

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R RS.1883-1
(12/2018)

Использование систем дистанционного зондирования в исследовании изменения климата и его последствий

Серия RS
Системы дистанционного зондирования



Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

Серии Рекомендаций МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>.)

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
P	Распространение радиоволн
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	Словарь и связанные с ним вопросы

Примечание. – Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация
Женева, 2019 г.

© ITU 2019

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R RS.1883-1

Использование систем дистанционного зондирования в исследовании изменения климата и его последствий

(2011-2018)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации приводятся руководящие указания по предоставлению данных спутникового дистанционного зондирования для целей изучения изменения климата.

Ключевые слова

ССИЗ (активная), ССИЗ (пассивная), спутниковая служба исследования Земли, дистанционное зондирование, изменение климата.

Соответствующие Рекомендации и Отчеты МСЭ-R

Рекомендация МСЭ-R RS.1859 – Использование дистанционных систем зондирования с целью сбора данных для применения в случае стихийных бедствий и подобных чрезвычайных ситуаций

Отчет МСЭ-R RS.2178 – Важная роль и общемировое значение использования радиочастотного спектра для наблюдения Земли и связанных с ним применений

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что изменение климата относится к явлениям глобального характера, затрагивающим все человечество;
- b) что изменение климата, как ожидается, будет проявляться в серьезных изменениях в окружающей среде Земли, в свою очередь порождающих или усугубляющих стихийные бедствия;
- c) что для изучения изменения климата важнейшее значение имеет наличие действительно совместимых средств глобального наблюдения Земли, которые могут быть представлены исключительно контрольно-измерительными приборами и датчиками дистанционного зондирования, установленными на борту спутника;
- d) что такие бортовые датчики дистанционного зондирования существуют и эксплуатируются в полосах частот, в настоящее время распределенных спутниковой службе исследования Земли (ССИЗ);
- e) что со временем возможности дистанционного зондирования расширяются и чувствительность этих бортовых датчиков дистанционного зондирования повышается;
- f) что системы ССИЗ и МетСат крайне важны для мониторинга и прогнозирования изменения климата, мониторинга океанов, погодных условий и водных ресурсов, метеорологических прогнозов и содействия в поддержании биоразнообразия,

признавая,

- a) что в Резолюции **673 (Пересм. ВКР-12)** содержится решение: 1) по-прежнему признавать, что использование спектра применениями наблюдения Земли имеет существенную социально-экономическую значимость, что описывается в Приложениях 1 и 2; 2) настоятельно призвать администрации принимать во внимание потребности в радиочастотном спектре для наблюдения Земли и, в частности, защиту систем наблюдения Земли в соответствующих полосах частот; 3) настоятельно рекомендовать администрациям учитывать важность использования и наличия спектра для применений наблюдения Земли до принятия решений, которые могли бы оказать негативное влияние на работу этих применений,

отмечая,

a) что в Резолюции 73 МСЭ-Т "Информационно-коммуникационные технологии и изменение климата" признается, что информационно-коммуникационные технологии могут внести существенный вклад в смягчение последствий изменения климата и адаптацию к ним и что ИКТ играют жизненно важную роль в мониторинге изменения климата и решении связанных с этим задач благодаря поддержке фундаментальных научных исследований, что помогло донести вопрос об изменении климата до сведения широкой общественности и повысить уровень осведомленности о будущей проблемах;

b) что в Отчете МСЭ "ИКТ и изменение климата" говорится об укреплении стратегического партнерства с различными учреждениями ООН, Всемирным банком, Европейской комиссией, международными и национальными учреждениями и организациями (например, с метеорологическими учреждениями, такими как Группа по наблюдению Земли, EUMETSAT, ESA, Группа по координации пространственных частот, JAXA, NOAA, НАСА и Роскосмос), НПО, а также организациями частного сектора, участвующими в борьбе с изменением климата, и обращается внимание на роль ССИЗ в мониторинге изменения климата;

c) что в Отчете МСЭ-R RS.2178 содержится обширный анализ различных применений радиосвязи, используемых для наблюдения Земли, космических исследований и радиоастрономии, и описываются их общественное значение и экономические выгоды для мирового сообщества и, в частности, их значение для мониторинга и прогнозирования изменения климата, а также для целей раннего предупреждения, мониторинга и смягчения последствий техногенных и стихийных бедствий;

d) что в Отчете МСЭ-D по Вопросу 24/2 (D-STG-SG02.24-2014) относительно ИКТ и изменения климата отмечаются серьезные последствия изменения климата и роль дистанционного зондирования в его мониторинге и понимании связанных с ним процессов,

рекомендует,

1 чтобы администрации ознакомились с применениями бортовых датчиков дистанционного зондирования для изучения изменения климата и признали их значение, как это поясняется в Приложении 1;

2 чтобы администрации и операторы продолжали предоставлять данные об окружающей среде, связанные с климатом, как это признается в Приложении 2;

3 что следует уделять особое внимание средствам защиты систем, обеспечивающих важнейшие наблюдения за состоянием климата.

