимка RapidEye на территорию г. Перми в натуральных цветах и в красных цветах

В 2017 г. было выполнено несколько запусков спутников PlanetScope, в результате которых на орбите была развернута группировка из более чем 100 идентичных аппаратов. Она обеспечивает ежедневную, а часто и двукратную за день съемку любой точки на поверхности Земли, причем съемка ведется в надири, т.е. вертикально. Для обработки снимков и предоставления их пользователям создана уникальная информационная система, которая обеспечивает автоматическое по-пиксельное совмещение изображений и генерацию безоблачных мозаик снимков каждые три месяца. Получение данных возможно через интерактивный каталог [Planet Explorer, 2023]. Снимки со спутников PlanetScope имеют и некоторые недостатки, качество данных (особенно в естественных цветах) значительно ниже, чем у снимков Sentinel-2 (пример изображения на рис. 1.26). Тем не менее, они широко применяются при решении любых задач, требующих оперативного получения высокодетальных спутниковых снимков на любую точку мира.



Рис. 1.26. Фрагмент снимка PlanetScope в спектральном синтезе «красные цвета»

Компания Planet стала наиболее успешной среди всех компаний, которые планировали реализовать проекты ежедневной высокодетаальной спутниковой съемки Земли. В настоящее время она владеет тремя группировками спутников (PlanetScope, SkySat и RapidEye) и является мировым лидером как по количеству действующих на орбите спутников, так и в сегменте оперативного спутникового мониторинга в целом.

Китайские коммерческие спутники ДЗЗ

Наиболее известными коммерческими компаниями – операторами спутников ДЗЗ в Китае являются Beijing Space View Technology (разработчик серии спутников SuperView) и Chang Guang Satellite Technology Corporation (разработчик спутниковой группировки «Цзилинь»). Группировка спутников SuperView (GaoJing-1) в настоящее время находится в стадии развертывания (всего планируется запустить более 20 КА с разными характеристиками, в том числе для радиолокационной и гиперспектральной съемки). Запуск первой пары аппаратов SuperView-1A/1B выполнен 28.12.2016 г., а в январе 2018 г. выведены на орбиту ещё два спутника – SuperView-1C и 1D. Они обеспечивают съемку со сверхвысоким пространственным разрешением (0,5 м в панхроме и 2,0 м в спектральных каналах), но существенно уступают американским аналогам (Maxar Technologies) по точности геопривязки. Дистрибьютором данных в России является ГК СКАНЭКС. Учитывая высокую производительность этих

спутников, а также введенные ограничения на поставку данных из США и стран Европы, в настоящее время SuperView-1 являются важнейшим для России источником получения спутниковых снимков с детальностью 0,5 м (пример снимка на рис. 1.27).

Группировка коммерческих спутников Цзилинь-1 (Jilin-1), созданная компанией Chang Guang Satellite Technology Corporation, является второй крупнейшей в мире после группировки PlanetScope. По состоянию на июнь 2023 г., она включает более 130 спутников ДЗЗ различного функционального назначения. Так, спутники «Jilin-1 Smart Video Satellites» обеспечивают видеосъемку из Космоса для мониторинга зон стихийных бедствий и военных конфликтов (это вторая подобная группировка после Skysat). Спутники «Spectrum-01» и «Spectrum-02» ведут мультиспектральную съемку в 26 спектральных каналах (от видимого до теплового диапазонов) с пространственным разрешением 5 м. Спутники «Jilin-1 Gaofen» предназначены для высокодетальной съемки (0,75–1 м в панхроматическом диапазоне), причем в настоящее время на орбите действует уже несколько десятков этих КА. Запуски в рамках проекта Цзилинь-1 продолжаются, планируется доведение общей численности группировки до 300 спутников.



Рис. 1.27. Фрагмент снимка со спутника SuperView-1

Таким образом, коммерческие спутники в настоящее время являются основным источником пополнения мирового фонда снимков данными сверхвысокого пространственного разрешения, а также определяют тренды в развитии отрасли ДЗЗ: миниатюризацию спутников, создание спутниковых группировок (созвездий) и информационных систем для обработки данных.

Мини- и микроспутники для радиолокационной съемки

В области радиолокационной съемки тренд на миниатюризацию спутников и создание спутниковых группировок стал хорошо выражен в последние 5–7 лет. Первой на этом новом рынке была финская компания ICEYE, которая разработала одноименную спутниковую группировку. Спутник ICEYE-X1, выведенный на орбиту в начале 2018 г., был первым спутником весом менее 100 кг, оснащенным радаром с синтезированной апертурой, и первым финским коммерческим спутником. К 2021 г. группировка увеличилась до 10 спутников, а всего планируется вывести на орбиту 20 аппаратов, которые позволяют получать данные с пространственным разрешением от 0,25 м в режиме Spotlight (для участков размером 5×5 км), до 3 м в режиме Stripmap (полоса шириной 30 км). Высокая детальность и независимость от освещенности и погодных условий делают спутниковые данные ICEYE идеальным инструментом для военной разведки, что было показано в ходе военных конфликтов последних лет.

Аналогичный, но еще более амбициозный проект разрабатывается американской компанией Capella Space, которая предполагает вывести на орбиту 36 спутников, обеспечивающих съемку с пространственным разрешением 0,5 м в режиме Spotlight. К настоящему времени на орбиту выведено уже 11 таких спутников. Совместно со спутниками ICEYE они обеспечивают формирование уникальной системы мониторинга (прежде всего военного назначения) для непрерывного наблюдения районов особого внимания с предоставлением результатов наблюдения потребителям практически в реальном масштабе времени [Занин и др., 2022].

Также крупная группировка радарных миниспутников разрабатывается китайской коммерческой компанией Spacety. Компания была основана в 2016 г. и в настоящее время эксплуатирует 21 спутник для оптической и радиолокационной съемки. Первый спутник с радиолокатором С-диапазона (HiSea-1) был выведен на орбиту 22.12.2020 г. Спутник является первым в мире малым коммерческим радиолокационным спутником С-диапазона. При массе 185 кг он обеспечивает получение данных с пространственным разрешением до 1 м и максимальной шириной обзора до 100 км. Второй спутник Chaohu-1 был выведен на орбиту 27.02.2022 г. Основными областями их применения также является военная разведка, мониторинг инфраструктуры и опасных природных явлений. Данные группировки Spacety доступны для приобретения в России, их дистрибьютором является компания «Ракурс» [Ракурс..., 2023]. В разработанном ей программном комплексе PHOTOMOD Radar реализована поддержка данных спутников HiSea-1 и Chaohu-1.

1.2.6. Основные мировые тенденции развития отрасли ДЗЗ из Космоса

Развитие отрасли ДЗЗ из Космоса в мире характеризуется следующими основными тенденциями:

- быстрое увеличение числа спутников. В настоящее время на орбите действует более 1000 спутников ДЗЗ, принадлежащих десяткам стран, в том числе и тех, которые нельзя отнести к числу космических держав. Группировки численностью более 100 спутников созданы компаниями Planet Labs и Chang Guang Satellite Technology Corporation;

- благодаря увеличению числа спутников и в меньшей степени – их обзорности, быстро растет частота получения снимков. В 2017 г. компанией Planet была решена задача ежедневной съемки Земли с высоким пространственным разрешением, что резко повысило оперативность спутникового мониторинга. Это относится и к открытым спутниковым данным (в рамках программ Landsat и Copernicus);

- за счет одновременного повышения детальности снимков, обзорности съемочных систем, числа действующих на орбите спутников и накопления архивов данных за предшествующие годы происходит экспоненциальный (взрывной) рост объема данных ДЗЗ из Космоса. В результате возникает проблема хранения и обработки данных;

- проблема хранения данных решается с применением облачных технологий, удаленной обработки данных без их загрузки пользователем. В этом плане важное значение имел запуск сервиса для удаленной обработки данных Google Earth Engine [Gorelick et al., 2017];

- стремительно развиваются возможности автоматизации обработки спутниковых данных, которые уже можно отнести к категории Big Data (большие данные). Для их обработки и анализа активно разрабатываются модели машинного обучения и информационные системы, основанные на использовании этих моделей. Благодаря увеличению вычислительных возможностей, созданы многочисленные тематические продукты по снимкам не только низкого, но и среднего пространственного разрешения, причем они распространяются бесплатно, что сильно упрощает работу с данными для конечного пользователя (см. подробнее Раздел 2 данного пособия).

Мировой рынок данных ДЗЗ из Космоса

Благодаря выводу на орбиту сотен спутников ДЗЗ и широкому применению данных ДЗЗ из Космоса, в различных отраслях экономики сформировался мировой рынок данных ДЗЗ из Космоса, который интенсивно развивается, несмотря на растущую конкуренцию с рынком беспилотной авиации (БПЛА). Рынок включает два сегмента – поставку данных и геоинформационные сервисы. Основная часть объема коммерческих поставок данных приходится на перечисленные выше компании, которые поставляют снимки высокого (1–10 м) и сверхвысокого (детальнее 1 м) пространственного разрешения государственным и коммерческим заказчикам. Среди государственных заказчиков традиционно высока доля военных ведомств, особенно для снимков сверхвысокого разрешения и радиолокационных данных [Стратегия закупки..., 2021]. Однако такие данные активно используются и гражданскими заказ-

чиками, в связи с чем их принято считать продукцией двойного назначения. Сегмент геоинформационных сервисов обеспечивает, прежде всего, интересы гражданских заказчиков в части анализа спутниковых данных и их представления в максимально удобном виде для решения практических задач, включая создание различных готовых тематических продуктов. Суммарный объем мирового рынка данных ДЗЗ к 2025 г. по разным оценкам составит до \$15 млрд. Благодаря развитию технологий обработки больших данных (Big Data) и искусственного интеллекта, а также снижению стоимости данных (причины которого описаны выше), ожидается опережающий рост сегмента геоинформационных сервисов в сравнении с сегментом поставок данных.

В связи с экспоненциальным увеличением объема меняется и сам подход к данным. Современный пользователь, как правило, заинтересован уже не в самих данных, а в возможности работать с ними в своих ГИС и приложениях. В связи с этим к работе со спутниковыми данными может быть также применена новая парадигма «данные как сервис» (Data as a Service, DaaS), которая была предложена применительно к другим типам Big Data. DaaS – это модель дистрибуции данных или стратегия управления ими, когда пользователи не занимаются самостоятельно процессами сбора, хранения, интеграции, обработки и анализа данных, а передают эти задачи специализированным облачным провайдерам. В результате данные предоставляются пользователю по требованию (on-demand), независимо от географического или организационного разделения между поставщиком и потребителем информации (см. [Вичугова, 2023]). Примерами успешного внедрения парадигмы DaaS в области обработки данных ДЗЗ из Космоса является сервис Google Earth Engine, каталог снимков нового поколения EOS LandViewer (EOS), включающий базовый функционал цифрового анализа снимков в удаленном режиме, сервисы для получения данных с микроспутников Planet Labs и аналогичные проекты, а также многочисленные тематические продукты, созданные по спутниковым данным за последние годы (см. Раздел 2).

1.2.7. Российская группировка спутников ДЗЗ из Космоса

Современная российская группировка спутников ДЗЗ, оператором которой является НЦ ОМЗ Роскосмоса, начала создаваться лишь в 2006 г. До конца 1990-х гг. на орбите действовали спутники советской разработки (спутники для фотосъемки из Космоса, а также метеорологические КА). Кризис 1990-х гг. в отрасли, а также ориентация на развитие аналоговой съемки в СССР привели к существенному отставанию российской спутниковой группировки от зарубежных лидеров отрасли. В настоящее время спутниковая группировка НЦ ОМЗ Роскосмоса включает спутники различного целевого назначения: гидрометеорологические, природно-ресурсные (с сенсорами оптического диапазона), а с 2023 г. – спутник для радиолокационной

съемки Кондор-ФКА. Прием, хранение, обработка и распространение данных с российских спутников осуществляются в рамках Единой территориально-распределенной системы дистанционного зондирования Земли (ЕТРИС ДЗЗ).

Первый современный российский спутник ДЗЗ Ресурс-ДК1 был выведен на орбиту в 2006 г. и проработал до 2016 г. (в три раза дольше расчетного срока). Разработчиком этого спутника был ракетно-космический центр (РКЦ) «Прогресс». На борту был установлен сенсор Геотон, который вел съемку в панхроматическом диапазоне и в 4-х спектральных каналах (видимых и ближнем ИК), с пространственным разрешением 2,8 м и 5 м соответственно. По состоянию на 2006 г. спутники, ведущие съемку с таким пространственным разрешением, имелись в наличии только у США, Франции, Японии и Израиля. Однако спутник Ресурс-ДК имел и существенные недостатки: ширина полосы обзора составляла всего 28 км (в два раза меньше, чем у французского SPOT-5), что обуславливало меньшую повторяемость съемки. Также длительное время не была налажена система предварительной обработки данных, что приводило к расхождению данных в разных спектральных каналах в пространстве (до 100 м).

Следующим этапом в развитии российской спутниковой группировки стало создание трех спутников Ресурс-П, выведенных на орбиту в 2013, 2014 и 2016 гг. Их разработчиком также был РКЦ «Прогресс», а в создании съемочного оборудования принимали участие зарубежные специалисты, в частности из компании SSTL. На спутниках было установлено несколько сенсоров, в том числе оптико-электронный сенсор ГЕОТОН-Л1, известный также как СППИ Сангур. Этот сенсор был разработан для съемки с высоким пространственным разрешением – 0,7 м в панхроматическом режиме и 2 м в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра, в широкой полосе обзора (38 км). Пример снимка показан на рис. 1.28. По состоянию на 2013 г. сенсор ГЕОТОН-Л1 не имел аналогов в мире по производительности съемки среди сенсоров субметрового разрешения. Также на спутниках была установлена аппаратура для съемки со средним пространственным разрешением в полосе обзора шириной 120 км, и гиперспектральная съемочная аппаратура ГСА. В период с 2014 по 2021 г. спутники Ресурс-П составляли основу группировки НЦ ОМЗ Роскосмоса, работающей в интересах МЧС РФ, Министерства обороны и других пользователей. Однако к 2022 г. вышли из строя все три спутника, а запуск спутника Ресурс-П 4 планируется только на 2024 г. В настоящее время группировка спутников Ресурс-П не действует.

В настоящее время основными природно-ресурсными спутниками НЦ ОМЗ Роскосмоса является группировка малых КА «Канопус-В». Она включает 6 идентичных аппаратов, разработанных ОАО «Корпорация ВНИИЭМ». Первый спутник был запущен в 2012 г., в 2017–2018 гг. было запущено еще 5 спутников. На спутниках установлены сенсоры ПСС и МСС для съемки в панхроматическом и мультиспектральном режимах с пространственным разрешением 2,5 и 12,0 м. Преимуществом

группировки «Канопус-В» является относительно низкая себестоимость спутников, в сравнении со спутниками Ресурс-П, а также возможность съемки по заказу в ежедневном режиме. Однако есть и существенные недостатки, прежде всего узкая полоса обзора (всего 23 км), что резко снижает производительность спутников (она в несколько раз ниже, чем у спутников Sentinel-2, данные которых находятся в открытом доступе).

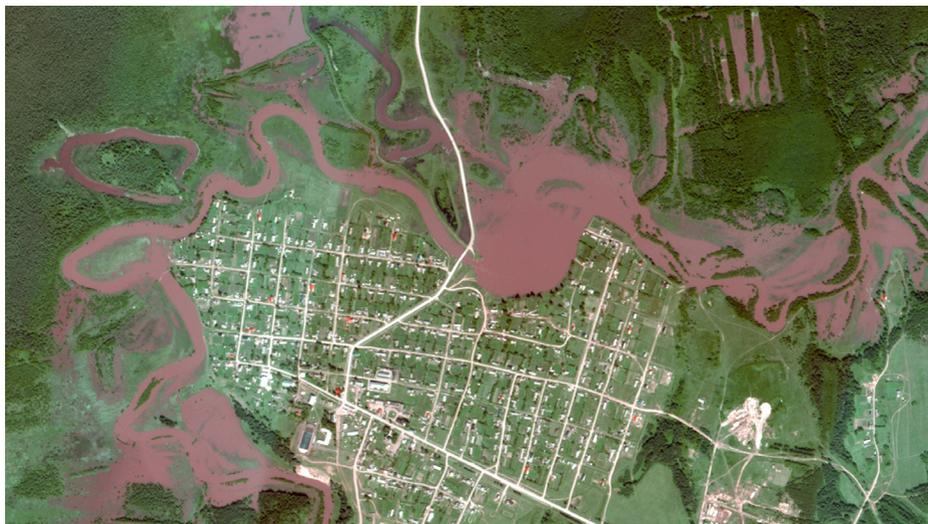


Рис.1.28. Фрагмент снимка со спутника Ресурс-П в естественных цветах (дождевой паводок в июле 2019 г. в Пермском крае)

Также с 2016 г. на орбите действует спутник Аист-2Д, разработанный РКЦ «Прогресс», но не относящийся к группировке Роскосмоса. Он ведет съемку в оптическом диапазоне с пространственным разрешением до 2 м, а снимки доступны через каталоги российских дистрибьюторов данных ДЗЗ (в частности, ГК СКАНЭКС).

В 2023 г. был выведен на орбиту первый российский спутник для радиолокационной съемки «Кондор-ФКА №1», по состоянию на август 2023 г. проводятся его летные испытания. На борту установлен радиолокатор S-диапазона (длина волны 10 см), который может вести съемку в трех различных режимах с пространственным разрешением от 1–2 м до 12 м и производительностью до 1 млн. км² в сутки.

Важнейшим конкурентным преимуществом российских данных ДЗЗ в сравнении с зарубежными коммерческими данными является возможность их бесплатного получения через геопортал Роскосмоса (<https://gptl.ru/>) для широкого круга пользователей: Министерства обороны РФ, МЧС РФ, Росгидромета, региональных органов исполнительной власти, академических институтов и вузов. При этом федеральные министерства и ведомства являются первоочередными потребителями (их

заказы на съемку удовлетворяются в первую очередь). Для развития коммерческого сегмента (ГИС-сервисов, использующих данные российских спутников ДЗЗ) была создана компания АО «ТерраТех» которая входит в Госкорпорацию «Роскосмос» и в основном решает задачи в области разработки технологий автоматической интерпретации космических снимков [ТерраТех, 2023].

ГЛАВА 2

ТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРОДУКТЫ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДЗЗ

Согласно Государственному стандарту РФ [ГОСТ Р 59082-2020], тематический продукт обработки данных ДЗЗ из Космоса – это продукт, созданный на основе дешифрирования данных ДЗЗ из Космоса с применением тематической или аналитической обработки, в том числе с использованием пространственных данных и других видов информации, для решения задач потребителей. Как следует из этого определения, тематический продукт может быть создан методами как автоматизированного, так и экспертного дешифрирования. В настоящем пособии будет использована более узкая трактовка термина «тематический продукт» – это набор данных, содержащий характеристики поверхности суши, океана, атмосферы, создаваемый на основе автоматического дешифрирования данных ДЗЗ из Космоса, и как правило, актуализируемый с определенной периодичностью.

По мере развития технологий автоматического дешифрирования спутниковых данных, все чаще пользователи имеют возможность работать не с исходными снимками, а с тематическими продуктами их обработки. Тематические продукты могут создаваться как по данным ДЗЗ, находящимся в открытом доступе, так и по данным, распространяемым на коммерческой основе. Продукты на основе открытых данных часто имеют глобальный охват, тогда как продукты на основе коммерческих данных могут создаваться в пределах интересующей заказчика области. В настоящем разделе рассматриваются только продукты, созданные на основе открытых данных.