Приложение 1

Использование систем дистанционного зондирования в исследовании изменения климата и его последствий

1 Введение

Космический аппарат ССИЗ обычно обеспечивает глобальный охват, используя одни и те же или функционально аналогичные приборы. Таким образом, они предоставляют массивы данных, сопоставимых во всем мире. Зачастую такие массивы данных совпадают по времени и позволяют выстроить непрерывные массивы данных, охватывающие десятилетия. И хотя такие массивы данных не охватывают столетия или тысячелетия, они все же содержат важнейшую информацию, необходимую для тех, кто занимается изучением изменения климата.

Спутники являются наилучшим средством получения моментального снимка нынешнего состояния нашей планеты с единой унифицированной позиции. Ни один инструмент или космический аппарат не

в состоянии обеспечить полную картину; однако нынешний парк космических летательных аппаратов, работающих во взаимодействии друг с другом и обменивающихся своими данными, вероятно, дает нам наиболее точную оценку глобальных условий, в которых мы находимся. Всего один инструмент на спутнике на полярной орбите может вести наблюдение за всей Землей на ежедневной основе, тогда как инструменты на геостационарных спутниках ведут постоянное наблюдение за ежесуточным циклом диска Земли под ними. Таким образом, полярные и геостационарные спутники по исследованиям окружающей среды вместе ведут постоянное наблюдение за всем земным шаром.

Эти данные об окружающей среде служат для достижения двух целей:

- обеспечить основу для мониторинга и измерения изменения климата и его последствий для нашей планеты;
- предоставить обоснованные с научной точки зрения данные для построения климатических моделей.

Совершенствование понимания системы Земли – ее погоды, климата, океанов, суши, геологии, природных ресурсов, экосистем и стихийных и антропогенных бедствий – необходимо для совершенствования прогнозирования ожидаемых глобальных изменений, адаптации к ним и смягчения их последствий для человеческой цивилизации.

Климатология заметно продвинулась вперед благодаря наблюдениям, осуществляемым с помощью спутников. Радиометр, использовавшийся на спутнике Explorer 7 с 1959 по 1961 год, сделал возможным непосредственное измерение энергии, поступающей к Земле и покидающей ее. Этот и последующие полеты позволили ученым измерить энергетический баланс Земли с гораздо более высокой по сравнению с использовавшимися ранее косвенными оценками степенью достоверности, что привело к разработке усовершенствованных климатических моделей. По мере того как радиометры совершенствовались, эти измерения становились все более точными, позволяя обеспечить пространственное разрешение и глобальный охват, необходимые для прямого наблюдения за изменениями в глобальном энергетическом балансе Земли, связанными с кратковременными явлениями, например крупными извержениями вулканов или Южным колебанием – Эль-Ниньо. Эти радиометры напрямую измеряют перенос тепла от экватора к полюсам климатической системой, парниковый эффект от газовых примесей атмосферы и влияние облаков на энергетический баланс Земли. Эти наблюдения позволили нам лучше понять климатическую систему и усовершенствовать климатические модели.

Спутники участвуют в исследовании атмосферы (например, AURA) и оказании поддержки оперативной метеорологии (например, серия европейских метеорологических спутников Metop и серия спутников на полярной орбите Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA)), ежедневно предоставляя трехмерные профили температуры и влажности атмосферы во всем мире, а также данные, касающиеся мельчайших частиц атмосферы, например озона. Хотя эти данные введены в модели прогноза погоды, они служат также для определения текущего состояния атмосферы и проведения кратковременных испытаний климатических моделей.

Мониторингом других свойств земли занимаются космические летательные аппараты, не участвующие в деятельности, связанной с исследованием атмосферы. Так, например, мы можем отметить следующие наблюдения:

- мониторинг поверхности Земли, осуществляемый непрерывно на протяжении десятилетий спутниками серии Landsat (с 1973 года) и SPOT (с 1986 года);
- мониторинг скопления морского льда, осуществляемый непрерывно с 1978 года спутником Nimbus-7 и серией спутников DMSP;
- мониторинг скорости ветра у поверхности моря, осуществляемый периодически с 1996 года спутниками ADEOS-1 и ADEOS-2, QUIKSCAT, прибором RapidSCAT межспутниковой службы, а в последнее время OSCAT на OceanSat-2, KU-RFSCAT на HY-2A и ASCAT на MetOp;

- мониторинг колебаний уровня моря и температуры поверхностных слоев моря, осуществляемый непрерывно с 1992 года спутником TOPEX/Poseidon и спутниками серии Jason; а также
- мониторинг влажности почвы и солености океанических вод, осуществляемый с 2009 года спутниками SMOS, Aquarius и SMAP.

Другие космические летательные аппараты и технологии, такие как радиолокатор с синтезированной апертурой (SAR), а также пассивные микроволновые измерения, расширяют возможности описания нашей планеты, в частности при осуществлении наблюдений в районах заполярья, где темнота в зимнее время не позволяет получить оптические изображения, и при осуществлении наблюдений там, где постоянный облачный покров скрывает поверхность (например, район Амазонки, центральной части Африки и островных государств).

Ожидается, что повышение уровня моря ранее других явлений окажет серьезное воздействие на общество вследствие изменения климата. Повышение уровня моря объясняется повышением температуры океанов и добавлением воды вследствие таяния ледникового льда. В случае таяния всего ледникового льда над Гренландией уровень моря, по оценкам, повысится на 7 метров, а если растает весь ледниковый лед над Антарктикой, уровень моря, по оценкам, повысится на 70 метров. Около 40% населения Земли живет на расстоянии до 100 км от морского побережья, и в долгосрочной перспективе (от столетий до тысячелетий) может подвергнуться риску затопления. Восемь из десяти крупнейших городов мира расположены на побережье. Эти города и все низменные прибрежные зоны сильно пострадают от повышения уровня моря всего на несколько метров. Такой масштаб повышения уровня моря прогнозируется через одно-два столетия. Как температура океанов, так и масса ледникового льда, основные факторы повышения уровня моря, измеряются спутниковыми инструментами.

2 Лед или криосфера

Один из центральных вопросов при изучении изменения климата и криосферы (области льда) состоит в том, чтобы понять, как потепление климата отразится на ледяном покрове. Это важно, поскольку объем материкового льда и талой воды, поступающей в океан, сильно влияет на изменение уровня моря. Пока не было спутников, информация о полярных районах ограничивалась данными, полученными на местном уровне на протяжении благоприятного времени года. Использование бортовых спутниковых контрольно-измерительных радиоприборов оказалось особенно полезным в районах заполярья, поскольку в этих районах в зимнее время существует продолжительный период темноты, когда измерения в спектре видимого излучения невозможны. Синоптическое наблюдение со спутников, в частности со спутников, оснащенных датчиками, работающими на радиочастотах, на много порядков увеличивает охват данных о районах заполярья, и доступ к ним больше не ограничивается временем года.

До появления спутников считалось, что баланс массы ледяного покрова Антарктики и Гренландии регулируется разницей между таянием льдов и скоростью накопления осадков, а скорость стока льда в океан является постоянной. Изображения, полученные с помощью радиолокационной станции спутника RADARSAT, показали, что:

- 1 скорость схода ледяного покрова крайне изменчива;
- 2 существуют сложные сети ледяных потоков;
- 3 скорость движения ледяного потока в направлении моря заметно увеличилась вследствие изменения климата.

Одним из показателей изменения климата/глобального потепления является отступление, а не наступление ледяного покрова (как ледников, так и морского льда). Изучение режимов ледника во всем мире показывает, что с конца 1970-х годов при явном ускорении в конце 1980-х годов наблюдается масштабная утрата ледяного покрова. Дистанционное зондирование используется для документального подтверждения изменений в протяженности ледника (размере ледника) и расположении границы питания ледника (отметка на леднике, на уровне которой накопление осадков зимой компенсируется таянием льдов в летнее время). С 1972 года спутники обеспечивают изображение протяженности ледников в оптическом диапазоне частот. SAR в настоящее время используется для изучения зон накопления ледяного снега и таяния льда, для того чтобы определить внешнее воздействие на климат, а лазерная альтиметрия используется также для измерения изменений в наивысшей точке ледника.