Первый опыт автоматической генерации тематических продуктов по данным ДЗЗ получен в рамках программы NASA EOS по данным со спутников Terra и Aqua. В последующие годы было разработано множество алгоритмов для тематической обработки данных, и на их основе созданы сотни тематических продуктов сначала низкого, а затем, по мере увеличения вычислительных мощностей, и среднего пространственного разрешения.

В общей классификации уровней обработки спутниковых данных, большинство тематических продуктов относятся к данным высокого уровня обработки (Level 3). Помимо этого, выделяют следующие уровни обработки.

Level 0 (RAW, сырые данные) – первичные данные, полученные после приема на станцию. Такие данные не читаются обычным программным обеспечением для обработки снимков.

Level 1 – данные начального уровня обработки. Как правило, для них проведена радиометрическая коррекция и калибровка, систематическая геометрическая коррекция на основе орбитальных элементов. Данные уровня Level 1 могут быть приведены к картографической проекции и ограничены по интересующей заказчика

области (в этом случае их называют Level 1b), а в некоторых случаях (например, для данных Landsat) – также ортотрансформированы по глобальной цифровой модели рельефа (ЦМР).

Level 2 – данные среднего уровня обработки, для которых выполнена геометрическая коррекция с использованием наземных данных и/или ортотрансформирование по ЦМР, а для данных Landsat и Sentinel-2 – также атмосферная коррекция. Для данных MODIS продукты уровня Level 2 – это тематические продукты, которые генерируются ежедневно (отдельно по каждому изображению), а Level 3 – композитные продукты, которые собирают из множества снимков, полученных за 8, 16 суток, месяц или год.

Для радиолокационных данных выделяются иные уровни обработки: сырые данные (RAW, Level 0), которые не читаются обычным программным обеспечением, Level 1 (данные, доступные для обработки) и Level 2 (тематические продукты). Данные Level 1 поставляются в двух форматах: содержащие только информацию об амплитуде сигнала, аналоге яркости для оптических изображений (GRD), а также данные, содержащие информацию о фазе сигнала (SLC), которые используются для интерферометрической обработки, определения высот и смещений земной поверхности.

2.1. Тематические продукты, получаемые по спутниковым данным ДЗЗ низкого пространственного разрешения

Тематические продукты на основе данных сенсора MODIS

Распространение данных сенсора MODIS и тематических продуктов, созданных на их основе, производится через несколько онлайн-каталогов, в частности LAADS DAAC [Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System, 2023] и LP DAAC [Land Processes Distributed Active Archive Center, 2023], разработанных NASA и USGS соответственно. В каталоге LAADS DAAC доступны продукты всех уровней обработки. Ссылки на источники данных приведены в Приложении 2 к данному пособию.

После приема снимков на станцию данные сенсора MODIS записываются в файл с расширением .PDS (продукт уровня Level 0). Такие данные используются в основном научными коллективами, которые разрабатывают алгоритмы их обработки.

Данные MODIS первого уровня обработки включают продукты уровня Level1A Radiance Counts (MOD01, первичные некалиброванные данные) и Level1B (MOD02 Calibrated Geolocated Radiances). Набор данных Level1B включает пять файлов: MOD03 (Geolocation Data Set, геопривязка и метаданные), MOD021KM, MOD02HKM и MOD02QKM (спектральные каналы с пространственным разрешением 1 км, 0,5 км и 0,25 км соответственно), а также MOD020BC (калибровочные коэффициенты). Все

эти данные распространяются в формате .HDF (Hierarhical Data Format) через интерактивный каталог LAADS DAAC. Продукты высокого уровня обработки генерируются на основе данных уровня Level1B.

Продукты высокого уровня обработки представлены в виде ежедневных (Daily) и композитных изображений (8-ми дневные, 16-ти дневные, месячные и годовые композиты). Для всех продуктов MODIS существует также понятие «коллекция (Collection)», под которой понимают поколение обработки алгоритмов данных. В настоящее время доступны данные коллекции 6.

Тематические продукты обработки данных MODIS классифицируются по геоферам. Выделяются продукты, характеризующие состояние атмосферы (Atmosphere), поверхности суши (Land), криосферы (Cryosphere) и океана (Ocean). Их основные характеристики приведены в табл. 2.1. Данные распространяются в синусоидальной проекции. Для ежедневных (Daily) продуктов выполняется нарезка по 5-ти минутным сегментам пролета спутника (5-Min Swath), продукты более высокого уровня обработки (компози́ты) нарезаются по разграфке $10 \times 10^\circ$. Примеры изображений, созданных на основе продуктов MODIS, приведены на рис. 2.1 – 2.2.

Таблица 2.1

Тематические продукты, создаваемые по данным сенсора MODIS

Название (англ.)	Характеристика продукта (рус.)	Частота обновления	Пространственное разрешение, км
MODIS Atmosphere			
MOD 04: Aerosol Product	Атмосферные аэрозоли	Ежедневно	3; 10
MOD 05: Total Precipitable Water Vapor	Влагосодержание атмосферы	Ежедневно	1
MOD 06: Cloud Properties	Параметры облачности	Ежедневно	1; 5
MOD 07: Atmosphere Profiles	Профили температуры и влажности, индексы неустойчивости	Ежедневно	5
MOD35: Cloud Mask	Маска облачности	Ежедневно	0,25; 1
MOD08: Aerosol Water Vapor Ozone	Атмосферные аэрозоли, содержание водяного пара и озона, индексы неустойчивости	Ежедневно, 8 сут, месяц	$1 \times 1^\circ$
MODIS Land			
MOD9: Atmospherically Corrected Surface Reflectance	Коэффициенты спектральной яркости поверхности (после атмосферной коррекции)	Ежедневно	0,25; 0,5; 1

Таблица 2.1 (продолжение)

Название (англ.)	Характеристика продукта (рус.)	Частота обновления	Пространственное разрешение, км
MODIS Land			
MOD11: Land Surface Temperature & Emissivity	Радиояркая температура поверхности/уходящее тепловое излучение	Ежедневно	1
MCD12: Land Cover Types and Dynamics	Типы земных покровов/землепользования и их динамика	Ежедневно	0,5
MOD13: Vegetation Indices	Вегетационные индексы NDVI, EVI	16 сут.	0,5
MOD14: Thermal Anomalies, Fires	Тепловые аномалии, пожары	Ежедневно	1
MOD15: Leaf Area Index & Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (FPAR)	Листовой индекс и доля поглощенной фотосинтетически активной радиации	8 сут.	0,5
MOD16: Evapotranspiration	Испарение и транспирация	Ежедневно	0,5
MOD17: Gross Primary Productivity, Net Primary Production	Первичная продуктивность, чистая первичная продукция экосистем		0,5
MOD43: Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)/Albedo	Двунаправленная функция отражения/альбедо	Ежедневно	0,5; 0,5×0,5"
MCD64: Burned Area	Выгоревшие территории	Ежемесячно	0,5
MODIS Cryosphere			
MOD 10: Snow Cover	Маска снежного покрова	Ежедневно	0,5
MOD 29: Sea Ice Cover	Маска морских льдов	Ежедневно	0,5
MODIS Ocean			
MOD 18: Surface Radiation	Отраженное излучение от поверхности воды	Ежедневно	1
MOD 19: Chlorophyll "a"	Содержание хлорофилла «а» в воде	Ежедневно	1

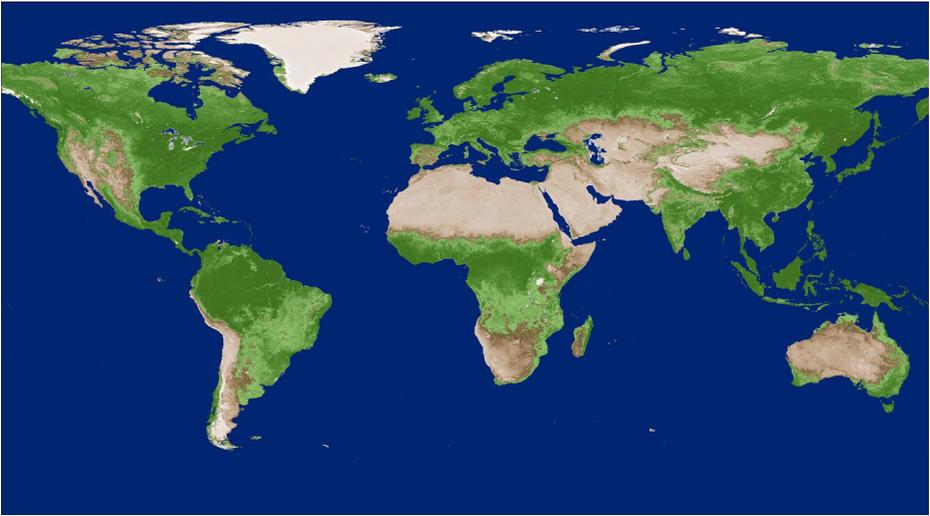


Рис. 2.1. Глобальное распределение нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI по данным MOD13 (16-ти дневный композит)

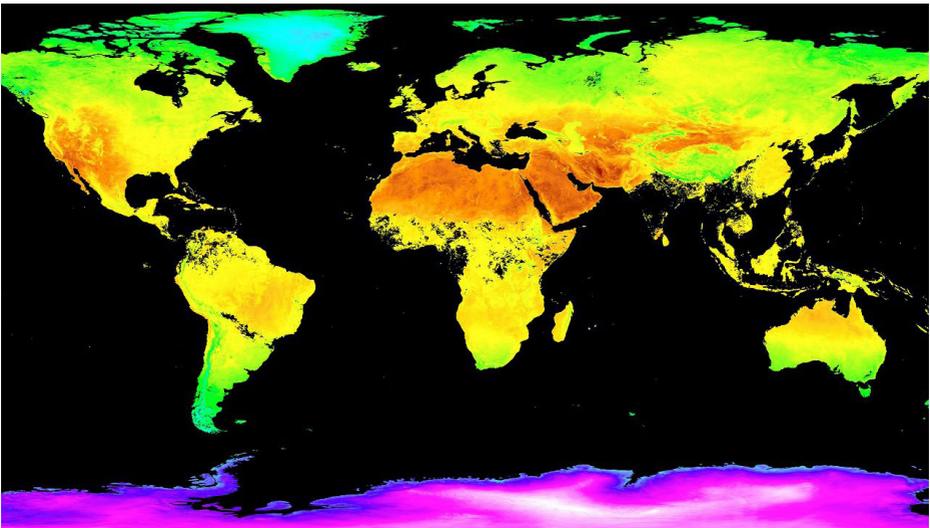


Рис. 2.2. Глобальное распределение температуры земной поверхности по данным MOD11 C2 (8-ми дневный композит)

Одним из важнейших тематических продуктов обработки данных MODIS является MOD14 (Thermal Anomalies, Fires), разработанный согласно алгоритму [Giglio et al., 2016]. Аналогичные продукты созданы также по данным сенсора VIIRS, установленного на спутниках Suomi NPP и NOAA-20 (они имеют название VNP14). Поскольку

сенсор VIIRS имеет более высокое пространственное разрешение в тепловом диапазоне спектра, чем MODIS (0,7 км и 1 км соответственно), и более высокую чувствительность, то данные VIIRS существенно лучше, чем MODIS, и характеризуют реальные площади, пройденные природными пожарами (рис. 2.3).

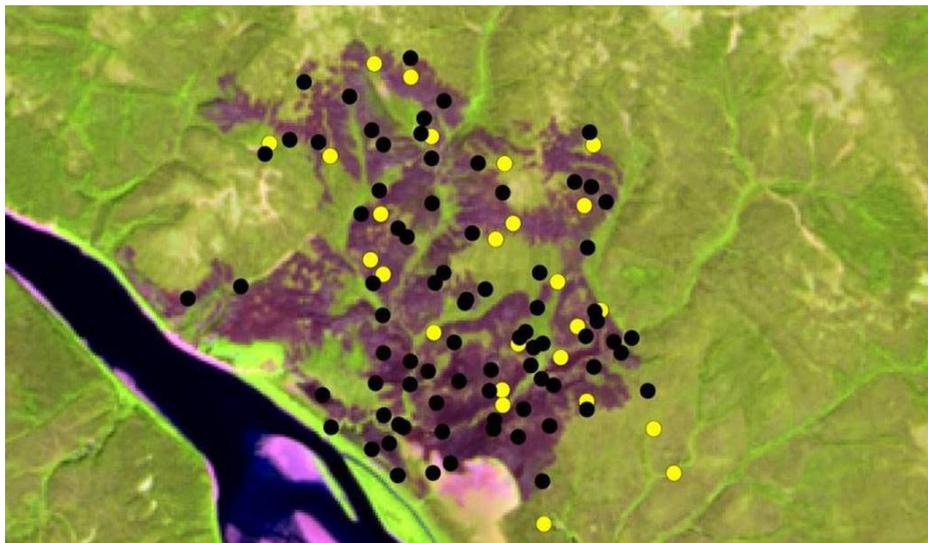


Рис. 2.3. Соответствие термоточек по данным MOD14 (желтые) и VNP14 (черные) с реальной площадью, пройденной лесным пожаром (на снимке в темно-красных оттенках)

Продукты MOD14 и VNP14 могут быть получены не только в виде файлов в формате .HDF на вышеописанных сервисах LAADS DAAC и LP DAAC, но и в векторных (.shp или .kml) или текстовых (.txt или json) форматах на специальном ресурсе NASA FIRMS [Fire Information for Resource Management System, 2023]. Данные MOD14 и VNP14 являются информационной основой не только для FIRMS, но и для других систем спутникового мониторинга пожаров, включая российские разработки [Карта пожаров, 2023; Информационная система..., 2023].

Для каждой тепловой аномалии, фиксируемой сенсорами MODIS или VIIRS, в атрибутивной таблице записаны координаты и ряд характеристик. Наиболее важными из них являются радиояркостная температура в зоне спектра 3,5–4 мкм (у MODIS – 21-й канал, у VIIRS – 14-й канал); радиояркостная температура в зоне спектра 11 мкм (у MODIS – 31-й канал, у VIIRS – 21-й канал) и радиационная мощность излучения от пожара, определяемая на основе радиояркостных температур (Fire Radiative Power). Последняя характеристика применяется для оценки интенсивности горения.

На сервисе NASA FIRMS также доступен многолетний архив данных о тепловых

аномалиях: для данных MOD14 – с 11.11.2000 г., для данных VNP14 – с 20.01.2012 г. Это позволяет использовать сервис не только для мониторинга, но и для анализа многолетней динамики и пространственного распределения природных пожаров (пример приведен на рис. 2.4).

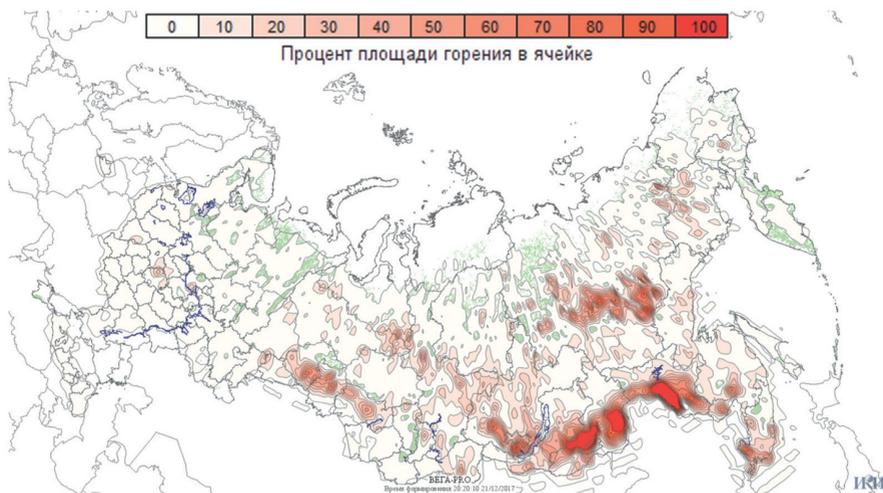


Рис. 2.4. Распределение природных пожаров по территории России за 2001–2015 гг. по данным MOD14 [Лупян и др., 2017]

Помимо продукта VNP14, по данным сенсора VIIRS генерируются еще несколько тематических продуктов на основе алгоритмов, аналогичных тем, которые ранее были разработаны для данных MODIS. В частности, в каталоге LAADS DAAS доступны следующие продукты на основе данных VIIRS: VNP04ANC Aerosol Daily (данные о содержании аэрозолей в атмосфере), VNP09 (коэффициенты спектральной яркости поверхности (после атмосферной коррекции)), VNP13 (вегетационные индексы), VNP14 (тепловые аномалии/пожары), VNP15 (лиственный индекс LAI), VNP21 (температура земной поверхности), VNP22 (типы земных покровов и землепользования), VNP43 (функция отражения/альбедо) и VNP43 (яркость поверхности по ночным снимкам). Пространственное разрешение этих продуктов составляет 350 м или 700 м.

Карты земных покровов, растительности и землепользования по спутниковым данным низкого пространственного разрешения.

Карты растительного покрова по спутниковым данным создаются с 1990-х гг. XX века. В настоящее время реализовано множество международных программ и проектов в данной области, исторический обзор которых представлен в работе [Барталев и др., 2016]. В ходе этих проектов были разработаны общие рекомендации по формированию легенд спутниковых карт растительности. Согласно им, спутни-

ковые карты растительности должны учитывать следующие признаки: жизненные формы (древесная, кустарниковая, травяная, мохово-лишайниковая), типы вегетативных органов (хвойные, лиственные) и типы фенологической динамики (вечнозеленые, листопадные).

В 1990-е и начале 2000-х гг. для глобального картографирования растительности использовались данные с метеорологических спутников NOAA (сенсор AVHRR), и SPOT-Vegetation (сенсор установлен на спутнике SPOT-4) с пространственным разрешением 1100 м. В последующие годы начали использоваться данные Terra/Aqua MODIS и ENVISAT/MERIS с пространственным разрешением 500 м и 300 м соответственно. В последние 10 лет вычислительные мощности позволили создавать карты растительного покрова уже по данным Landsat с пространственным разрешением 30 м.

Первая глобальная карта растительного покрова земли была создана по данным AVHRR/NOAA в 1991 г. и получила название Global Land Cover 1991. Легенда этой карты включала 14 классов, в том числе 5 классов лесопокрываемых территорий [Барталев и др., 2016]. Следующим значимым этапом в истории глобального картографирования растительного покрова стал проект Global Land Cover 2000, реализованный на основе данных сенсора SPOT-Vegetation. В рамках этого проекта коллективом авторов из Института космических исследований (ИКИ) РАН и Центра экологии и продуктивности лесов (ЦЭПЛ) РАН была создана Карта наземных экосистем Северной Евразии [Барталев и др., 2000]. При ее создании использовался ряд новых спектральных, спектрально-временных и спектрально-угловых индексов, отражающих фенологические, влажностные структурные свойства поверхности. Карта успешно прошла качественную и количественную валидацию, что позволило включить ее в соответствующую глобальную базу данных. Легенда карты включала 27 классов растительности и землепользования, что делает ее одной из самых детальных по глубине интерпретации спутниковых снимков.

В 2008 г. коллективом авторов из Европейского космического агентства (ESA) была опубликована карта растительного покрова GlobCover-2009, созданная на основе данных гиперспектрального сенсора MERIS [Arino et al, 2008]. Легенда карты GlobCover-2009 включает 22 класса подстилающей поверхности (Табл. 2.2). Карта, которая находится в открытом доступе (ESA..., 2023), активно используется специалистами со всего мира вплоть до настоящего времени. Однако ее существенным недостатком является отсутствие актуализации после 2009 г. В легенде карты также объединены в один класс светлохвойные и темнохвойные леса, что является существенным недостатком для территории России, поскольку разделение елово-пихтовых и сосновых лесов имеет критическое значение для оценки их подверженности пожарам.

По данным Terra/Aqua MODIS создан глобальный продукт, характеризующий

типы подстилающей поверхности и землепользования MCD12Q1 (см. табл. 2.1). Но для территории России большее значение имеет серия карт растительности, созданная Отделом технологий спутникового мониторинга ИКИ РАН, которые отличаются более высокой тематической детальностью и пространственным разрешением (230 м, против 500 м для MCD12Q1). Оба продукта ежегодно актуализируются (в отличие от карты GlobCover-2009) и характеризуют современное состояние растительности.

Легенда карты растительности России, созданной в ИКИ РАН, включает 22 класса. Карта создана с использованием технологий классификации очищенных от влияния облаков композитных изображений, соответствующих разносезонным временным интервалам и учитывающих особенности фенологической динамики растительности. Для учета географической изменчивости спектральных характеристик классов разработан алгоритм локально-адаптивной обучаемой классификации LAGMA. Также на основе данных Terra/Aqua MODIS в ИКИ РАН созданы и ежегодно актуализируются карты породного состава лесов (выделяется 12 преобладающих пород в древостое), динамики лесистости, запаса стволовой древесины в лесах и площади пахотных земель на территории России. Технологии их создания детально рассмотрены в [Барталев и др., 2016], а фрагмент карты растительности для лесной зоны Европейской территории России (ЕТР) приведен на рис. 2.5. Все перечисленные карты доступны на онлайн-сервисе ИКИ РАН [БЕГА-Science, 2023].

В последние годы в ИКИ РАН также разработаны аналогичные карты на основе данных с бельгийского спутника Proba-V, с пространственным разрешением 100 м. В частности, карта растительности России по данным Proba-V была опубликована в 2018 г. Она имеет легенду из 24 классов. Для создания карты использовались разносезонные изображения в видимом, ближнем и среднем ИК диапазонах спектра [Егоров и др., 2018].

Представляет интерес также получение более длинных рядов данных о состоянии растительного покрова и землепользования, в том числе об изменениях под влиянием деятельности человека. Для этого в совокупности со спутниковыми данными используются математические модели, описывающие динамику землепользования. На основе комбинирования нескольких источников спутниковых данных (от NOAA/AVHRR до Landsat) и математических моделей был создан новый тематический продукт HILDA+ (Global Land Use Change between 1960 and 2019), характеризующий изменения растительного покрова и землепользования с пространственным разрешением 1 км за 60-ти летний период. В легенде данного продукта выделено 6 классов: городские территории, пашни, пастбища, леса, несельскохозяйственная травянистая растительность и участки с редкой растительностью (пустыни, арктические и горные пустыни). Подробное описание приведено в работе [Winkler et al., 2021], а ссылка на загрузку данных - в Приложении 2.



Рис. 2.5. Фрагмент карты растительности России, разработанной Отделом технологий спутникового мониторинга ИКИ РАН для лесной зоны ЕТР

2.2. Тематические продукты, получаемые по спутниковым данным ДЗЗ среднего пространственного разрешения

Первый глобальный тематический продукт, созданный по спутниковым данным среднего пространственного разрешения, – это глобальная карта изменений растительного покрова Земли Global Forest Change [Hansen et al., 2013]. Проект был реализован совместно с лабораторией GLAD (Global Land Analysis and Discovery, GLAD) университета штата Мэриленд (США) и компанией Google на основе многолетнего ряда спутниковой съемки Landsat за период с 2000 г. по настоящее время. В последующие годы лабораторией GLAD (<https://glad.umd.edu/>) был разработан и

опубликован еще ряд тематических продуктов на основе данных Landsat, которые также внесли существенный вклад в изучение и картографирование растительного покрова Земли и его изменений (табл. 2.2).

Таблица 2.2.

**Перечень основных продуктов обработки данных Landsat,
созданных лабораторией GLAD**

Название продукта	Характеристика продукта	Ссылка
Global Forest Change	Изменения лесного покрова Земли с шагом в 1 год	[Hansen et al., 2013]
Global Land Cover and Land Use Change	Изменения растительности и землепользования в глобальном масштабе за период с 2000 по 2020 г. (лесопокрытая территория, потери лесного покрова, высота древостоя, пахотные земли, застроенная территория, поверхностные воды, снега и льды)	[Potapov et al., 2022b]
Global Cropland Expansion in the 21st century	Площади пахотных земель и их динамика за период 2000–2019 гг. с шагом в 4 года	[Potapov et al., 2022a]
Global Forest Canopy Height	Высота древостоя в 2000 и 2020 гг. по данным лидарной миссии Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) и снимкам Landsat	[Potapov et al., 2020]
Global Forest Loss Due to Fire	Глобальные потери лесов от пожаров за 2001-2019 гг., оцененные по снимкам Landsat совместно с данными о тепловых аномалиях MOD14	[Tyukavina et al., 2022]
Intact Forest Landscapes	Малонарушенные лесные территории по состоянию на 2000, 2013, 2016 гг.	[Potapov et al., 2017]
Global 2010 Bare Ground	Пустыни и иные земли, лишённые растительности, по состоянию на 2010 г.	[Ying et al., 2017]
Global 2010 Tree Cover (30 m)	Лесопокрытая территория по состоянию на 2010 г.	[Hansen et al., 2013]
Global Surface Water Dynamics 1999-2021	Площади, занятые поверхностными водами, их сезонная и межгодовая динамика	[Pickens et al., 2020]
Eastern Europe Forest Cover Change	Изменения лесного покрова лесов на территории Восточной Европы (включая Европейскую часть России) в 1985–2012 гг.	[Potapov et al., 2015]

Все продукты обработки данных Landsat, созданные лабораторией GLAD, имеют ряд общих особенностей:

- открытый доступ ко всем данным, которые могут быть загружены с соответствующих страниц проектов на сайте лаборатории (<https://glad.umd.edu/dataset>) или визуализированы на интерактивных картах. Загрузка осуществляется в виде листов размером $10 \times 10^\circ$, либо по крупным регионам;
- большинство продуктов созданы по снимкам за период с 2000 г., т.е. с момента запуска спутника Landsat-7. Данные Landsat-7 после сбоя Scan Line Corrector в 2003 г. также использовались, что несколько повлияло на качество продуктов в 2003–2005, 2008 и 2012 г., когда на орбите работал только один спутник Landsat-7;
- данные предоставляются в системе координат WGS 1984 без проекции, с пространственным разрешением $0.00025 \times 0.00025^\circ$ (30 м на экваторе), формат растра – целочисленный Geotiff;
- частота обновления различается для разных продуктов (см. табл. 2.2).

Особенности разных тематических продуктов

Global Forest Change (GFC) является наиболее известным и часто используемым из всех тематических продуктов, созданных лабораторией GLAD. Данные GFC включены в ряд проектов GLAD, реализованных в последующие годы, и широко используются исследователями для изучения нарушений лесного покрова и причин их возникновения (как природных, так и антропогенных) по всему миру, в том числе в России. Так, по данным GFC впервые создана карта гибели лесов от пожаров в России [Krylov et al., 2014], глобальная карта преобладающих причин (драйверов) нарушений лесного покрова [Curtis et al., 2018], а также картографическая база данных ветровалов в лесной зоне России [Шихов и др., 2022].

В настоящее время продукт GFC включает следующие наборы данных:

- Percent Tree Cover 2000 – лесопокрываемая территория на 2000 г. (доля леса в пикселе);
- Forest Cover Loss – потери лесов за весь период с 2001 по 2022 г. (бинарный растр);
- Forest Loss Year – потери лесов с 2001 г. по годам. Значения ячеек растра от 1 до 22 соответствуют году потери леса (2001–2022), но при этом точность определения года согласно оценкам авторов [Hansen et al., 2013] составляет около 75%;
- Forest Cover Gain – восстановление лесов за период 2000–2012 гг. (бинарный растр).

Продукт Global Forest Canopy Height содержит данные о высоте лесного полога (с точностью до 1 м), полученные на основе лидарной съемки с Международной космической станции, проведенной в рамках миссии GEDI в апреле 2019 г. Съемка выполнена для территории в пределах от 52° с.ш. до 52° ю.ш. Для остальной территории высота древостоя восстанавливалась регрессионными методами по спек-

тральным характеристикам (на основе зависимостей, выявленных для области, покрытой данными лидара).

Продукт Global Cropland Expansion содержит площади пахотных земель, выделенные по снимкам Landsat за периоды 1999–2003, 2003–2007, 2007–2011, 2011–2015, 2015–2019 гг. на основе методов машинного обучения, а также их динамику (участки увеличения и сокращения площадей).

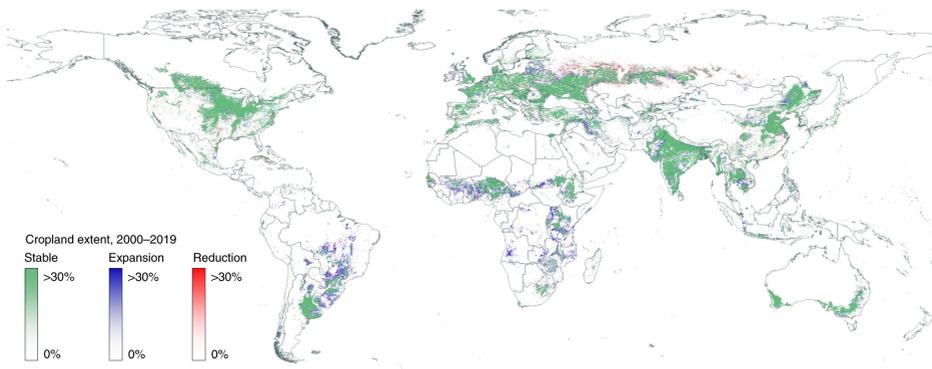


Рис.2.6. Пространственное распределение пахотных земель и их динамика в мире по данным Global Cropland Expansion [Potapov et al., 2022]

Продукт Global Land Cover and Land Use Change (GLCLU) является комбинацией нескольких наборов данных, характеризующих динамику растительного покрова и землепользования:

- Forest Extent (лесопокрываемые территории за 2000 и 2020 гг.), где в качестве леса учитывается древесная растительность высотой от 5 м;
- Forest Canopy Height – высота древостоя за 2000 и 2019 гг. согласно данным Global Forest Canopy Height;
- Forest Loss (потери леса согласно данным GFC)
- Croplands – пахотные земли за 2000 и 2019 гг. (согласно данным Global Cropland Expansion);
- Built-up areas – застроенные территории за 2000 и 2020 гг.;
- Водная поверхность за 1999 и 2020 гг. согласно данным Global Surface Water Dynamics 1999–2021 [Pickens et al., 2018];
- Многолетние снега и льды за 2000–2020 гг.

Продукт Global Forest Loss Due to Fire содержит данные о потерях лесов в 2000–2019 гг., вызванных пожарами и другими факторами, согласно данным Global Forest Change. Значение пикселя 0 соответствует отсутствию потерь лесного покрова, 1 – нарушениям, не связанным с пожарами, 2, 3 и 4 – нарушениям, связанным с пожарами с низкой, средней и высокой достоверностью соответственно. Примеры

тематических продуктов, характеризующих лесной покров и его нарушения, приведены на рис. 2.7.

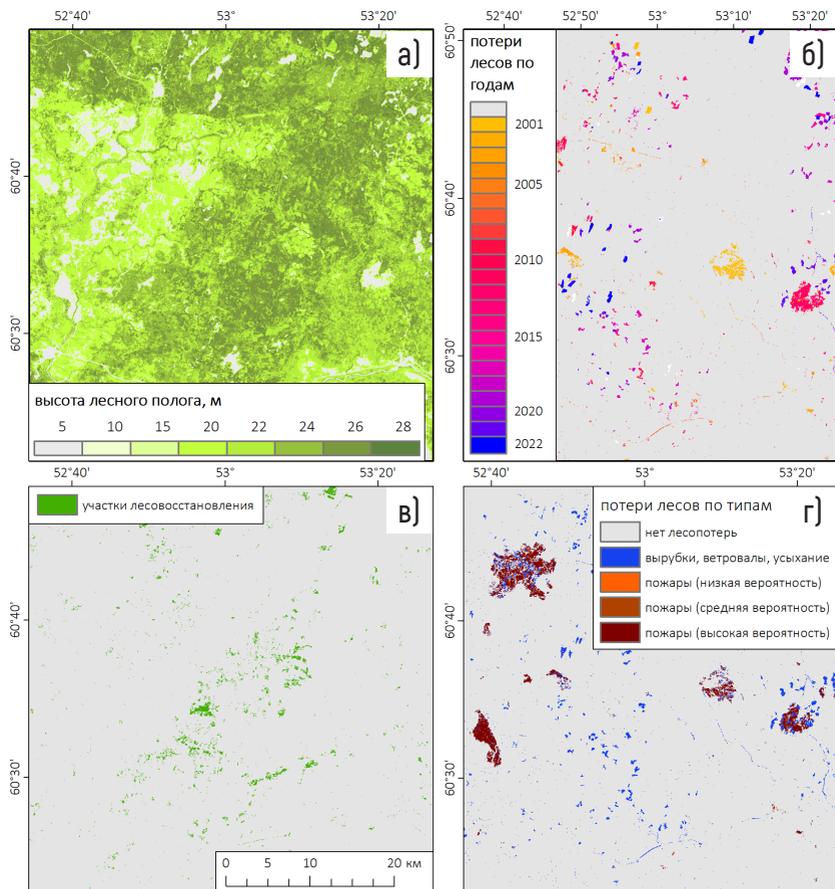


Рис.2.7. Примеры продуктов лаборатории GLAD для территории северо-запада Пермского края: а) высота лесного полога по данным Global Forest Canopy Height; б) потери лесов по годам по данным GFC (2001–2022); в) участки лесовосстановления по данным GFC (2001–2012); г) потери лесов от пожаров и других факторов в 2001–2020 гг. (Global Forest Loss Due to Fire)

Продукт Intact Forest Landscapes содержит данные о малонарушенных лесных территориях (МЛТ) за 2010, 2013 и 2016 гг., выявленных по спутниковым снимкам экспертным путем [Potapov et al., 2017]. Под МЛТ понимают обширные непрерывные пространства естественных экосистем в лесной зоне, в пределах которых нет существенных признаков деятельности человека, обеспечивающие сохранение

местного биоразнообразия, включая популяции широко распространенных видов. Данные представляют собой три бинарных растра (маски) МЛТ, при сопоставлении которых можно оценить их динамику их площади за рассматриваемый период.

Из региональных продуктов лаборатории GLAD наиболее интересен для территории России Eastern Europe Forest Cover Change [Potapov et al., 2015], который отражает изменения лесного покрова Восточной Европы в 1985–2012 гг. Данные представлены в виде двух растров: Forest Loss (потери лесов за 4 периода (1986–1988, 1989–2000, 2001–2006 и 2007–2012 гг.)) и Dynamics Type (типы динамики лесов за период 1985–2012 гг., см рис. 2.8).

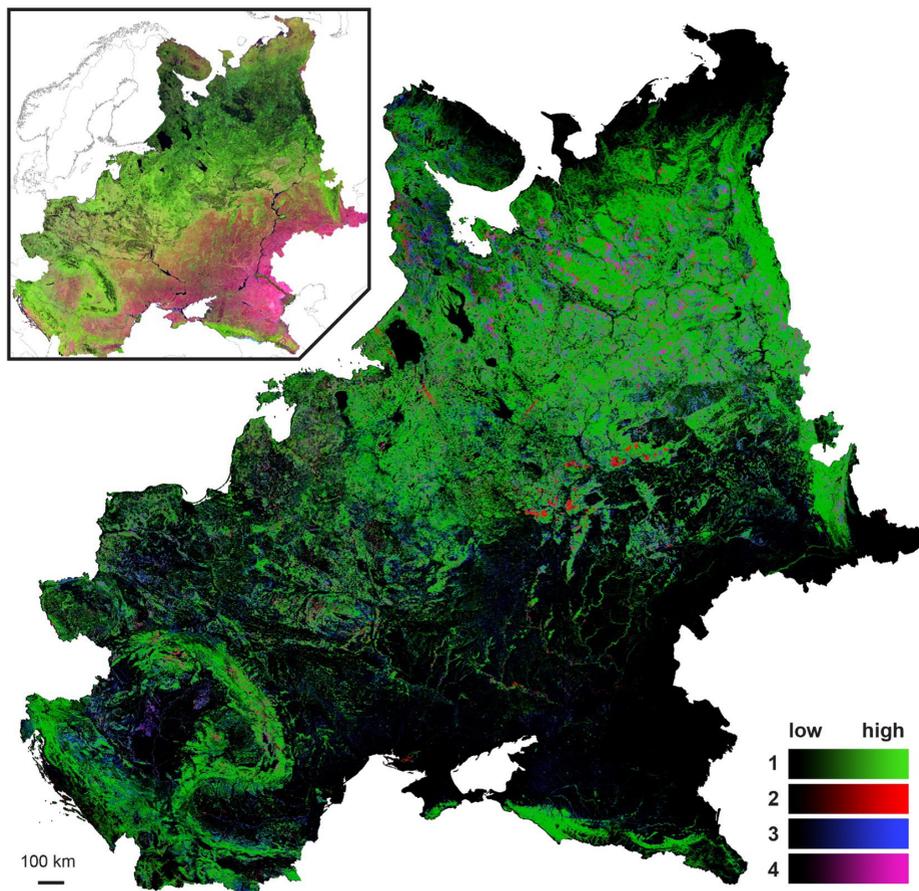


Рис. 2.8. Общий вид карты Eastern Europe Forest Cover Change [Potapov et al., 2015]: зеленый цвет – лесопокрываемые территории, красный – потери лесного покрова, синий – лесовосстановление, розовый – сначала потери, затем восстановление

Прочие тематические продукты, созданные по спутниковым данным Landsat и Sentinel-2

Продукт Global Surface Water (GSW), первая версия которого была опубликована в 2016 г., стал вторым глобальным тематическим продуктом, созданным по снимкам Landsat (после GFC). Проект по картографированию поверхностных вод Земли был реализован объединенным исследовательским центром Еврокомиссии совместно с компанией Google. Целью его было картографирование постоянно или периодически покрытых водой участков суши за период с 1984 г. по настоящее время и изучение их многолетней и сезонной динамики по спутниковым данным Landsat [Pekel et al., 2016]. Как и в случае с данными GFC, был создан онлайн-картографический сервис для просмотра данных и их загрузки (<https://global-surface-water.appspot.com/map>), а сама загрузка реализована по ячейкам сетки размером $10 \times 10^\circ$. На сервисе доступно несколько наборов данных с пространственным разрешением 30 м (примеры приведены на рис. 2.9).

- Surface Water Occurrence – частота появления водной поверхности в пикселе Landsat за весь период наблюдений, измеряется в % (0% – суша, 100% – постоянные озера, русла рек).