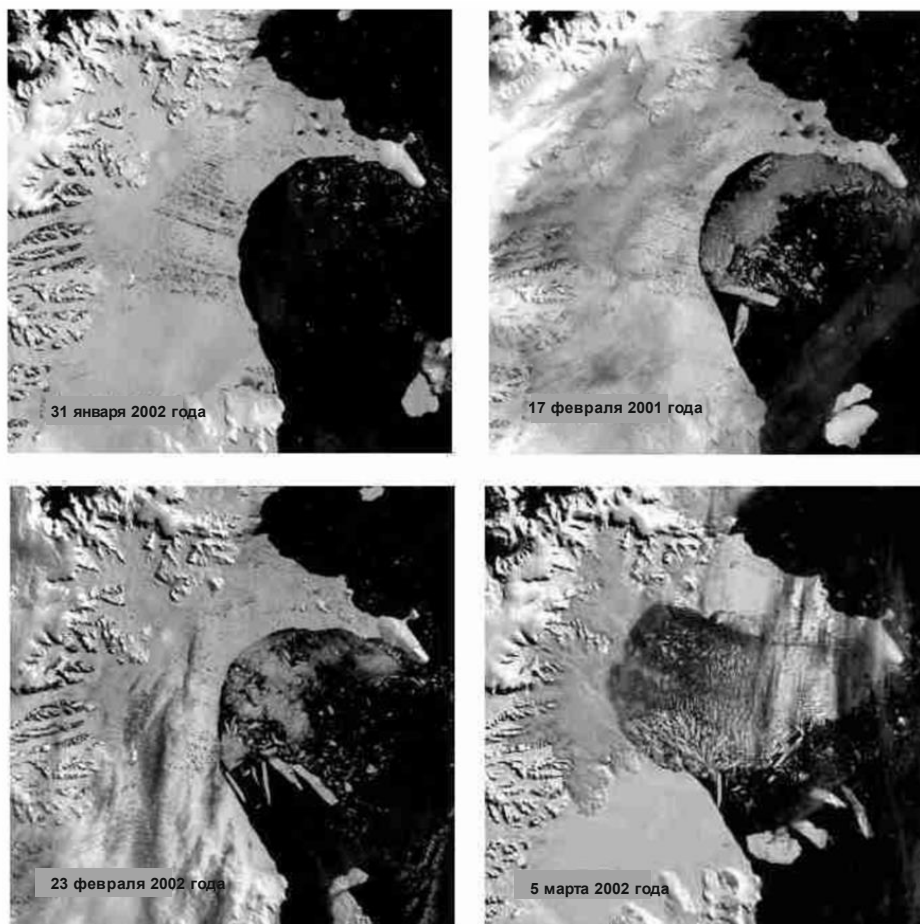
Поскольку ледники реагируют на прошлые и текущие изменения климата, то в настоящее время проводится полная глобальная оценка ледника для того, чтобы установить его нынешнюю протяженность и отслеживать скорость изменений ледника во всем мире. В проекте Глобальные измерения материкового льда из космоса используются данные ASTER (усовершенствованный космический термоэмиссионный и отражающий радиометр) и усовершенствованного тематического картографа Landsat для оценки около 160 000 ледников во всем мире. Результаты этих измерений и анализ вытекающих из этого тенденций являются важными показателями изменения климата и подтверждают ценность и важность массива данных многолетних наблюдений для понимания сложной климатической системы.

Мониторинг состояния ледяного покрова легко наладить с помощью бортовых спутниковых контрольно-измерительных приборов как активных, так и пассивных. Вскрытие мощных ледяных покровов (например, ледового шельфа Ларсена В) в Антарктике наблюдалось из космоса. Эти вскрытия если и не были вызваны глобальным потеплением, то ускорились в результате этого процесса. Вскрытие ледового шельфа Ларсена В в Антарктике в 2002 году, которое удалось обнаружить только благодаря многократному охвату изображением, получаемым с помощью спутников, наглядно проиллюстрировало динамику изменения ледяного покрова за удивительно короткий период времени (рисунок 1). Эти открытия наглядно показывают серьезные последствия: быстрый сход льда материкового ледяного покрова в море может привести к значительному повышению уровня моря.

Мониторинг значительных трещин в шельфовых ледниках Антарктики также можно осуществлять из космоса. Штатные летние наблюдения Антарктики при сочетании с оптическими изображениями Copernicus Sentinel-2 и радиолокационными продуктами Sentinel-1 доказали свое значение для мониторинга быстрых экологических изменений и предоставления информации, имеющей решающее значение для принятия обоснованных решений по вопросам безопасности и защищенности в Антарктике.

РИСУНОК 1

Вскрытие ледового шельфа Ларсена В в Западной Антарктике.
2000 кв. км ледового шельфа отделилось только в течение двух дней, оставив небольшие кусочки льда