- Surface Water Occurrence Change Intensity – растр, показывающий увеличение или уменьшение частоты появления воды в пикселях Landsat при сравнении двух периодов: 1984–1999 и 2000–2020 гг.

- Surface Water Seasonality – растр, показывающий сезонность появления воды в пикселе, т.е. число месяцев, в течение которого в пикселе наблюдалась вода. Значения в пикселе изменяются от 1 до 12, а значение 0 соответствует отсутствию воды.

- Water Transitions – классификация водной поверхности с учетом изменений за рассматриваемый период. Всего выделяется 10 классов, которые соответствуют постоянному присутствию воды в пикселе либо ее сезонному (Seasonal) или эпизодическому (Ephemeral) появлению.

- Maximum Water Extent 1984–2021 – бинарный растр, показывающий площадь, которая хотя бы один раз за всю историю наблюдений была покрыта водой. Эти данные могут использоваться для определения потенциальных зон затопления, но с учетом того, что снимки Landsat могут не фиксировать максимально возможные разливы рек из-за низкой повторяемости съемки и/или условий облачности.

Также в последние годы были реализованы первые проекты по созданию глобальных карт типов растительного покрова и землепользования по данным Landsat и Sentinel-2. Карты пока отличаются низкой тематической детальностью, но могут использоваться для выделения некоторых хорошо распознаваемых классов (воды, лесопокрываемой территории, пахотных земель, снегов и льдов), что также возможно выполнить и на основе вышеописанных продуктов лаборатории GLAD.

Globeland30 Map – первая глобальная карта растительного покрова и землепользования с пространственным разрешением 30 м, созданная в 2015 академией наук Китая на основе данных Landsat за 2000–2013 гг. (преимущественно снимков Landsat-5 TM, полученных в 2010–2011 гг.). Данная карта не получила широкого распространения в мире по причине низкой тематической детальности легенды. Выделено всего 10 классов подстилающей поверхности, причем все леса объединены в один класс (рис. 2.10). Также для некоторых классов точность выделения была относительно низкой (менее 80% для кустарников и лугов). Обзор применения карты при решении научных и практических задач приведен в работе [Chen et al., 2017].

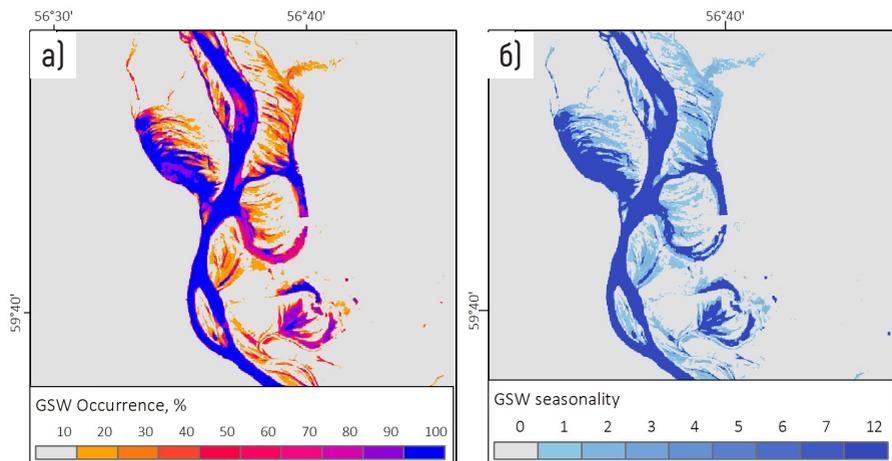


Рис. 2.9. Примеры продуктов GSW для р. Камы вблизи г. Соликамск Пермского края:
 а) частота появления воды в пикселе (occurrence);
 б) – сезонность появления воды в пикселе (seasonality)

Карта ESA WorldCover в настоящее время является самой детальной глобальной картой растительного покрова и землепользования, поскольку она была создана ESA по спутниковым снимкам Sentinel-2 и имеет пространственное разрешение 10 м. Также при создании карты использовались радиолокационные снимки Sentinel-1. Данные доступны для загрузки в виде фрагментов размером $3 \times 3^\circ$ [WorldCover Products, 2023], также разработан картографический сервис для его визуализации. В настоящее время опубликованы уже две версии продукта (v.100 и v.200 по снимкам 2020 и 2021 гг. соответственно). Особенностью продукта ESA WorldCover является возможность обновления, которая уже была реализована при создании второй версии продукта (v.200). Методика создания продукта описана в [Zanaga et al., 2022]. Общая точность данных оценивается в 74,4%. Легенда включает 11 классов согласно международной классификации LCCS (Land Cover Classification System) (рис. 2.11). Эти данные могут быть рекомендованы для маскирования от-

дельных классов подстилающей поверхности на обширных территориях и с высоким пространственным разрешением, что может иметь значение при решении различных задач моделирования в гидрологии, экологии.

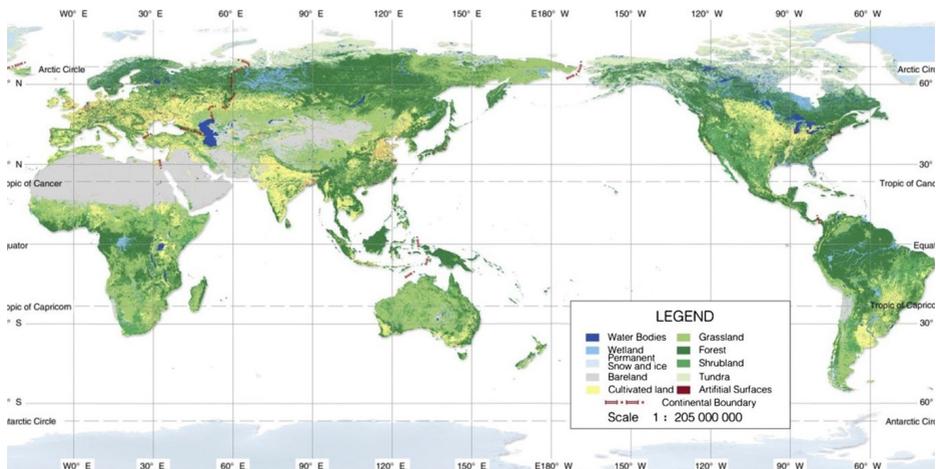


Рис. 2.10. Общий вид карты GlobeLand30 и ее легенда

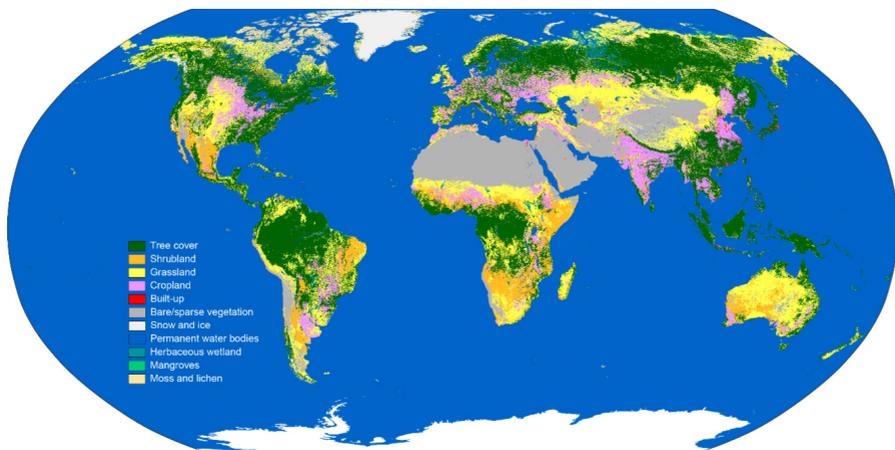


Рис. 2.11. Общий вид карты ESA WorldCover 2020 и ее легенда

Спутниковые данные среднего пространственного разрешения (прежде всего радиолокационные) используются также при получении глобальных оценок наземной биомассы, которые имеют ключевое значение для моделирования потоков углерода в наземных экосистемах и прогнозирования их изменения в будущем. Разными научными группами было создано несколько таких продуктов. Наиболее высокое пространственное разрешение (100 м) имеет продукт GlobBiomass, соз-

данный на основе данных радиолокационной съемки ALOS PALSAR и ENVISAT ASAR, а также оптических снимков Landsat TM/ETM+ за 2010 г. (поскольку данные ALOS PALSAR были доступны до 2011 г.). Для получения зависимостей и валидации использовались также более 110 тыс. наземных измерений [Santoro et al., 2021]. Каждый пиксель в наборе данных содержит значение суммарной биомассы растительности в $\text{м}^3/\text{га}$, что позволяет напрямую сопоставлять эти данные с материалами лесостроительства, в которых приняты аналогичные единицы измерения запасов древесины. Данные доступны в текстовом формате и в формате Geotiff [Santoro et al., 2018], пример их визуализации приведен на рис. 2.12.

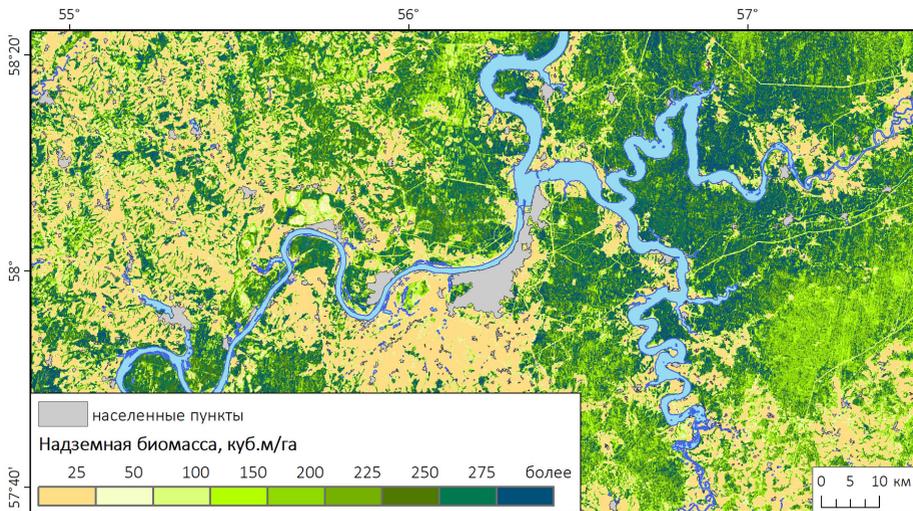


Рис. 2.12. Объем наземной биомассы в районе г. Пермь по данным GlobBiomass 2010 г.

ГЛАВА 3

ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА И ПОВЕРХНОСТИ, ПОЛУЧАЕМЫЕ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

3.1. Основные особенности цифровых моделей рельефа и способы их получения

Цифровая модель рельефа, ЦМР (digital elevation model, DEM) – это средство цифрового представления трехмерных пространственных объектов (поверхностей, рельефов) в виде трехмерных данных как совокупности высот или отметок глубин и иных значений аппликат (координаты Z) в узлах регулярной сети с образованием матрицы высот, нерегулярной треугольной сети (triangulated irregular network, TIN), или как совокупность записей горизонталей (изогипс, изобат) или иных изолиний [Геоинформатика. Толковый словарь. 1999]. Основными способами цифрового представления рельефа в ГИС являются растровые форматы и модель TIN. Источниками данных для создания ЦМР могут быть:

- цифровые топографические карты и планы территорий, содержащие информацию о высотных отметках, горизонталях, обрывах, инженерных сооружениях (например, дамбах, насыпях и выемках) и др.;
- стереопары космических снимков в оптическом диапазоне;
- стереопары аэрофотоснимков и снимков с БПЛА;
- данные радарной интерферометрии со спутников или пилотируемых аппаратов;
- данные воздушного лазерного сканирования.

При создании ЦМР по данным цифровых топографических карт и планов обычно используются методы интерполяции, способные помимо точечных отметок высот учитывать и изолинии. К ним можно отнести алгоритм «Топо в растр» («Топо to Raster») и создание триангуляционной модели рельефа (TIN). Метод «Топо в растр» при построении ЦМР также учитывает реки и озера, обрывы, локальные понижения, береговые линии.

Пространственное разрешение и точность ЦМР, созданных по данным с топографических карт и планов, напрямую зависит от масштаба источника данных, а также его актуальности. Для построения ЦМР могут быть использованы топографические карты и планы любого масштаба, начиная от 1:1000000. Однако стоит учитывать, что карты масштаба 1:50000 и детальнее имеют гриф «для служебного пользования» (ДСП), что ограничивает их доступность. Также многие топографические карты имеют возраст 50 лет и более и не отображают новые (чаще всего

техногенные) формы рельефа. Для создания ЦМР локальных территорий используются высокдетальные данные – топографические и инженерно-топографические планы местности масштаба до 1:500 (рис. 3.1), которые создаются путем инструментальных топографических съемок.

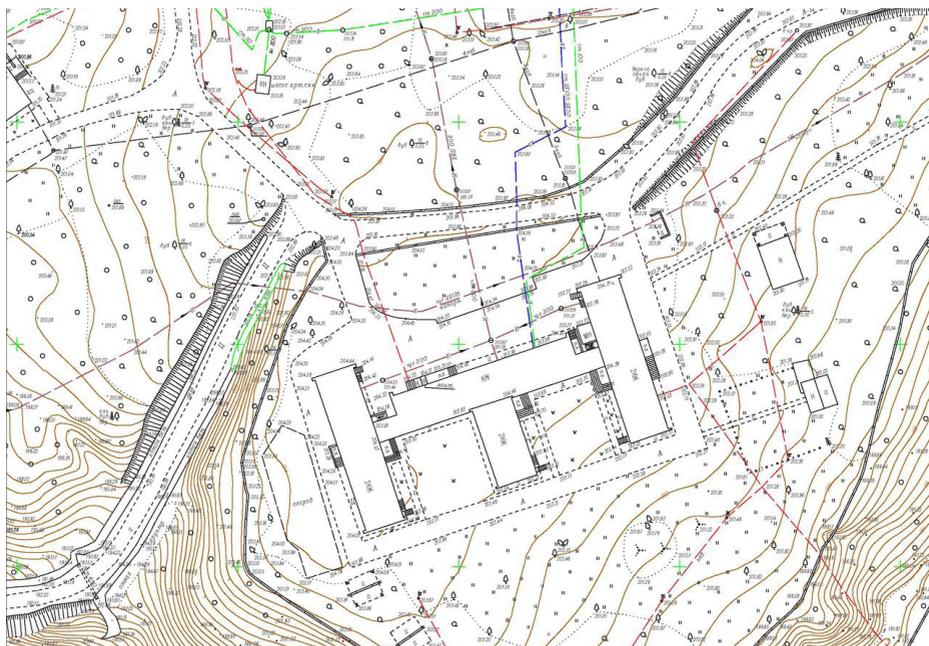


Рис. 3.1. Пример инженерно-топографического плана для создания высокдетальной ЦМР

На точность ЦМР, построенных на основе топографических карт и планов, непосредственно влияет высота сечения рельефа (сечение горизонталей) на карте или плане. Считается, что высотная точность ЦМР приблизительно равна $1/3$ сечения горизонталей. Например, если сечение рельефа составляет 10 м, то точность будет равна 3,3 м [Яковченко, 2004].

Дистанционные методы получения данных о рельефе

Первый способ создания ЦМР на основе данных ДЗЗ основан на использовании стереопар космических снимков, аэрофотоснимков или снимков, полученных с БПЛА. Для обработки стереопар применяются технологии фотограмметрии (метод стереофотограмметрии). Основным недостатком данной технологии является тот факт, что для лесопокрытых территорий на ее основе может быть получена только цифровая модель поверхности (ЦМП, в англоязычной терминологии Digital Surface Model, DSM). ЦМП, в отличие от ЦМР, включает высоты не только истинного рельефа, но также и зданий, сооружений и полога растительности (рис. 3.2). Преобразование

ЦМП в ЦМР требует фильтрации данных объектов, что может быть достаточно трудоемким процессом.

Второй способ получения ЦМР основан на данных радиолокационной космической съемки. Непосредственно для создания ЦМР используется радиолокационная интерферометрия – многоступенчатый метод обработки комплексных радиолокационных данных, предполагающий использование набора (двух и более) радиолокационных изображений исследуемой территории, полученных при близких условиях наблюдения, определяемых интерферометрической базой. Более подробно данная технология описана в учебнике [Балдина, Лабутина, 2021].

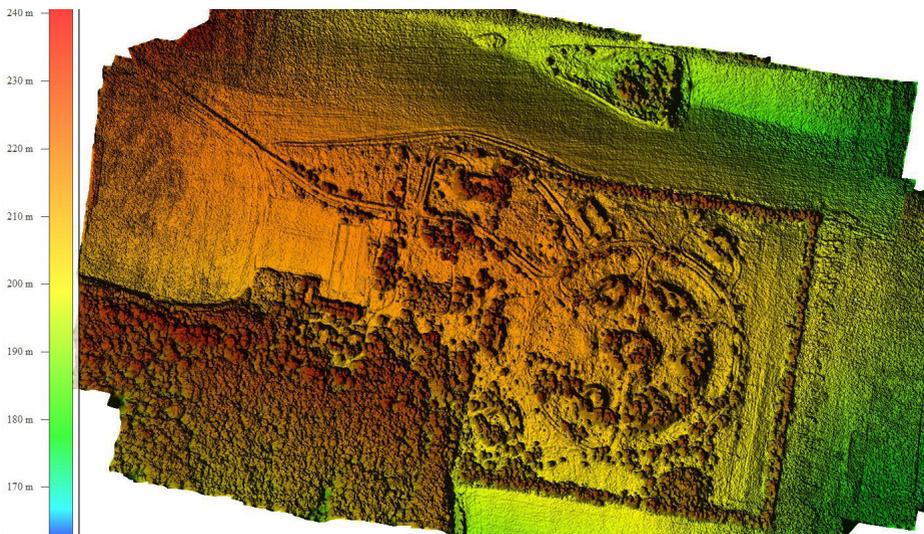


Рис. 3.2. Пример цифровой модели поверхности (ЦМП), полученной на основе данных с БПЛА

К основным преимуществам радарной интерферометрии как источника данных для создания ЦМР относится широкий охват территории (вплоть до глобального), а также независимость от погодных условий при съемке, что позволяет получать сплошное покрытие данными. В то же время для этой технологии характерна та же проблема, что и для фотограмметрической технологии – сложность автоматического исключения таких объектов, как растительный покров, здания и сооружения и т.п. Это обусловлено особенностями длин радиоволн, которые используются большинством спутниковых радиолокаторов (табл. 3.1).

Как известно, большинство спутниковых радиолокаторов работает в X- и C-диапазоне. Пространственное разрешение таких данных достигает 1 м и детальнее, однако радиоволны X- и C-диапазонов не способны проникать через растительность, что позволяет получать на основе таких данных лишь ЦМП, а не ЦМР. Радио-

волны L-диапазона могут частично проникать сквозь растительный покров. Однако данные в L-диапазоне имеют сравнительно низкое пространственное разрешение и более высокую стоимость.