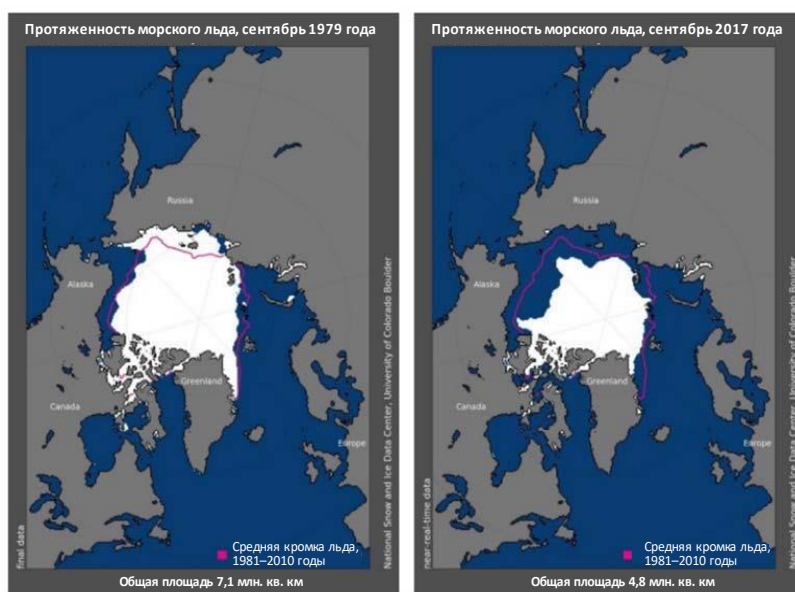
RS.1883-01

Морской лед формируется из воды океанов, которая замерзает либо вдоль берегов (береговой лед), либо плавает на поверхности (дрейфующий лед), либо является плотным (паковым) льдом. Наиболее важными участками пакового льда являются скопления полярного льда. Поскольку огромные объемы воды добавляются или извлекаются из океанов и атмосферы, поведение скоплений полярного льда оказывает существенное влияние на глобальные перемены климата. Мониторинг состояния морского льда осуществляется постоянно с помощью пассивных микроволновых датчиков (радиометр сантиметрового диапазона с электрической системой сканирования (ESMR), сканирующий многоканальный микроволновой радиометр (SMMR), специальный датчик для получения изображений в микроволновом диапазоне (SSM/I) и усовершенствованный сканирующий радиометр СВЧ-система наблюдения Земли (AMSR-E)) с 1979 года. Независимые от погодных условий и уровня освещенности, они полностью пригодны для мониторинга состояния морского льда, благодаря сильному контрасту в сверхвысокочастотном излучении между открытой и скованной льдом поверхностями океана. Массив данных долгосрочных 35-летних наблюдений, полученных с использованием этих пассивных микроволновых датчиков, позволил подготовить анализ тенденции, далеко выходящий за рамки строгого анализа междугодовой изменчивости морского льда. За период с 2000 года в Арктике на протяжении четырех из шести прошлых лет наблюдался рекордно низкий минимальный уровень льда в летнее время (см. рисунок 2). Более того, последние данные свидетельствуют о том, что размеры ледяного покрова в зимнее время также начинают уменьшаться более быстрыми темпами, возможно, в результате потепления океана, связанного с уменьшением толщины слоя и протяженности ледяного покрова, как показано на рисунок 3. Линейная скорость уменьшения на февраль составляет 46 900 кв. км в год, или 3% за десятилетие. Таяние и замерзание льда (как морского льда, так и ледникового льда) также влияют на соленость океанических вод и

связывают соленость поверхностного слоя океанов с региональными изменениями уровня моря. Эти наблюдения уменьшающегося количества льда арктических вод согласуются с прогнозами климатической модели ускоренного потепления в высоких широтах, что в свою очередь в значительной степени обусловлено обратной реакцией альбеда льда. В отличие от Арктики, четкой тенденции в размерах протяженности морского льда Антарктики не выявлено.

РИСУНОК 2

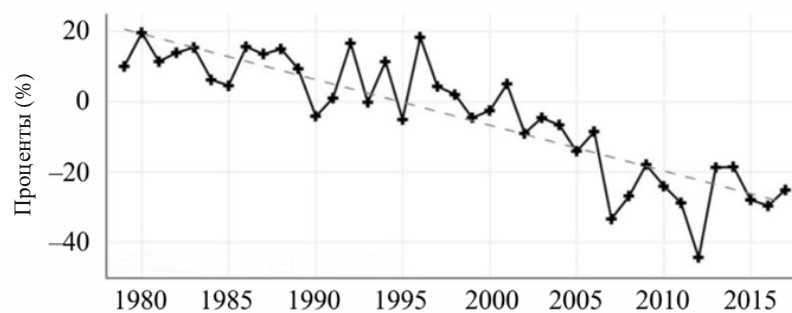
Протяженность морского льда Антарктики в сентябре 1979 и 2017 годов.
Сиреновой линией показана средняя протяженность морского льда с 1981 по 2010 год за месяц



RS.1883-02

РИСУНОК 3

Аномалия протяженности морского льда в сентябре за период с 1979 по 2017 год



Наклон $-13,0 \pm 2,4\%$ за десятилетие

RS.1883-03

В последние несколько лет наблюдается рост количества сообщений с прогнозами о состоянии морского льда, и эти сообщения полностью или частично основываются на данных, полученных со спутников. Так, например, оценка влияния арктического климата (ACIA 2005) содержит вывод о том, что продолжающееся сокращение морского льда Арктики вскоре может привести к сезонно свободной ото льда Арктике и расширению морского судоходства, поскольку перевозки морскими путями через Северный Ледовитый океан намного дешевле по сравнению с путями, пролегающими через Панамский или Суэцкий каналы. Однако имеются также некоторые свидетельства того, что уменьшение ледяного покрова будет сопровождаться большей междугодовой изменчивостью, по крайней мере в некоторых регионах.

Понимание изменений, происходящих в ледяных покровах, морском льде, ледниковых шапках и ледниках важно для лучшего понимания глобального изменения климата и прогнозирования его последствий. Так по сообщению журнала Science, "уменьшение ледяного покрова" и вызванное им повышение уровня моря были определены в качестве третьего важнейшего "открытия 2006 года". Учитывая прогнозируемое изменение климата и связанное с этим процессом повышение уровня моря, обеспечение глобального покрытия полярной области в будущем поможет удовлетворить жизненно важные потребности общества, которые не были удовлетворены другими системами наблюдения.