Таблица 3.1

Диапазоны радиолокационной космической съемки

Диапазон	Частота, ГГц	Длина волны, см	Космические аппараты с радиолокационными комплексами
X	5,20–10,90	2,75–5,77 (2,4–3,8)	USGS SLAR, TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed
C	3,9–6,2	3,8–7,6	ERS-1,2, ENVISAT-ASAR, RADARSAT-1, RADARSAT-2, Sentinel-1
L	0,39–1,55	19,3–76,9 (15–30)	SIR-A, SIR-B, ALOS
P	0,225–0,391	40,0–76,9 (30–100)	AIRSAR

Наиболее перспективной технологией, обеспечивающей создание ЦМР высокого пространственного разрешения (до 1 м и детальнее) и высокой точности (до нескольких см), в том числе для лесопокрываемых территорий, является лидарная съемка или воздушное лазерное сканирование (ВЛС). Лазерное сканирование – разновидность активной съемки, т.е. работа лазерного сканера (лидара) не зависит от количества солнечного света. Принцип работы лазерного сканирования выглядит следующим образом. Лидар, работающий в импульсном режиме, проводит дискретное сканирование местности и объектов, расположенных на ней. При этом регистрируется направление лазерного луча и время его прохождения. Таким образом, удается однозначно локализовать в пространстве точку, от которой отразился лазерный луч. Точность определения положения данных точек при лазерном сканировании сравнима с точностью наземной геодезической съемки. Для съемки рельефа территории лидар обычно устанавливается на летательные аппараты, как пилотируемые, так и беспилотного типа.

Данные лазерного сканирования изначально имеют вид нерастеризованного трехмерного облака точек (набор данных LAS). В зависимости от высоты, с которой проводится съемка, расстояние между точками облака может варьироваться от нескольких см до десятков см. При обработке таких данных можно получать разные типы поверхностей, включая ЦМР и ЦМП, пространственное разрешение которых напрямую зависит от плотности облака точек.

Несмотря на то, что сигнал лидара не может проникнуть сквозь растительный

покров, высокое разрешение лазера позволяет ему пробиваться в промежутки между листвой и получать достаточно хорошее представление рельефа земной поверхности в виде ЦМР (рис. 3.3). Однако использование ВЛС для задач моделирования рельефа имеет и недостатки, к которым главным образом можно отнести высокую стоимость и локальность съемки.

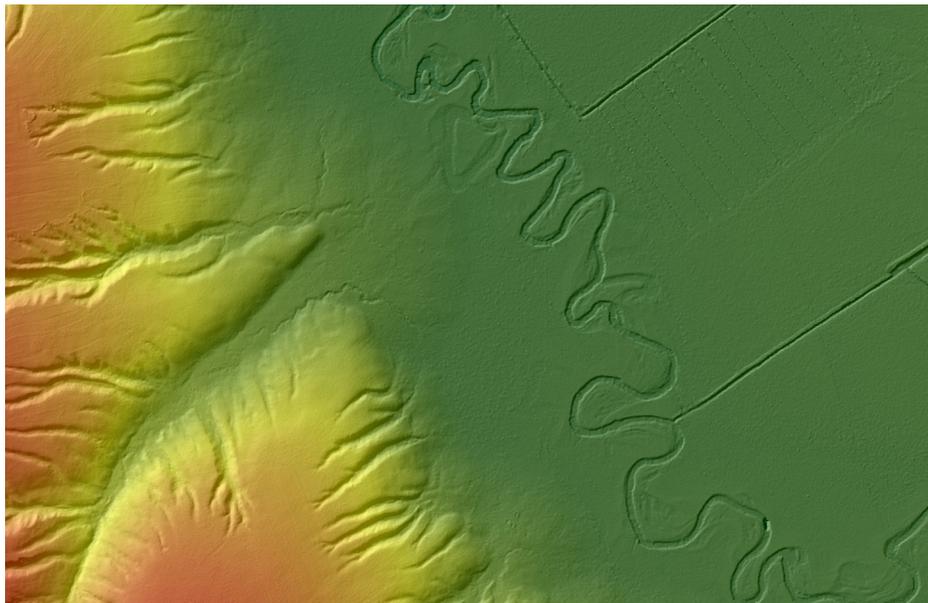


Рис. 3.3. Фрагмент высокодетальной ЦМР, полученной по данным лидарной съемки

3.2. Открытые данные о рельефе Земли

В настоящее время существует множество открытых и полностью готовых к использованию глобальных ЦМП и ЦМР как низкого (250–1000 м), так и среднего (2–90 м) пространственного разрешения (табл. 3.2).

Глобальная ЦМР GTOPO30

GTOPO30 – первая глобальная ЦМР (рис. 3.4), созданная Геологической службой США (USGS) совместно с Центром изучения природных ресурсов (EROS) в период с 1993 по 1996 г. на основе топографических карт глобального и регионального охвата. Размер ячейки ЦМР составляет 30" (≈ 1 км), данные доступны в системе координат WGS84 (EPSG:4326). ЦМР GTOPO30 охватывает весь Земной шар, но определение высот доступно только для суши, в акватории океана ячейки ЦМР имеют значение «NoData» (-9999). Ошибки в определении высоты могут колебаться в пределах ± 200 м. ЦМР доступна для загрузки через веб-каталог USGS EarthExplorer (<http://>

earthexplorer.usgs.gov/). Для удобства загрузки и использования ЦМР разделена на 33 тайла, область от 60° ю.ш. до 90° с.ш. и от 180° з.д. до 180° в.д. покрыта 27 тайлами, а территория Антарктиды – 6 тайлами. Каждый тайл покрывает 30° широты и 60° долготы. Имя тайла содержит долготу и широту его верхнего левого (северо-западного) угла. Например, координаты левого верхнего угла тайла E020N90 составляют 20° в.д. и 90° с.ш. [USGS EROS Archive, 2023]. Свое применение GTOPO30 нашла при прогнозе стока крупных рек России в гидрологической модели ECOMAG. В настоящее время ЦМР GTOPO30 считается устаревшей.

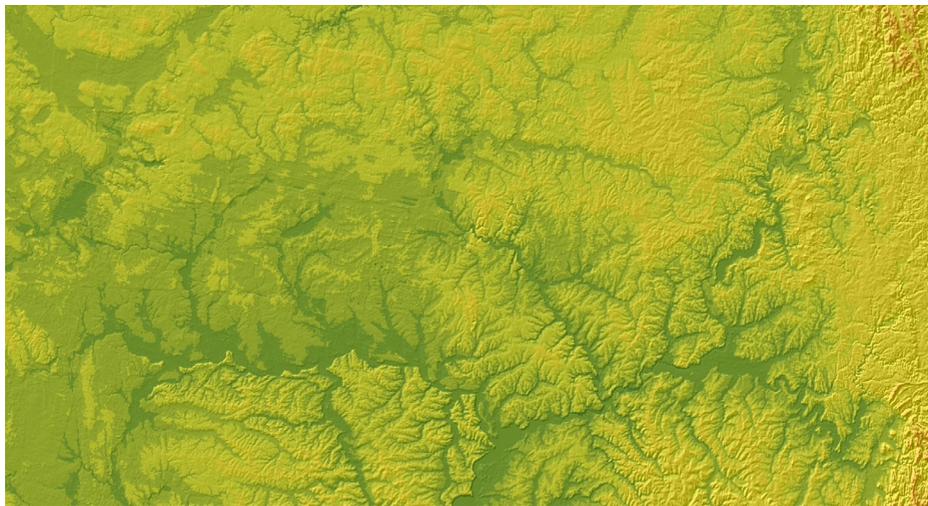


Рис. 3.4. Фрагмент глобальной ЦМР GTOPO30 на территорию восточной части Восточно-Европейской равнины

Глобальная ЦМР ETOPO2

ETOPO2 – глобальная ЦМР [рис. 3.5], включающая как наземный, так и подводный рельеф, что выгодно отличает ее от большинства других глобальных ЦМР низкого разрешения, кроме наиболее современной модели GEBCO. ETOPO2 создана Национальным центром геофизических данных США (NGDC) на основе нескольких источников. Для моделирования рельефа суши использовались данные GLOBE (Global Land One-kilometer Base Elevation) с разрешением 30", для батиметрии – данные радарной альтиметрической съемки 1978 г., совмещенные с данными по гравитационным аномалиям для получения глубин [Дубинин, 2005]. ЦМР ETOPO2 доступна в виде единой матрицы размером 10800×5400 пикселей в системе координат WGS84 (EPSG:4326) без проекции. В сыром виде данные доступны для загрузки по ссылке [NOAA, 2023].

Таблица 3.2

Общая характеристика доступных глобальных ЦМР и ЦМП

Набор данных	Горизонтальное разрешение, м	Абсолютная вертикальная точность, м	Метод получения
ЦМР низкого пространственного разрешения			
ГОТ030	1000	до 200	Интерполяция высот с топографических карт
ЕТОР02	1000 (суша), 2000 (батиметрия)	Нет данных	Объединение ЦМР GLOBE и данных батиметрии
GMTED2010	250–1000	50–60	Объединение данных SRTM и ЦМР низкого разрешения
GEBCO_Grid	450	Нет данных	Объединение данных батиметрии и глобальных ЦМР SRTM, GMTED-2010
ЦМР среднего пространственного разрешения			
SRTM C-Band	90	<=16	Радиолокационный
SRTM X-Band	30	<=16	Радиолокационный
ASTER GDEM	30	12-30	Фотограмметрический
ALOS WTD	30	От 5	Фотограмметрический
WorldDEM (версия ESRI)	24	4	Радиолокационный
NextMap World 10 и NextMap World 30	10 и 30 соответственно	От 8	Фотограмметрический
Arctic DEM	до 2	4	Фотограмметрический
Copernicus DEM GLO-30 и GLO-90	30 и 90 соответственно	4 (по величине LE90)	Радиолокационный
FABDEM	30	1.12–2.88 (средняя ошибка)	Радиолокационный

Глобальная ЦМР GMTED2010

GMTED2010 (Global Multi-Resolution Terrain Data 2010) – глобальные данные о рельефе, представленные в нескольких пространственных разрешениях: 30, 15 и 7,5 угловых секунд (приблизительно 1000, 500 и 250 метров) с зоной покрытия от 84° с.ш. до 56° ю.ш (рис. 3.6 – 3.7). Данная ЦМР разработана Геологической служ-

бой США (USGS) и Национальным агентством геопространственной разведки (NGA). GMTED2010 является заменой устаревшей ЦМР GTOPO30. Для создания GMTED2010 использовано несколько наборов данных из разных источников. Основным источником данных – это глобальная ЦМР SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), более подробно описанная ниже. Помимо SRTM, использовались канадская ЦМР CDED (Canadian Elevation Data), австралийская ЦМР GEODATA 9, данные спутниковой альтиметрии Антарктиды и Гренландии, американская ЦМР NED (National Elevation Dataset) и данные SPOT Reference3D (ЦМР высокого пространственного разрешения). ЦМР GMTED2010 доступна для загрузки через каталог USGS EarthExplorer.



Рис. 3.5. Глобальная ЦМР ETOPO2 с учетом высоты ледниковых щитов (в формате Ice Surface)

Глобальная ЦМР GEBCO 2023

GEBCO 2023 – наиболее современная ЦМР низкого пространственного разрешения, включающая всю поверхность суши и рельеф дна Мирового океана (опубликована в апреле 2023 г.). Разработана международной группой General Bathymetric Chart of the Oceans в рамках проекта The Nippon Foundation-GEBCO Seabed 2030. Источниками информации для создания ЦМР послужили данные SRTM – для суши между 54° ю.ш. и 60° с.ш., данные GMTED2010 – для северных и южных регионов, данные эхолотации и других источников измерения глубин – для моделирования рельефа дна океана. ЦМР имеет несколько версий: GEBCO 2019, GEBCO 2020, GEBCO 2021, GEBCO 2022. Начиная с версии от 2021 г., ЦМР GEBCO доступна в виде двух наборов данных. Первый содержит информацию о высоте поверхности суши и льда Гренландии и Антарктиды, второй – информацию о рельефе, находящемся подо льдом. Пространственное разрешение ЦМР GEBCO составляет 15", что соответствует 450 м. Размер раstra для всей покрываемой ЦМР территории 43200×86400 пикселей. Для

загрузки данные GEBCO всех версий, начиная с 2019 г., доступны на сервисе <https://download.gebco.net> (рис. 3.8). Загрузка возможна в виде произвольных фрагментов в форматах Geotiff и NetCDF. [The GEBCO_2023, 2023].

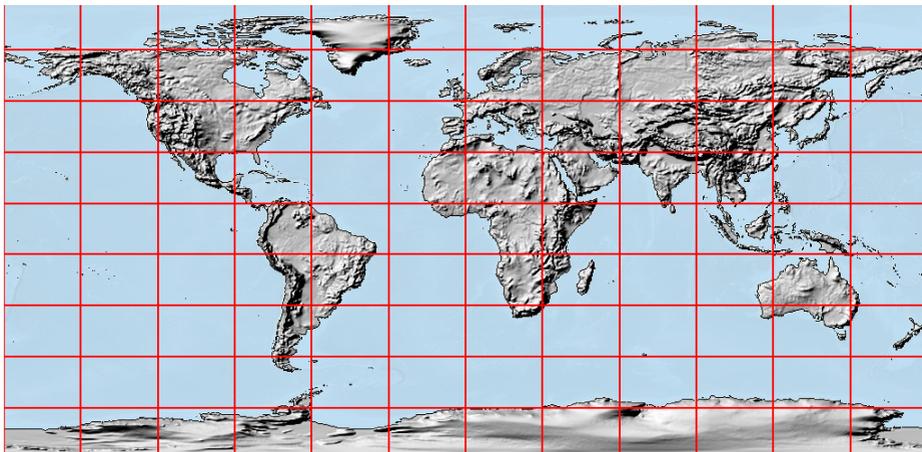


Рис. 3.6. Глобальная ЦМР GMTED2010 (общий вид)

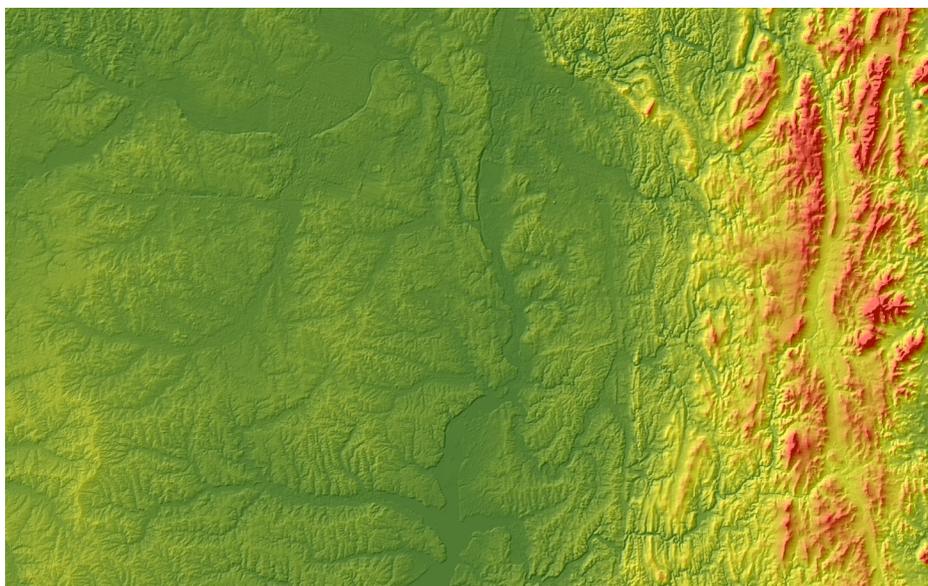


Рис. 3.7. Фрагмент глобальной ЦМР GMTED2010 на территорию Западного Урала

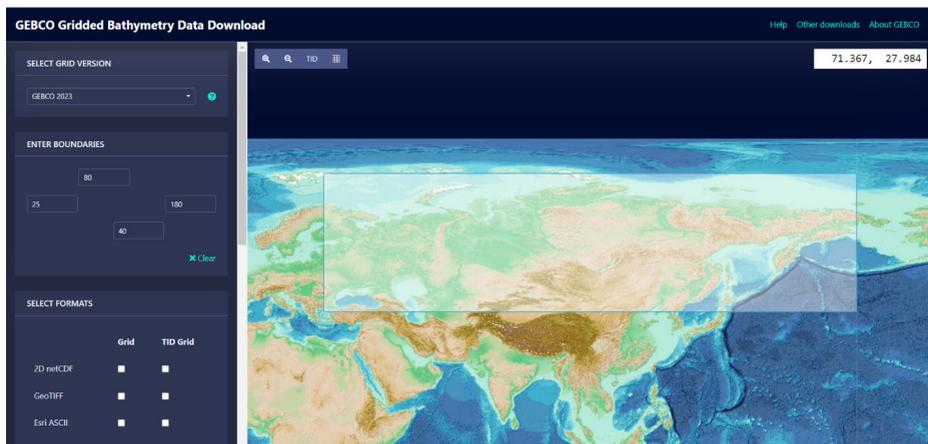


Рис. 3.8. Общий вид интерфейса сервиса для загрузки данных ЦМР GEBCO

Глобальные ЦМР SRTM C-band и SRTM X-band

Shuttle radar topographic mission (SRTM) - радарная топографическая съемка большей части суши Земли (рис. 3.9), за исключением самых северных (севернее 60° с.ш.) и самых южных широт (южнее 54° ю.ш.), произведенная за 11 дней в феврале 2000 г. с помощью специальной радарной системы, установленной на борту космического корабля многоразового использования шаттла «Индевор». Двумя радиолокационными сенсорами SIR-C и X-SAR было собрано более 12 Тб данных, которые были обработаны и выложены в свободный доступ с июля 2003 г.



Рис. 3.9. Территория покрытия данными SRTM C-band

По результатам съемки с сенсора SIR-C (SRTM C-band) была создана ЦМР, покрывающая почти 80% поверхности Земли. Данные SRTM C-band существуют в нескольких версиях: предварительной (unfinished, Level-1), окончательной (finished,

Level-2) и обработанной. Окончательная версия данных прошла дополнительную обработку, включающую выделение береговых линий и водных объектов, фильтрацию ошибочных значений. Обработанная версия, распространяемая группой международных организаций, занимающихся исследованиями в области продовольственной безопасности (CGIAR – Consultative Group for International Agricultural Research), включает сборку мозаик в более крупные фрагменты (6000x6000 пикселей или $5^{\circ} \times 5^{\circ}$) и исправление областей с отсутствующими значениями [SRTM 90m, 2023]. Пространственное разрешение данных составляет 3" (90 м на экваторе). Они поставляются в системе координат WGS84 (EPSG:4326) в виде 16-битных растров. Значение пикселей равно -32768 соответствует отсутствию данных (no data). Характеристики точности ЦМР SRTM C-band представлены в табл. 3.3.

В 2011 г. Немецким центром авиации и космонавтики (DLR) создана ЦМР SRTM X-band с размером ячейки 1" (30 м на экваторе). (рис. 3.10). Источником данных для ЦМР SRTM X-band выступили интерферометрические пары радиолокационных снимков, полученные в 2000 году сенсором X-SAR. Покрытие SRTM X-band охватывает территорию, расположенную между 60° с.ш. и 56° ю.ш. Данные SRTM X-band доступны для загрузки с 2011 года в разграфке $1 \times 1^{\circ}$ через каталог USGS Earth Explorer.

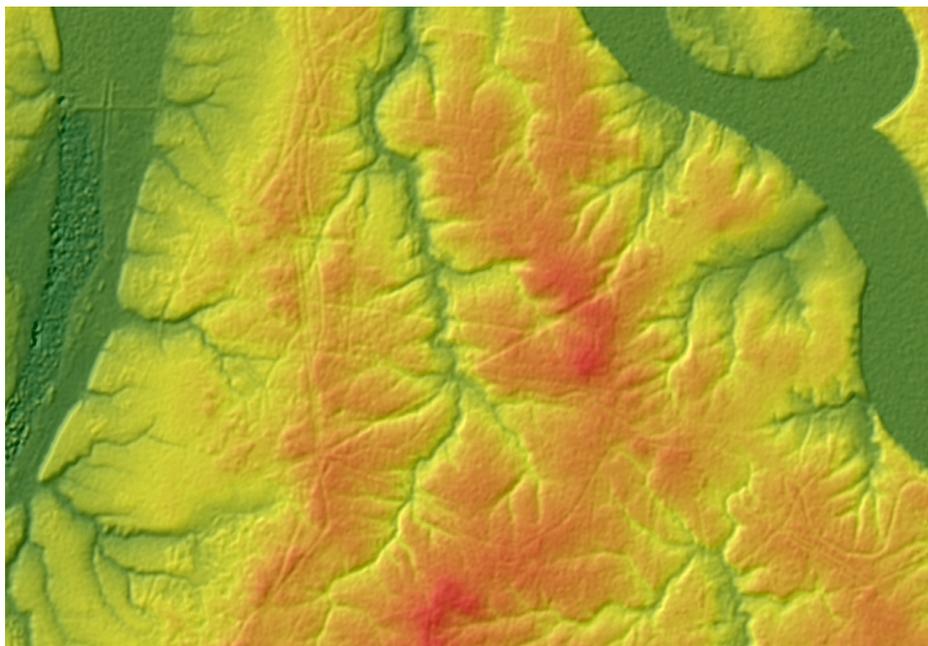


Рис. 3.10. Фрагмент данных ЦМР SRTM X-band на территорию восточной части г. Перми

Таблица 3.3

Точность ЦМР SRTM C-band и SRTM X-band [Дубинин, 2014]

	Африка	Австралия	Евразия	Острова	Северная Америка	Южная Америка
Абсолютная ошибка в плане, м	11,9	7,2	8,8	9,0	12,6	9,0
Абсолютная ошибка по высоте, м	5,6	6,0	6,2	8,0	9,0	6,2
Относительная ошибка по высоте, м	9,8	4,7	8,7	6,2	7,0	5,5
Относительная ошибка по высоте для данных X-band, м	3,1	6,0	2,6	3,7	4,0	4,9

Глобальная ЦМР ASTER GDEM

Продукт ASTER GDEM (Global Digital Elevation Model) был разработан в 2011 году совместно Министерством экономики, торговли и промышленности Японии (METI, Ministry of Economy, Trade, and Industry of Japan) и Национальным управлением по авионавигации и исследованию космического пространства США (NASA, National Aeronautics and Space Administration) на основе данных стереосъемки в ближнем инфракрасном диапазоне с разрешением 15 м., полученных с сенсора ASTER спутника Terra. Для создания ЦМР ASTER GDEM использовалась автоматическая обработка всего архива данных ASTER, включающего около 1,5 млн сцен. Область покрытия ЦМР охватывает 99% поверхности земного шара. Она включает территории, расположенные между 83° с.ш. и 83° ю.ш. и насчитывает 22 600 фрагментов размером 1°×1°. Таким образом, по площади покрытия ASTER GDEM значительно превосходит SRTM.

ASTER GDEM распространяется в формате GeoTIFF в системе координат WGS84 (EPSG:4326) с пространственным разрешением 1" (30 м на экваторе). Абсолютная точность ЦМР по высоте составляет 12–30 м, что значительно ниже, чем у SRTM (см. табл. 3.3). Несмотря на то, что пространственное разрешение ЦМР достигает 30 м, минимальный размер идентифицируемого элемента топографии составляет 100–120 м. В ячейках растра ЦМР используются специальные значения в данных: –9999 – для пробелов в данных, 0 – для воды. К специфическим особенностям продукта ASTER GDEM относятся артефакты и остаточные аномалии, которые имеют форму прямых линий, "ям", "бугров", "кратовин" и др. (рис. 3.11), а также отсутствие маски воды. Причиной их появления является наличие облачности на некоторых снимках,

использованных при создании ЦМР. С учетом этих артефактов и низкой точности по высоте, использование ЦМР ASTER GDEM в настоящее время не рекомендуется при наличии альтернативных источников данных аналогичной детальности.

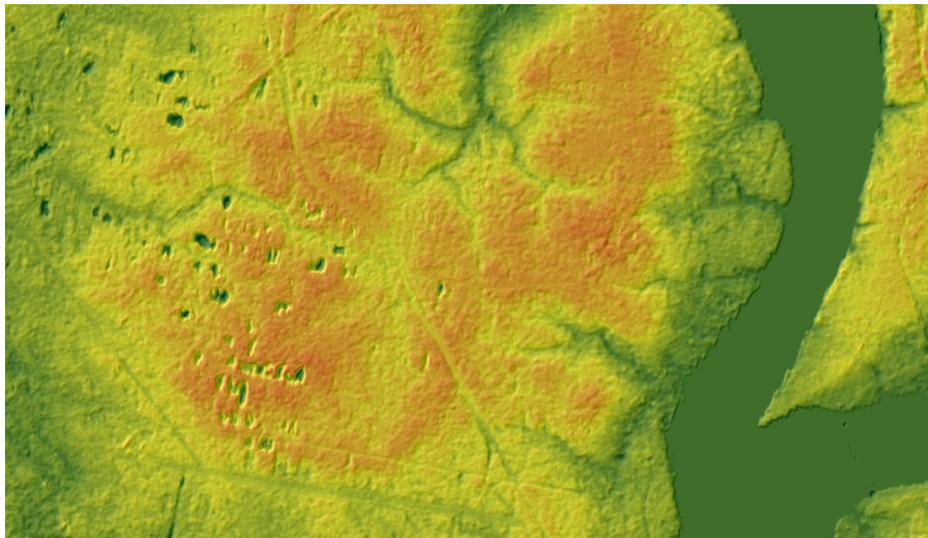


Рис. 3.11. Артефакты ЦМР ASTER GDEM (участок к северу от г. Перми)

В 2011 году была создана улучшенная версия ЦМР – ASTER GDEM Version 2. В ней были добавлены новые сцены и исправлены ошибки. Для замены некорректных данных использованы другие ЦМР: SRTM, NED (National Elevation Dataset; USGS), канадская ЦМР CDED, Alyaska DEM. Данные ASTER GDEM доступны на официальном сайте разработчика продукта [ASTER Global Digital Elevation Map, 2023].

Глобальная ЦМР ALOS Global Digital Surface Model

ALOS Global Digital Surface Model или ALOS World 3D 30m (AW3D30) – глобальная модель рельефа, созданная на основе обработки более 3 млн. сцен со спутника ALOS (сенсора PRISM) за 2006–2011 гг. Ее разработчиком является Японское аэрокосмическое агентство JAXA. Изначально на основе данных ALOS была разработана ЦМР высокого пространственного разрешения (5 м), которая распространялась на коммерческой основе и имела название Precise Global Digital 3D Map. Эта ЦМР была доступна в нескольких уровнях обработки: Level 1 DSM (Basic), Level 2 DSM (Standard) и Level 3 DTM. Данные первого уровня обработки представляют собой цифровую модель поверхности, построенную по сырым данным без исправления дефектов. Данные второго уровня обработки проходят проверку качества, при этом добавляются непокрытые участки и устраняются ошибки. Данные третьего уровня обработки представляют собой ЦМР с вычетом высот зданий и древесной растительности.

С 2015 г. загрубленная версия модели с пространственным разрешением 1" доступна бесплатно для загрузки в виде тайлов размером 1°×1° [AW3D30 DSM..., 2023] после предварительной регистрации пользователя. Точность данных по высоте составляет около 5 м, однако эта средняя оценка по всей площади суши не учитывает значительные погрешности в лесных зонах, обусловленные тем, что высоты лесного полога не отделены от высот рельефа (рис. 3.12). Таким образом, эти данные представляют собой ЦМП, а не ЦМР.



Рис. 3.12. Фрагмент общедоступной ЦМП ALOS AW3D30 на территорию г. Перми, на котором хорошо видны застройка и лесные насаждения

Глобальная ЦМР WorldDEM

Продукт WorldDEM – высокоточная глобальная ЦМР, которая до недавнего времени превосходила по качеству все глобальные ЦМР, полученные по данным ДЗЗ. ЦМР WorldDEM была создана в 2014–2015 гг. подразделением Airbus Defense and Space компании Airbus Group совместно с Немецким центром авиации и космонавтики (DLR) на основе данных радарной спутниковой съемки с аппаратов TanDEM-X и TerraSAR-X путем интерферометрической обработки. Для ее создания было использовано более 550 тыс. сцен, полученных в течение 3 лет, что обеспечило глобальную однородность данных. ЦМР покрывает всю поверхность суши (150 млн. кв. км) с размером ячейки 12×12 м, относительная точность данных по высоте составляет 2 м, абсолютная точность по высоте – 4 м.

WorldDEM распространяется на коммерческой основе, в качестве правоо-

бладателя выступает компания Airbus Defence and Space. Продукт WorldDEM доступен в трех вариантах, подразумевающих разный уровень обработки данных: WorldDEMcore, WorldDEM™ и WorldDEM DTM.

- WorldDEM Core – необработанная ЦМП, на которой могут быть видны дефекты, присущие радарной съемке, и пропуски информации.
- WorldDEM™ – обработанная ЦМП с добавлением гидрографии: речные долины, реки, береговая линия.
- WorldDEM DTM – ЦМП с исключением объектов растительного покрова и антропогенных объектов.

В 2017 г. данные WorldDEM были приобретены компанией ESRI (разработчик программного обеспечения ArcGIS). В них были отфильтрованы здания, а пространственное разрешение приведено к 24 м (рис. 3.13 – 3.14). Полученная модель была опубликована в проекте ESRI World Living Atlas в виде сервиса изображений WorldElevation\Terrain. Также в этом сервисе доступен ряд других ЦМП: GMTED-2010, SRTM, NED и др. Данные WorldDEM от ESRI доступны для владельцев лицензий ArcGIS через подключение нового сервиса в облачной ГИС ArcGIS Online. Сервис, созданный на базе программного обеспечения ArcGIS, можно подключить с использованием URL-адреса <https://elevation.arcgis.com/arcgis/rest/services> [Нагорнюк, 2018].

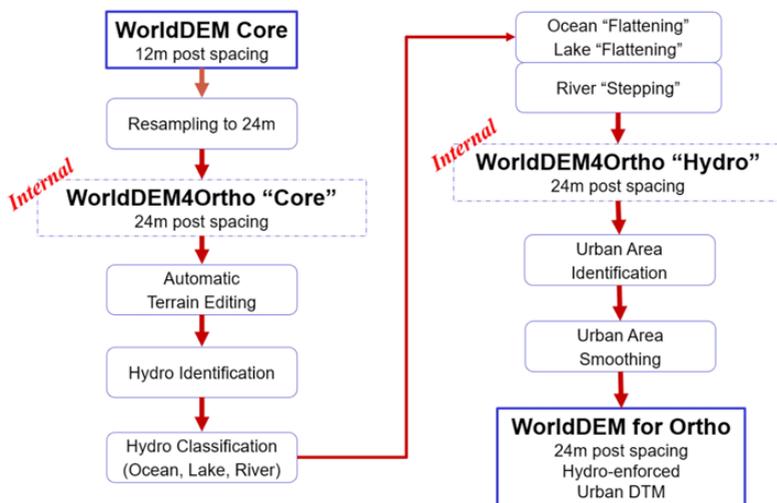


Рис. 3.13. Схема алгоритма обработки ЦМП WorldDEM для проекта ESRI World Living Atlas [Нагорнюк, 2018]



Рис. 3.14. Фрагмент ЦМП WorldDEM от ESRI на территорию г. Перми (с исключением застройки, но без исключения древесных насаждений)

Глобальные ЦМП NextMap World 10 и NextMap World 30

Глобальные ЦМП NextMap World 10 и NextMap World 30 созданы путем интеграции данных лазерного сканирования со спутника ICESat и нескольких глобальных ЦМП (SRTM, ASTER GDEM2, GTOPO30). Продукт NextMap World 30 был разработан в 2012 г., а NextMap World 10 – в 2015 г. Данные покрывают всю поверхность суши с пространственным разрешением 10 м (0,4") для NextMap World 10 и 30 м (1") – для NextMap World 30. Абсолютная точность данных по высоте для обеих ЦМП составляет от 8 м. в зависимости от источника данных и территории. Данные поставляются на коммерческой основе в системе координат WGS84 (EPSG:4326) в виде 32-битных растров. Правообладателем продуктов NextMap World 10 и NextMap World 30 является компания InterMap (США). В настоящее время эти данные не пользуются спросом, поскольку точность некоторых общедоступных ЦМП уже достигает 4 м.

Глобальная ЦМП SPOT DEM (Reference 3D)

SPOT DEM – глобальная ЦМП высокого разрешения, которая создавалась на базе стереопар оптических снимков SPOT5 HRS с пространственным разрешением 5 м. Пространственное разрешение самой ЦМП составляет 1", площадь покрытия по состоянию на 2014 г. – 80 млн. кв. км. Абсолютная точность по высоте колеблется от 10 до 30 м. в зависимости от уклона рельефа. ЦМП распространяется на коммер-

ческой основе в виде 16-битных растров. Таким образом, данная ЦМР хотя и распространялась на коммерческой основе, но имела пространственное разрешение и точность хуже, чем у некоторых бесплатных аналогов, а также не обеспечивала глобального покрытия данными по причине низкой производительности съемки со спутника SPOT-5 [SPOT DEM, 2004].

Глобальные ЦМР Copernicus DEM и FABDEM

Copernicus DEM, как и ранее опубликованная WorldDEM, была создана на основе данных спутниковой радиолокационной миссии TanDEM-X, которая действовала на орбите с 2011 по 2015 гг. Однако ее отличием от WorldDEM является свободный (бесплатный) доступ к данным, что характерно и для всех остальных проектов Copernicus. Однако Copernicus DEM представляет собой ЦМП, а не ЦМР (поверхность включает высоты зданий и растительности). Модель распространяется в виде трех продуктов: EEA-10, GLO-30 и GLO-90, с размером пикселя 10, 30 и 90 м соответственно. При этом данные EEA-10 доступны только на территорию стран Европы (не включая ЕТР), а GLO-30 и GLO-90 – для всего мира. Высотная точность данных оценивается в 4 м по величине линейной ошибки CE90 (т.е. из 100 точек 90 будут иметь ошибку в пределах 4 м). Это значительно лучше, чем у всех ранее опубликованных глобальных ЦМР. Детальное описание продукта доступно в Руководстве пользователя [Copernicus DEM, 2022].

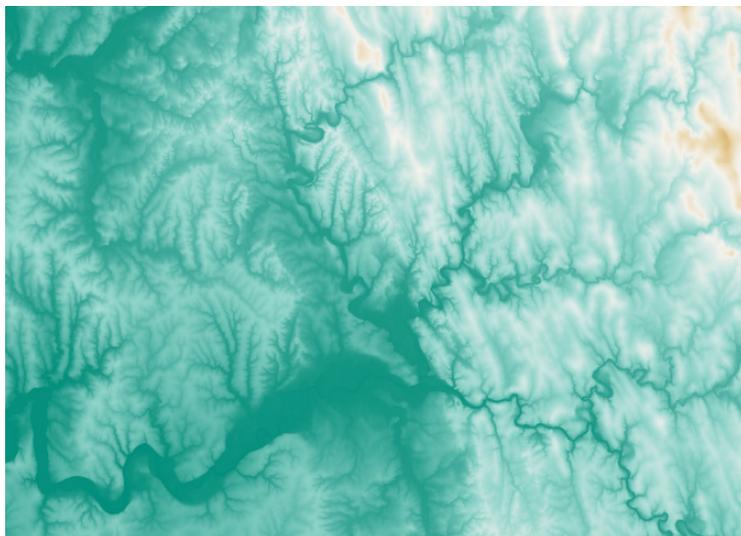


Рис. 3.15. Фрагмент ЦМР FABDEM

FABDEM – глобальная ЦМР (рис. 3.15), созданная на основе продукта Copernicus GLO 30 (DEM), из которой удалены артефакты зданий и растительности. Набор дан-

ных FABDEM для некоммерческого использования находится в открытом доступе на сайте Бристольского университета [FABDEM..., 2023]. В настоящее время доступны уже три версии продукта (v. 1.0, 1.1 и 1.2), последняя из которых опубликована в январе 2023 г. ЦМР доступна для загрузки на большей части земного шара, за исключением территорий южнее 60° ю.ш. и севернее 80° с.ш. Данные могут быть загружены как одним файлом, так и по ячейкам сетки размером 10×10°. Шаг сетки FABDEM равен 1", что соответствует пространственному разрешению в 30 м в районе экватора [Hawker et al, 2022]. Высотная точность оценивается в 1.12–2.88 м (по величине средней ошибки) и до 5 м для лесопокрываемых территорий, что значительно точнее, чем для всех других общедоступных ЦМР. Однако даже такая точность недостаточна для решения ряда прикладных задач, таких как расчет зон затопления. Для этого используются другие методы создания локальных высокоточных ЦМР - наземная топографическая съемка, съемка с БПЛА или ВЛС.

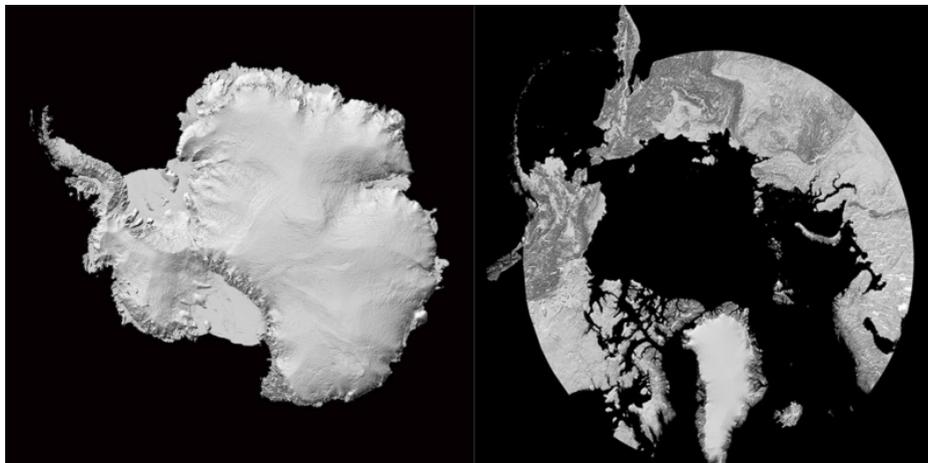


Рис. 3.16. Общий вид ЦМР Arctic DEM (справа) и Antarctic DEM (слева)

ЦМР для полярных регионов Arctic DEM и Antarctic DEM

Arctic DEM и Antarctic DEM – это ЦМР (рис. 3.16), созданные в 2016–2018 гг. на основе данных стереосъемки со спутников DigitalGlobe (WorldView-1,2,3) для полярных территорий, расположенных севернее 60° с.ш. и южнее 60° ю.ш.. Пространственное разрешение Arctic DEM составляет 2 м, Antarctic DEM – 8 м. Модели покрывают площадь в 20 млн. кв. км. (рис. 3.17). Абсолютная точность ЦМР без наземных опорных точек составляет около 4 м в горизонтальной и вертикальной плоскостях. На данный момент Arctic DEM и Antarctic DEM являются самыми детальными ЦМР, имеющимися в открытом доступе. Модели разработаны Полярным геопространственным центром университета Миннесоты (Polar Geospatial Center). ЦМР Arctic DEM и Antarctic

DEM созданы с помощью фотограмметрической технологии. Основным целевым назначением данных ЦМР является оценка изменения высоты ледниковых щитов.