3 Океаны

Океаны занимают около 71% земного шара и играют ключевую роль в климатической системе в нескольких аспектах. Они являются также прекрасным показателем изменения климата. Так, например, измерение уровней моря дает важный ключ к пониманию причин глобального потепления.

Изменения в погоде, климате и окружающей среде ставят серьезные проблемы перед человечеством. Для решения этих проблем требуются дополнительные усовершенствования в прогнозировании погоды, особенно в среднесрочном и долгосрочном прогнозировании. Если мы будем иметь более четкую картину того, что может произойти через ближайшие 10 дней, в ближайшие месяцы и даже время года, то люди и предприятия смогут намного лучше подготовиться к неустойчивым погодным условиям. Решение этих проблем предполагает также лучшее понимание глобальных климатических факторов, являющихся причинами возникновения таких явлений, как Эль-Ниньо и Ла-Нинья в Тихом океане, опасные ураганы и тайфуны и особенно подъемы уровня моря.

Ключ к пониманию сил, стоящих за изменением погодных условий, может быть найден только путем отображения на карте изменений состояния поверхности океана по всему миру и использования собранных данных для разработки и использования эффективных моделей поведения океана. Сочетая модели океана и атмосферы, мы можем предоставить необходимые точные как краткосрочные, так и долгосрочные прогнозы. Сочетание моделей океана и атмосферы необходимо для полного учета среднemasштабной (средней дальности) динамики океанов. Сочетание моделей океана и атмосферы становится важным для составления прогнозов погоды на период свыше двух недель. Океаны являются также важной частью процесса изменения климата, а подъем уровней моря во всем мире общепризнан в качестве потенциальной причины особенно разрушительных последствий глобального потепления.

3.1 Температура поверхностного слоя моря и подъем среднего уровня моря

Важный вклад в климатологию на протяжении длительного периода внесла регистрация температуры поверхностного слоя моря (SST), осуществляемая с помощью усовершенствованных радиометров с очень высокой разрешающей способностью (AVHRR), установленных на серии спутников для телевизионного наблюдения в инфракрасных лучах (TIROS-N) и серии спутников NOAA. Сегодня SST измеряется также с помощью пассивных микроволновых приборов. SST является одним из важнейших показателей изменения глобального климата и важнейшим параметром для моделирования климата. Поскольку океанографические данные дистанционного зондирования охватывают самый продолжительный период времени, они оказывают самое широкое влияние.

Информация о SST раскрывает влияние океана на изменчивость регионального и глобального климата и содержит важные подробные сведения об океанических течениях. Свыше 80% от общего объема тепла системы Земли хранится в океане, а океанические течения перераспределяют это тепло по всему земному шару. Анализ тенденций в регистрации SST помог лучше понять обратную связь между климатом и атмосферой в тропических зонах, ответственных также за Южное колебание – Эль-Ниньо (ENSO) в Тихом океане. Прогресс в понимании ENSO, ставший возможным благодаря спутниковым наблюдениям за морскими поверхностными ветрами, колебаниями уровня моря и температурами поверхностного слоя моря, оказал глубокое влияние на региональные прогнозы климата и погоды. Кроме того, интенсивность ураганов напрямую связана с температурами поверхностного слоя моря. Таким образом информация как о температуре поверхностного слоя моря, так и о самих ураганах получена из исследований, в которых использовались данные со спутников.

Кроме того, SST занимает центральное место в установлении взаимосвязи океана с атмосферой и является определяющим фактором в тепловом и влагообмене между этими двумя средами. Анализ тенденций в изменении SST предоставил доказательства глобального потепления и важной обратной

связи между климатом и атмосферой в тропических зонах, ответственных за явления ENSO. Эти наблюдения SST, в сочетании с вертикальными измерениями на месте температуры океана на глубине до 3000 м, предоставили доказательства антропогенного глобального потепления в океане.

Понимание увеличения SST и антропогенного поступления тепла к поверхности океана также имеют важные последствия для количественного измерения и прогнозирования подъема уровня моря. Подъем среднего уровня моря может являться признаком глобального потепления. Мониторинг этого уровня является применением альтиметрии и одним из основных вопросов в науке об окружающей среде XXI века.

Порой трудно отделить естественную изменчивость климата от последствий глобального потепления. Измерения средних уровней моря получены в результате 15-летних наблюдений со спутников. Эти наблюдения самосогласуются и составляют точный временной ряд спутниковых наблюдений. Однако такой период времени слишком непродолжителен. К тому же необходимо отметить, что помимо естественной изменчивости климата существуют также и антропогенные нарушения климата. Поэтому сигналы изменения климата могут быть обнаружены только в том случае, если они больше фоновой естественной изменчивости климата. Обнаружение глобального изменения климата важнее, чем мониторинг региональных последствий.

Наблюдающийся подъем уровня моря частично объясняется увеличением температуры воды. В остальном он может являться результатом таяния льдов и колебаний в уровне континентальных вод. На рисунке 4 показано, что этот подъем составляет около 3,3 мм/год или приблизительно 5 см за 15 лет.

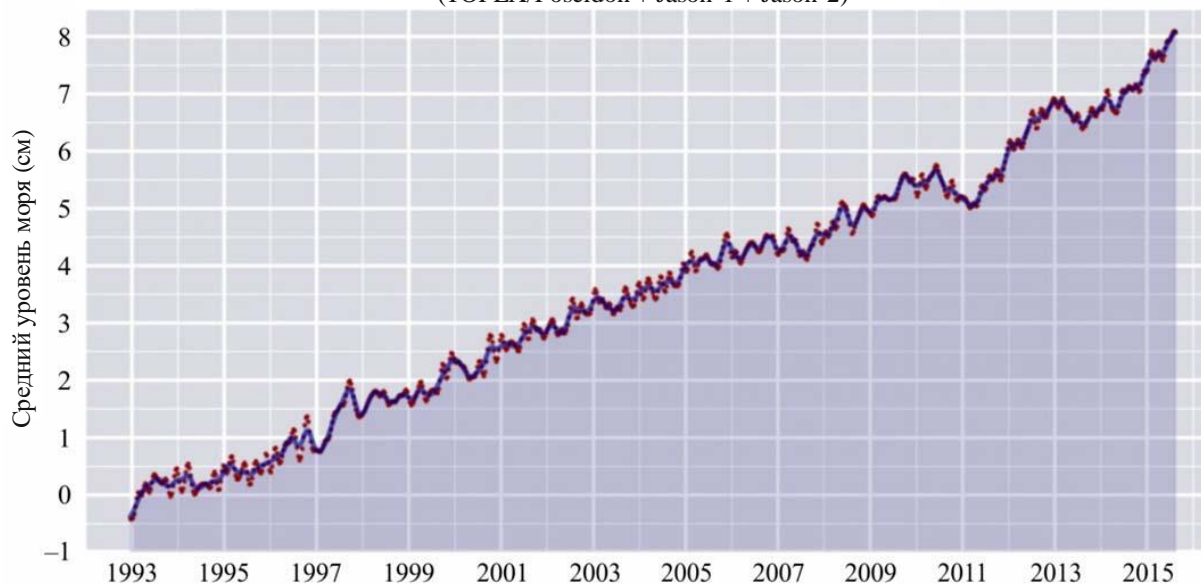
РИСУНОК 4

Подъем среднего уровня моря

Последние измерения среднего уровня моря
27 августа 2015 года

Альтиметрический глобальный средний уровень моря,
применяется поправка на гляциоизостатическое поднятие
(TOPEX/Poseidon + Jason-1 + Jason-2)

3,32 мм/год



RS.1883-04

Источник: © CNES, LEGOS, CLS

Однако средний подъем уровня моря – это только часть проблемы. Подъем уровня океанов происходит далеко не равномерно. В одних районах мирового океана уровень моря повышается (в некоторых местах до 20 мм в год), тогда как в других районах он на эквивалентную величину падает. Такие региональные отличия, наблюдаемые со спутников TOPEX/JASON с 1993 года, отражают главным образом колебания уровня моря на протяжении нескольких лет.

Основная проблема состоит в том, что подъем уровня моря может привести к затоплению прибрежных районов во всем мире и полному поглощению низменных островов. Хотя такие серьезные последствия могут наступить спустя относительно продолжительный период времени (десятилетия – столетия), топографическая съемка, полученная с помощью спутниковых наблюдений (с использованием радара SAR, например радарной топографической съемки и TerraSAR-X, и оптически – через ASTER), может помочь выявить наиболее уязвимые районы.

Измерения температуры поверхностного слоя моря позволяют не только получить важную информацию о циркуляции океана (например, о Гольфстриме), но и продвинуться вперед в исследованиях в области климата путем предоставления подробной информации о поступлении тепла в океан. Цвет океана в сочетании с данными наблюдений за SST приводят к новым открытиям в области физико-биологических взаимосвязей в океане с важными последствиями для роли океана в углеродном цикле.

Наблюдения, осуществляемые с помощью спутников, являются единственным способом оценки и мониторинга роли океанической биомассы как поглотителя углерода. В частности, ответ на основной вопрос о том, изменяется ли биологическое поглощение углерода под влиянием изменения климата, может быть получен только с помощью измерений со спутника. Это требует не только измерений цвета океана (биомассы и продуктивности фитопланктона), но и соответствующих космических наблюдений за физической океанической средой (циркуляция и смешивание), взаимодействием материка и океана (через устья рек и приливо-отливную зону побережья), а также за другими факторами, такими как ветры, приливы и отливы и поступление солнечной энергии к верхнему слою океана. Наблюдение взаимосвязей между физической и химической средой и биологией океана является одним из важнейших достижений наблюдений из космоса.