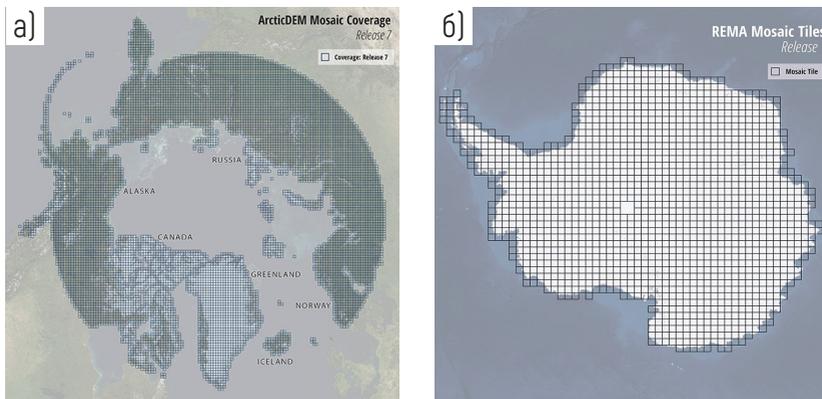


Рис. 3.17. Область покрытия ЦМР Arctic DEM (а) и Antarctic DEM (б)

Данные ЦМР Arctic DEM и Antarctic DEM являются открытыми, для получения доступа к ним есть несколько способов. Первый способ – загрузка оригинальных растров из официального репозитория <http://data.pgc.umn.edu/elev/dem/setsm/ArcticDEM/mosaic/v3.0/2m/>. Для загрузки нужной территории необходимо определить индекс нужного квадрата по соответствующей индексной схеме.

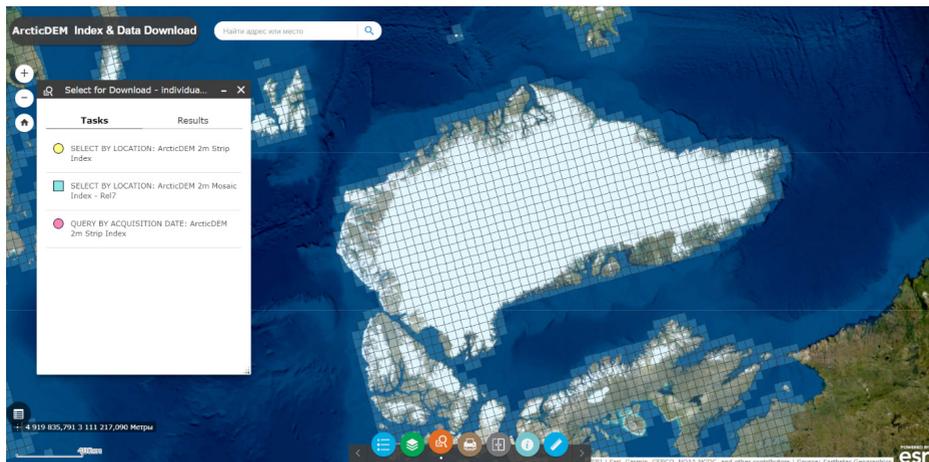


Рис. 3.18. Общий вид веб-приложения ESRI NGA ArcticDEM Web Map

Второй, более удобный, вариант – загрузить необходимый сегмент покрытия через специальное веб-приложение от компании ESRI NGA ArcticDEM Web Map и

NGA REMA Web App (рис.3.18). В этих приложениях на интерактивной карте нанесена индексная сетка покрытия ЦМР, можно выбрать на карте необходимые области и загрузить для них растры ЦМР.

Третий способ доступа – через приложение Living Atlas (<https://livingatlas.arcgis.com/>) в ArcGIS Online (рис. 3.19). На каждый из полюсов в приложении доступны по 22 веб-карты на основе ЦМР Arctic DEM. Часть этих карт может быть использована для непосредственных расчетов, но большинство из них – рендеринги, оптимизированные именно для визуализации и использования в качестве карт-подложек.

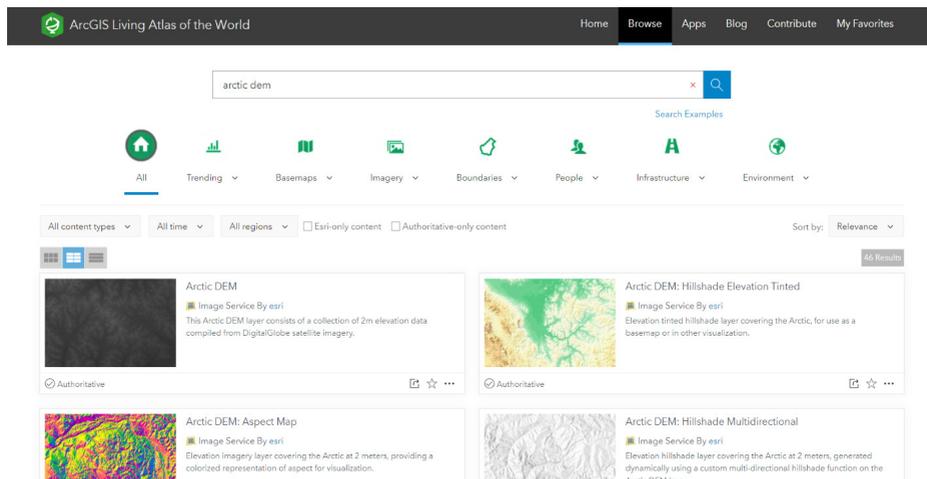


Рис. 3.19. Общий вид Living Atlas с продуктами Arctic DEM

Еще один способ работы с данными полярных ЦМР – через веб-приложения (рис. 3.20) Antarctic REMA Explorer (<https://livingatlas2.arcgis.com/antarcticdemexplorer/>) и Arctic DEM Explorer (<https://livingatlas2.arcgis.com/arcticdemexplorer/>) от компании ESRI. Они имеют специализированные функции для изучения ледников – построение профилей (рис. 3.21) и поддержка разновременных данных, т.е. когда существует несколько разновременных ЦМР. На их основе можно определить разность высот, обусловленную таянием или приростом толщины льда [Панченко, 2019].

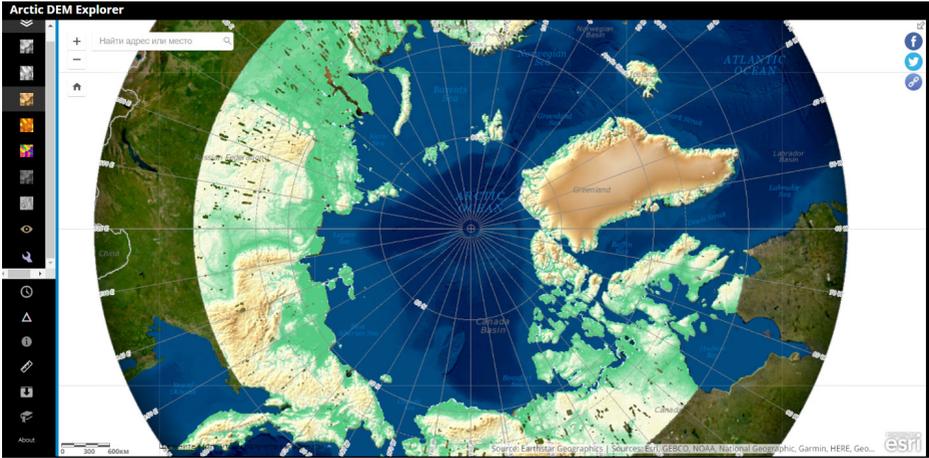


Рис. 3.20. Общий вид приложения ArcticDEM Explorer

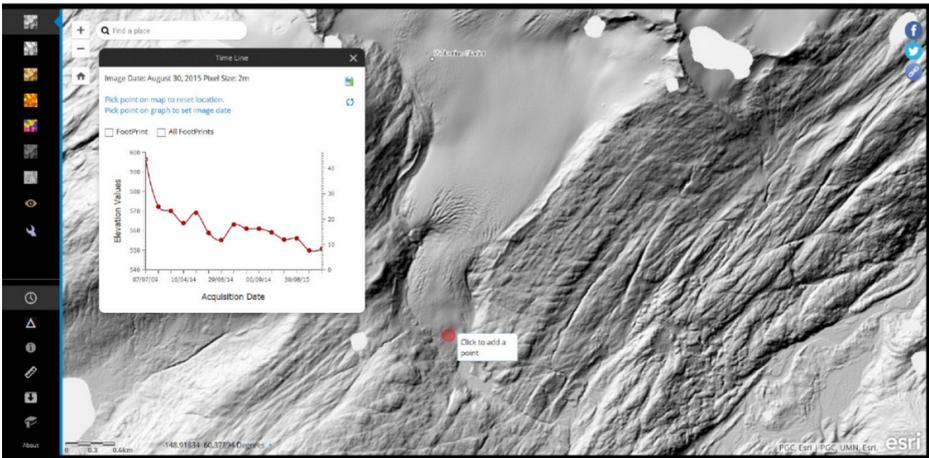


Рис. 3.21. Визуализация фрагмента данных Arctic DEM в приложении ArcticDEM Explorer

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современный мировой фонд космических снимков непрерывно актуализируется и пополняется новыми источниками данных, причем этот процесс происходит с возрастающей скоростью. Повышается пространственное разрешение спутниковых снимков, частота их получения, расширяется спектр областей применения и технические возможности анализа (последнее происходит благодаря широкому внедрению технологий искусственного интеллекта), появляются новые продукты тематической обработки снимков, многие из которых опубликованы в открытом доступе. В таких условиях сложно рассчитывать на то, что учебное пособие по данной тематике будет сохранять актуальность в течение длительного времени. Однако систематизированная информация о текущем состоянии мирового фонда снимков и общедоступных продуктах их обработки в любом случае может быть полезна для широкого круга пользователей. Она позволяет обоснованно подойти к выбору источников данных для решения той или иной задачи (в том числе сократить временные затраты, используя готовые тематические продукты вместо «сырых» данных) и получить представление о результатах исследований ведущих мировых научных центров в области обработки и анализа спутниковых данных. Исходя из этого, авторы рассчитывают, что настоящее учебное пособие будет представлять интерес для широкого круга специалистов, использующих данные космической съемки и тематические продукты их обработки для решения научных и практических задач спутникового мониторинга и картографирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеева А.А., Бухаров М.В., Лосев В.М., Соловьев В.И. Диагноз осадков и гроздо измерениям уходящего теплового излучения облачности с геостационарных спутников // Метеорология и гидрология, 2006. № 8. С. 33–42.
2. Балдина Е.А., Лабутина И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков: учебник, [электронное издание сетевого распространения]. 2-е изд., переработанное и дополненное. М.: «КДУ», «Добросвет», 2021. – 269 с. doi: 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1163-4-2021-269.
3. Барталев С.А. и др. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М., ИКИ РАН. 2016. 208 с.
4. Барталев С.А., Белвард А.С., Ершов Д.В., Исаев А.С. Карта наземных экосистем Северной Евразии по данным SPOT-Vegetation. Проект Global Land Cover 2000. Информационная система TerraNorte. Институт космических исследований РАН, 2004. (<http://terranorte.iki.rssi.ru>).
5. BEGA-Science – уникальный инструмент научного анализа данных спутниковых наблюдений. Электронный ресурс: <http://sci-vega.ru/> [дата обращения 30.10.2023].
6. Вичугова А. Почему вам нужны данные как сервис или что такое DaaS. Электронный ресурс: <https://bigdataschool.ru/blog/what-is-daas.html?ysclid=loa6ffv1v5993368242> [дата обращения 30.10.2023].
7. Геоаналитика.Агро. Электронный ресурс: <https://sovzond.ru/products/online-services/geoanalitika-agro/> [дата обращения 30.10.2023].
8. Геоинформатика. Толковый словарь основных терминов /под ред. А.М. Берлянта, А.В. Кошкарева. М., ГИС-Ассоциация, 1999. 204 с.
9. ГОСТ Р 59082 – 2020. Данные дистанционного зондирования Земли из Космоса. Продукты обработки данных дистанционного зондирования Земли из Космоса тематические. М., Стандартинформ, 2020. 11 с.
10. Дубинин М. Глобальная цифровая модель рельефа ETOPO2. Электронный ресурс: <https://gis-lab.info/qa/etopo2.html> [дата публикации 04.03.2005, дата обращения 30.10.2023]
11. Дубинин М. Описание и получение данных SRTM. Электронный ресурс: <https://gis-lab.info/qa/srtm.html> [дата публикации 04.06.2014, дата обращения 30.10.2023]
12. Егоров В.А., Барталев С.А., Колбудаев П.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А. Карта растительного покрова России, полученная по данным спутниковой системы Proba-V // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. №2. С. 282–286.
13. Занин К. А., Клименко Н. Н., Москатынъев И. В. Космическая система ради-

олокационного наблюдения Capella 36. Часть 1 // Воздушно-космическая сфера. 2022. № 1. С. 48-57. Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства. Блок мониторинга пожарной опасности. Электронный ресурс: <https://public.aviales.ru> (дата обращения 30.10.2023)

14. Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства. Блок мониторинга пожарной опасности. Электронный ресурс: <https://public.aviales.ru> (дата обращения: 30.10.2023).

15. Карта пожаров PRO: Продвинутая платформа для оперативного спутникового мониторинга пожаров. Электронный ресурс: <http://pro.fires.ru/> (дата обращения 30.10.2023)

16. Картографирование нефтяных разливов с помощью спутниковых снимков. Электронный ресурс: https://gisproxima.ru/kartografirovanie_neftyanyh_razlivov (дата публикации 27.10.2022, дата обращения 30.10.2023)

17. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований: учебник. М., Издательский центр «Академия», 2011. 416 с.

18. КосмосАгро. Электронный ресурс: <https://www.scanex.ru/cloud/kosmosagro/> (дата обращения 30.10.2023)

19. Лупян Е.А. и др. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175.

20. Межуниверситетский аэрокосмический центр МГУ. Космические исследования океана Электронный ресурс: http://www.geogr.msu.ru/science/aero/center/int_sem7/Color_phyt.htm (дата обращения 30.10.2023)

21. Нагорнюк К. Загрузка и использование цифровой модели рельефа Airbus WorldDEM4Ortho. Электронный ресурс: https://blogs.esri-cis.com/2018/05/30/worlddem_for_ortho_airbus_for_esri_using/ (дата публикации 30.05.2018, дата обращения 30.10.2023).

22. Панченко Е. Сверхдетальные модели рельефа на полярные области Земли: выжимаем сок из уникальных данных. Электронный ресурс: <https://blogs.esri-cis.com/2019/02/26/arctic-antarctic-dem/> (дата публикации 26.02.2019, дата обращения 30.10.2023).

23. Ракурс: Программные решения в области геоинформатики, цифровой фотограмметрии и дистанционного зондирования. Электронный ресурс: <https://rascurs.ru/insite/8668/> (дата публикации 15.07.2022, дата обращения 30.10.2023).

24. Стратегия закупки спутниковых данных Национальным управлением военно-космической разведки США обусловлена процветанием коммерческого рынка // Дистанционное зондирование Земли из космоса. Сборник информационных

материалов [информационный дайджест]. 2021. № 78 [19]. Электронный ресурс: <https://www.roscosmos.ru/media/files/2022/Dec/19..78..10.21.pdf> (дата обращения 30.10.2023).

25. TerraTech Российские Космические Системы. Электронный ресурс: <https://terratech.ru/> (дата обращения 30.10.2023).

26. ФГБУ ИЦ космической гидрометеорологии «Планета». Сибирский центр. Оперативная информация Электронный ресурс: https://rcpod.ru/operativnaya-informatsiya/?SECTION_ID=10 (дата обращения 30.10.2023).

27. Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Калинин Н.А., Пьянков С.В. Ветровалы в лесной зоне России и условия их возникновения. Пермь, Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2023. 284 с.

28. Шихов А.Н., Герасимов А.П. Пономарчук А.И., Перминова Е.С. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения: учебное пособие / ПГНИУ. Пермь, 2020. 49,6 Мб; 191 с., ил. Режим доступа: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifirovanie-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf>

29. Яковченко С.Г., Жоров В.А., Постнова И.С. Создание и использование цифровых моделей рельефа в гидрологических и геоморфологических исследованиях Рос. акад. наук. Сиб. отд-ние, Ин-т вод. и экол. пробл. Кемерово: ИУУ, 2004. 89 с.

30. Alaska Satellite Facility. Электронный ресурс: <https://asf.alaska.edu/> (дата обращения 30.10.2023).

31. Alexander S.S., Dein J., Gold D.R. The use of ERTs-1 MSS data for mapping strip mines and acid mine drainage in Penn-sylvania. Proc. Symp on Significant Results Obtained from the Earth Resources Technology Satellite 1. NASA, Washington, 1973. P. 569–575.

32. Arino O. et al. GlobCover: the most detailed portrait of Earth // European Space Agency Bull. 2008. V. 136. P. 24–31.

33. ASTER Global Digital Elevation Map Announcement. Электронный ресурс: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp> (дата обращения 30.10.2023).

34. AW3D30 DSM data map. Электронный ресурс: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm> (дата обращения 30.10.2023).

35. Chen J., Cao X., Peng S., Ren H. Analysis and Applications of GlobeLand30: A Review // ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2017. V. 6. Art. No. 230.

36. Chernokulsky A., Shikhov A., Yarinich Yu., Sprygin A. An Empirical Relationship among Characteristics of Severe Convective Storms, Their Cloud-Top Properties and Environmental Parameters in Northern Eurasia // Atmosphere, 2023. V. 14(1). Art. No. 174.

37. Copernicus DEM. Copernicus Digital Elevation Model Product Handbook. Электронный ресурс: <https://spacedata.copernicus.eu/collections/copernicus-digital->

elevation-model (дата обращения 30.10.2023).

38. Copernicus Open Access Hub. Электронный ресурс: <https://scihub.copernicus.eu> (дата обращения 30.10.2023).

39. Curtis P.G., Slay C.M., Harris N.L., Tyukavina A., Hansen M.C. Classifying drivers of global forest loss // *Science*. 2018. V. 361(6407). P. 1108–1111.

40. EO Browser. Электронный ресурс: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/> (дата обращения 30.10.2023).

41. EOS LandViewer. Электронный ресурс: <https://eos.com/landviewer> (дата обращения 30.10.2023).

42. ESA WorldCover Products. Электронный ресурс: <https://esa-worldcover.org/en/data-access> (дата обращения 30.10.2023).

43. Eumetsat Earth Observation Portal. Электронный ресурс: <https://archive.eumetsat.int/> (дата обращения 30.10.2023).

44. FABDEM V1-0. Электронный ресурс: <https://data.bris.ac.uk/data/dataset/25wfy0f9ukoge2gs7a5mqrq2j7> (дата обращения 30.10.2023).

45. Fekete A. CORONA High-Resolution Satellite and Aerial Imagery for Change Detection Assessment of Natural Hazard Risk and Urban Growth in El Alto/La Paz in Bolivia, Santiago de Chile, Yungay in Peru, Qazvin in Iran, and Mount St. Helens in the USA // *Remote Sensing*. 2020. V. 12(19). Art. No. 3246.

46. FengYun Satellite Data Center. Электронный ресурс: <http://satellite.nsmc.org.cn/portalsite/default.aspx> (дата обращения 30.10.2023).

47. Fire Information for Resource Management System. Электронный ресурс: https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/active_fire/ (дата обращения 30.10.2023).

48. GHG Monitoring from Space: A mapping of capabilities across public, private, and hybrid satellite missions. Joint report by the Group on Earth Observations (GEO), Climate TRACE and the World Geospatial Industry Council (WGIC). URL: https://earthobservations.org/documents/articles_ext/GHG%20Monitoring%20from%20Space_report%20final_Nov2021.pdf

49. Giglio L., Schroeder W., Justice C.O. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // *Rem. Sens. Environ.* 2016. V. 178. P. 31–41.

50. Gorelick N. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // *Remote Sensing of Environment*, 2017, V. 202. P. 18–27.

51. Hansen M.C. et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // *Science*. 2013. V. 342. P. 850–853.

52. Hawker L. et al. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // *Environ. Res. Letters*, 2022. V. 17. Art. No. 024016.

53. Krylov A. et al. Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002 – 2011 // *Environ. Res. Letters*. 2014. V. 9(10). Art. no 105007.

54. Land Processes Distributed Active Archive Center. Электронный ресурс:

<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/> [дата обращения 30.10.2023].

55. Level-1 and Atmosphere Archive and Distribution System. Электронный ресурс: <https://lpaac.usgs.gov/> [дата обращения 30.10.2023].

56. Meteorological Satellite Center of JMA. Электронный ресурс: https://www.data.jma.go.jp/mscweb/en/himawari89/cloud_service/cloud_service.html [дата обращения 30.10.2023].

57. Natural Resources Canada. Электронный ресурс: <https://www.eodms-sgdot.nrcan-rncan.gc.ca/index-en.html> [дата обращения 30.10.2023].

58. NOAA National Center for Environmental Information. Электронный ресурс: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/ETOPO2/> [дата обращения 30.10.2023].

59. OneSoil. Электронный ресурс: <https://onesoil.ai/ru/about> [дата обращения 30.10.2023].

60. Pekel J.F. et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // *Nature*. 2016. V. 540. P. 418–422.

61. Pickens A.H. et al. Mapping and sampling to characterize global inland water dynamics from 1999 to 2018 with full Landsat time-series. *Remote Sensing of Environment*. 2020. V. 243, Art. No. 111792.

62. Planet Explorer. Электронный ресурс: <https://planet.com/explorer> [дата обращения: 30.10.2023].

63. Potapov P. et al. The last frontiers of wilderness: Tracking loss of intact forest landscapes from 2000 to 2013 // *Sci. Advances*. 2017. V. 3(1), Art. No. e1600821

64. Potapov P.V. et al. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive // *Rem. Sens. Environ*. 2015. V. 159. P. 28–43.

65. Potapov P. et al. Mapping and monitoring global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data // *Rem. Sens. Environ*. 2020. Art. No. 112165.

66. Potapov P. et al. Global maps of cropland extent and change show accelerated cropland expansion in the twenty-first century // *Nature Food*. 2022a. V. 3. P. 19–28.

67. Potapov P. et al. The global 2000–2020 land cover and land use change dataset derived from the Landsat archive: first results // *Frontiers in Remote Sensing*. 2022b. V. 3. DOI: 10.3389/frsen.2022.856903.

68. Santoro M. GlobBiomass - global datasets of forest biomass. PANGAEA, 2018. Электронный ресурс: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.894711> [дата обращения 30.10.2023].

69. Santoro M. et al. The global forest above-ground biomass pool for 2010 estimated from high-resolution satellite observations // *Earth Syst. Sci. Data*, 2021. V. 13. P. 3927–3950.

70. Sayn-Wittgenstein, L., Wightman, J.M. Landsat application in Canadian forestry. In: *Proceeding of the 10th Int Symp on Remote Sensing of Environment*. 1975. V. 2. P. 1209–1218.

71. SPOT DEM Product Description. Электронный ресурс: https://legacy.satimagingcorp.com/media/pdf/SPOT_DEM_Product_Description_v1-1.pdf (дата обращения 30.10.2023).

72. SRTM 90m Digital Elevation Database v4.1. Электронный ресурс: <https://cgiaarsi.community/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1/> (дата обращения 30.10.2023).

73. The GEBCO 2023 Grid. Электронный ресурс: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/gebco_2023/ (дата обращения 30.10.2023).

74. Tyukavina A. et al. Global trends of forest loss due to fire, 2001-2019 // *Frontiers in Remote Sensing*. 2022. V. 3. DOI: 10.3389/frsen.2022.825190

75. USGS EarthExplorer. Электронный ресурс: <http://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 30.10.2023).

76. USGS EROS Archive. Digital Elevation. Global 30 Arc-Second Elevation (GTOPO30) – Электронный ресурс: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-global-30-arc-second-elevation-gtopo30> (дата обращения 30.10.2023).

77. Winkler K., Fuchs R., Rounsevell M., Herold, M. Global land use changes are four times greater than previously estimated // *Nature Communications* 2021. V. 12(2501), <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22702-2>

78. Ying Q. et al. Global bare ground gain from 2000 to 2012 using Landsat imagery // *Rem. Sens. Environ.* 2017. V. 194. P. 161–176.

79. Zanaga D. et al., 2022. ESA WorldCover 10 m 2021 v200. DOI: 10.5281/zenodo.7254221.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Основные источники открытых данных ДЗЗ из Космоса, общедоступных тематических продуктов и цифровых моделей рельефа

Приложение 1

Основные источники открытых данных ДЗЗ из Космоса

Название спутника / сенсора, период доступности	Пространственное разрешение, м	Число каналов и спектральные диапазоны, мкм	Временное разрешение	Ссылка на источник для загрузки данных
Данные геостационарных метеорологических спутников				
Meteosat/SEVIRI с 2006 г.	1000-3000	12 (0,56 – 14,4 мкм)	15 мин	https://archive.eumestat.int/ (загрузка), https://kachelmannwetter.com/de/sat (просмотр)
Himawari-8/AHI с 2015 г.	500-2000	16 (0,47 – 13,31 мкм)	10 мин	https://www.data.jma.go.jp/mscweb/en/himawari89/cloud_service/cloud_service.html
Данные полярно-орбитальных метеорологических спутников				
NOAA (6-19 и MetOp A-C/ AVHRR с 1981 по 2020 г.	1100	6 (0,63 – 12,00 мкм)	5–10 раз в сутки	https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search (NOAA) https://tpm-ds.eo.esa.int/socat/AVHRR_L1B_1_1KM (NOAA и MetOp)
FengYun 1-4 (MVISR, VISSR, SEM, PMR, MWRI и др.) с 2005 г.	500-7000	Разное	От 10 мин	http://satellite.nsmc.org.cn/portalsite/Data/Satellite.aspx?currentculture=en-US

Приложение 1 (продолжение)

Название спутника /сенсора, период доступности	Пространственное разрешение, м	Число каналов и спектральные диапазоны, мкм	Временное разрешение	Ссылка на источник для загрузки данных
Спутниковые данные мониторинга парниковых газов в атмосфере				
Sentinel-5P/ TROPOMI с 2018 г.	7000	7 (0,27 – 2,385)	Ежедневно	https://apps. sentinel-hub.com/ eo-browser
OCO-2, OCO-3 с 2014 г.	2250×1290	0,765 – 2,06	16 сут	https://disc. gsfc.nasa. gov/datasets? keywords=oco2
GOSAT, GOSAT-2 (TANSO-FTS) с 2009 г.	460, 920	1,8; 4,8 – 5,2; 5,8 – 6,4; 12,9 – 13,2	Ежедневно	https://earth.jaxa. jp/en/data/2508/ index.html
SUOMI NPP/CrIS с 2013 г.	14000	3,9 – 15,41	Ежедневно	https://disc. gsfc.nasa. gov/datasets/ SNPPCrISLIB_2/ summary
Данные природно-ресурсных спутников в оптическом и тепловом диапазонах спектра				
Landsat 8-9 OLI/ TIRS с 2013 г.	15, 30, 100	11 (0,433 – 12,51)	Раз в 8 дней	https:// earthexplorer. usgs.gov/ (пол- ный архив),
Landsat-7 ETM+ с 1999 г.	15, 30, 60	8 (0,45 – 12,51)	Раз в 16 дней	https://eos.com/ landviewer (с 1984 г.)
Landsat-4/5 TM 1984-2011 гг.	30, 120	7 (0,45 – 12,5)	Раз в 16 дней	https://apps. sentinel-hub.com/ eo-browser (с 1984 г.)
Landsat-1/5 MSS 1973-2011 гг.	80	4 (0,5 – 1,1)	Раз в 16 дней	
Sentinel-2 (A/B) MSI с 2016 г.	10, 20, 60	13 (0,443 – 2,190)	Раз в 5 дней	https://dataspace. copernicus.eu/ https://eos.com/ landviewer https://apps. sentinel-hub.com/ eo-browser

Приложение 1 (окончание)

Название спутника /сенсора, период доступности	Пространственное разрешение, м	Число каналов и спектральные диапазоны, мкм	Временное разрешение	Ссылка на источник для загрузки данных
Данные природно-ресурсных спутников в оптическом и тепловом диапазонах спектра				
Terra ASTER с 2000 г.	15, 30, 90	14 (0.52 – 11,65)	Раз в 26 дней	https://search.earthdata.nasa.gov/search
Спутниковые снимки в радиолокационном диапазоне спектра				
Sentinel-1 (C-SAR) с 2014 г.	5, 20, 40	C-band 3,75 – 7,5 см	Каждые 5 дней	https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/sentinel-1/sentinel-1-data-and-imagery/ , https://dataspace.copernicus.eu/
RADARSAT Constellation Mission, с 2019 г.	5-50	C-band 3,75 – 7.5 см	Каждые 4 дня	https://www.eodms-sgdot.nrcan-rncan.gc.ca/index-en.html

Общедоступные тематические продукты, созданные по данным ДЗЗ из Космоса

Название продукта	Исходные данные и разработчик	Пространственное разрешение (м) и формат	Актуальность и частота обновления	Ссылка на загрузку данных
Характеристики облачности				
MOD06: Cloud Properties	Terra/Aqua (MODIS), NASA	1000, 5000 HDF	Ежедневно	https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov
MOD35: Cloud Mask	Terra/Aqua (MODIS), Suomi NPP, NOAA-20 (VIIRS), NASA	1000 HDF	Ежедневно	https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov
CLDMSK_L2_VIIRS_SNPP		750 HDF	Ежедневно	https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov
Атмосферные аэрозоли				
MOD04	Terra/Aqua (MODIS), Suomi NPP, NOAA-20 (VIIRS), NASA	1000 HDF	Ежедневно	https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov
VNP04		750 HDF	Ежедневно	https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov
Радиояркая температура поверхности				
MOD11	Terra/Aqua (MODIS), Suomi NPP, NOAA-20 (VIIRS), NASA	1000 HDF	Ежедневно	https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov
VNP18		750 HDF	Ежедневно	
AMSR-2			Ежедневно	https://www.eorc.jaxa.jp/AMSR/datacatalog/land/index_en.html
Вегетационные индексы				
MOD13	Terra/Aqua (MODIS), NASA	250, 500, 1000 HDF	Ежедневно	https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov

Название продукта	Исходные данные и разра-ботчик	Пространствен-ное разрешение (м) и формат	Актуальность и частота обнов-ления	Ссылка на загрузку данных
Вегетационные индексы				
VNP13	Suomi NPP, NOAA-20 (VIIRS), NASA	375, 750 HDF	Ежедневно	https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov
Листовой индекс и фотосинтетически активная радиация				
MOD015	Terra/Aqua (MODIS)	500, 1000 HDF	Ежедневно	https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov
VNP15	Suomi NPP, NOAA-20 (VIIRS), NASA	375, 750 HDF	Ежедневно	https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov
Характеристики снежного покрова				
MOD010	Terra/Aqua (MODIS), NASA	500 HDF	Ежедневно	https://nsidc.org/data/data-access-tool/MOD10A1/versions/61
AMSR Snow Depth	AMSR-2, JAXA	5000	Ежедневно	https://gportal.jaxa.jp/gpr/?lang=en
Тепловые аномалии/пожары				
MOD14	Terra/Aqua (MODIS), NASA	1000 .shp, KML, TXT	Ежедневно	https://www.earthdata.nasa.gov/learn/find-data/near-real-time/firms/active-fire-data (оперативные)
VNP14	Suomi NPP, NOAA-20 (VIIRS), NASA	750 .shp, csv, HDF	Ежедневно	https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/ (архив)

Название продукта	Исходные данные и разработчик	Пространственное разрешение [м] и формат	Актуальность и частота обновления	Ссылка на загрузку данных
Освещенность по ночным снимкам (Nighttime Light)				
VNP43	Suomi NPP, NOAA-20 (VIIRS), NASA	375 HDF	Ежедневно	https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov
Карты растительности и землепользования				
GlobCover-2009	ENVISAT/MERIS, ESA	300 Geotiff	2009 г., не обновляется	http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php
MCD12Q1 (MODIS Land Cover Types)	Terra/Aqua (MODIS), NASA	500 HDF	С 2000 г., ежегодно	https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov
Globeland30 Map	Landsat TM/ETM+/OLI, National Geomatics Center of China	300 Geotiff	2015 г., не обновляется	https://ggim.un.org/knowledgebase/KnowledgebaseArticle50265.aspx
WorldCover-2020	Sentinel-2/MSI, Sentinel-1, ESA	10 Geotiff	С 2020 г., ежегодно	https://worldcover2020.esa.int/downloader
ESRI 10m Annual Land Use Land Cover	Sentinel-2/MSI, ESA	10 Geotiff	С 2017 г., ежегодно	https://www.arcgis.com/home/item.html?id=cfc7609de5f478eb7666240902d4d3d
Global Land Cover and Land Use 2019	Landsat/OLI	30 Geotiff	2019 г.	https://glad.umd.edu/dataset/global-land-cover-land-use-v1

Название продукта	Исходные данные и разработчик	Пространственное разрешение (м) и формат	Актуальность и частота обновления	Ссылка на загрузку данных
Динамика растительности и землепользования				
Global Forest Change	Landsat (TM/ETM+/ OLI)	30 Geotiff	2001–2022 гг., ежегодно	https://glad.earthengine.app/view/global-forest-change
Global Land Cover and Land Use Change 2000-2020	Landsat (TM/ETM+/ OLI)	30 Geotiff	2000 и 2020 гг.	https://glad.umd.edu/dataset/GLCLUC2020
Global cropland expansion in the 21st century	Landsat (TM/ETM+/ OLI)	30 Geotiff	2003–2019 гг. (раз в 4 года)	https://glad.umd.edu/dataset/croplands
Global Forest Loss Due to Fires	Landsat (TM/ETM+/ OLI) и MODIS (MOD14)	30 Geotiff	2001–2022 гг., ежегодно	https://glad.umd.edu/dataset/Fire_GFL/
Intact Forest Landscapes	Landsat (TM/ETM+/ OLI)	30 Geotiff	2000, 2013, 2016 гг.	https://glad.umd.edu/gladmaps/globalmap.php#
Global 2010 Bare Ground	Landsat TM/ETM+	30 Geotiff	2010 г.	https://glad.umd.edu/dataset/global-2010-bare-ground-30-m
HILDA+ Global Land Use Change between 1960 and 2019	NOAA AVHRR, SPOT-Vegetation, Envisat MERIS, MCD12Q1, Global Forest Change	1000 Geotiff	1960–2019 гг., с шагом в год	https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.921846?format=html#download
Eastern Europe Forest Cover Dynamics 1985 to 2012	Landsat TM/ETM+	30 Geotiff	1985–2012 гг., не обновляется	https://glad.umd.edu/dataset/eastern-europe-forset-cover-dynamics-1985-2012

Название продукта	Исходные данные и разработчик	Пространственное разрешение [м] и формат	Актуальность и частота обновления	Ссылка на загрузку данных
Параметры древостоев и биомасса растительности				
Global 2010 Tree Cover	Landsat TM/ETM+	30 Geotiff	2010 г., не обновляется	https://glad.umd.edu/dataset/global-2010-tree-cover-30-m
Global Forest Canopy Height	Landsat OLI, + лидарные данные GEDI	30 Geotiff	2019 г., не обновляется	https://glad.umd.edu/dataset/gedi/
GlobBiomass 2010	ENVISAT ASAR, ALOS PALSAR, Landsat TM/ETM+	150-500 Geotiff	2010 г., не обновляется	https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.894711
Динамика поверхностных вод				
Global surface water	Landsat (TM/ ETM+/ OLI)	30 Geotiff	1984–2021 гг.	https://global-surface-water.appspot.com/download
Global surface water dynamics 1999–2021	Landsat (TM/ ETM+/ OLI)	30 Geotiff	1999–2021 гг.	https://glad.earthengine.app/view/surface-water-dynamics

Общедоступные тематические продукты, созданные по данным ДЗЗ из Космоса

Название продукта	Исходные данные	Пространственное разрешение [м] и формат	Точность в плане и по высоте, м	Ссылка на загрузку данных
ETOPO2	ЦМП GLOBE и данные батиметрии	1000 (суша), 2000 (акватория)	200	https://gis-lab.info/qa/etopo2.html
GMTED-2010	SRTM и ЦМП низкого разрешения	250–1000	55–60 (по высоте)	https://earthexplorer.usgs.gov/
GEBCO_Grid 2023	Данные батиметрии и глобальные ЦМП SRTM, GMTED-2010	450	Нет данных	https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/
SRTM C-Band	Радарная съемка SIR-C 2000 г.	90	<=16	https://csidotinfo.wordpress.com/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1/
SRTM X-Band	Радарная съемка X-SAR 2000 г.	30	<=16	https://earthexplorer.usgs.gov/
ASTER GDEM	Стереосъемка Terra Aster 2001-2011 гг.	30	12–30	https://gdemdl.aster.jspacesystems.or.jp/index_en.html
AW3D30 DSM	Стереосъемка ALOS PRISM 2001-2011 гг.	30	От 5	https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm
Arctic DEM	Стереосъемка со спутников Maxar Technologies	До 2	4	http://data.pgc.umn.edu/elev/dem/setsm/ArcticDEM/mosaic/v3.0/2m/

Приложение 3 (окончание)

Название продукта	Исходные данные	Пространственное разрешение (м) и формат	Точность в плане и по высоте, м	Ссылка на загрузку данных
Copernicus DEM GLO-30 и GLO-90	Радарная съемка TerraSAR-X и TanDEM-X	30 и 90	4 (по LE90)	https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSD-EM.032021.4326.3
FABDEM	Радарная съемка TerraSAR-X и TanDEM-X	30	1.12–2.88 (средняя ошибка)	https://data.bris.ac.uk/data/dataset/25wfy0f9ukoge2gs7a5mqpq2j7

Учебное издание

Шихов Андрей Николаевич

Абдуллин Ринат Камилевич

ФОНД КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КАРТ

Учебное пособие

Редактор А.С. Беляева

Корректор С.А. Семицветова

Компьютерная верстка Д.С. Абдуллина

Объем данных 34,12 Мб

Подписано к использованию 06.05.2024

Размещено в открытом доступе на сайте www.psu.ru в разделе НАУКА/Электронные публикации и в электронной мультимедийной библиотеке ELiS

Управление издательской деятельности Пермского государственного
национального исследовательского университета
614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15