3.2 Влажность почвы и соленость океанических и морских вод

Испарения, просачивание грунтовых вод и пополнение запасов подземных вод обычно происходят через ненасыщенную зону верхних грунтовых вод, простирающуюся от высшей точки поверхности земли до уровня грунтовых вод. Корнеобитаемый слой почвы, в котором растительность получает необходимую ей воду, расположен в зоне аэрации на границе между средой произрастания растительности и началом гидрологической системы. Количество воды, имеющейся в растительности, определяет процесс испарения влаги растениями и их фотосинтез и тем самым связывание CO₂. Количество воды в зоне аэрации напрямую связано со способностью почвы производить дренаж после выпадения осадков. Модели водообмена между почвой, растительностью и атмосферой (SVAT), используемые в метеорологии и гидрологии, предназначены для описания основных процессов испарения на поверхности и установления границы между испарением влаги растениями, дренажем, поверхностными водами и влажностью почвы. Для моделей SVAT должно быть предоставлено реалистичное исходное значение количества воды в зоне верхних грунтовых вод.

В случае оголенной почвы или редко встречающейся растительности коэффициент испарения и сток вод может быть рассчитан на основе временного ряда верхнего слоя почвы. В случае поверхностей, покрытых растительностью, должно учитываться количество воды в этой растительности (оптическая плотность растительности). Сама оптическая плотность растительности может оказаться очень полезным показателем при мониторинге динамики растительности.

Наличие информации о распределении соли (солености) в мировом океане и ее годичной и междугодичной изменчивости имеет важнейшее значение для понимания роли океана в климатической системе. Информация о солености необходима для определения плотности океана, а следовательно и термогалинной циркуляции его вод. Соленость океана связана также с океаническим углеродным циклом, поскольку играет роль в установлении химического равновесия, что в свою очередь регулирует процесс поглощения и выделения CO₂. Поэтому включение результатов измерений солености поверхностного слоя океанов в биогеохимические модели мирового океана должно повысить качество оценок поглощения CO₂ океанами.

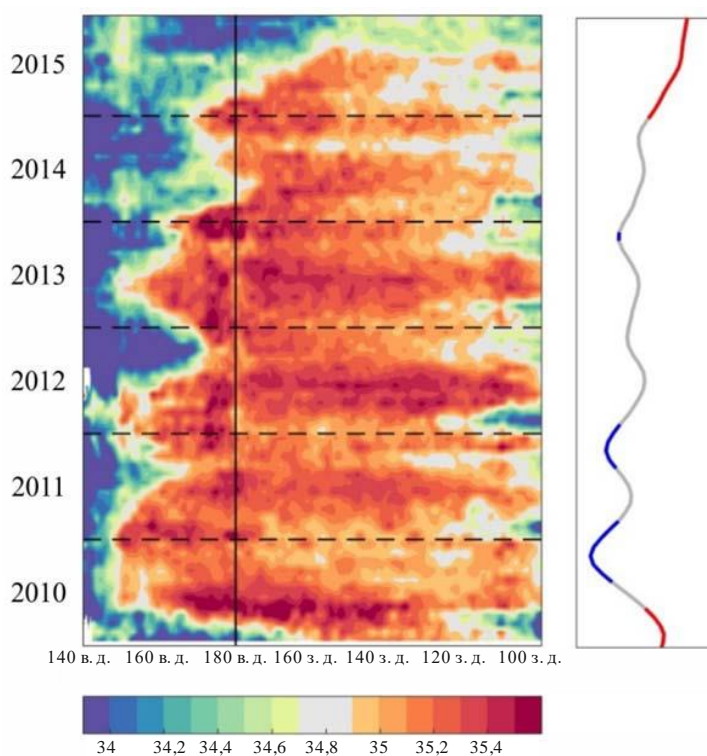
Соленость поверхностного слоя океана в различных районах мира различается, что определяется соотношением между испарением, осадками и стоком вод, а также динамикой океана. Запущенный в 2009 году спутник SMOS обеспечивает наиболее продолжительную непрерывную регистрацию измерений солености поверхностного слоя океана из космоса. В начале 2010 года со спутника были получены данные наблюдений о солености поверхностного слоя океана, позволяющие говорить о слабом проявлении явления Эль-Ниньо, которые постепенно исчезли и преобразовались в сильные проявления явлений Ла-Нинья, которые сохранялись до 2012 года. Соленость ниже обычной, наблюдавшаяся в начале 2010 года в экваториальной части Тихого океана как участок пресноводного бассейна западной части Тихого океана, распространилась на восток. Этот участок вернулся к западу по мере того, как явления Ла-Нинья приобрели устойчивый характер. Недавно спутник SMOS обнаружил увеличение объема пресной воды в тропической части Тихого океана во время явления Эль-Ниньо 2016 года (см. рисунок 5).

РИСУНОК 5

Соленость на экваторе: средняя наблюдаемая спутником SMOS соленость в районе экватора (2° ю. ш. – 2° с. ш.) с 2010 по 2015 год.

Участок пресной воды (показанный синим и зеленым) в западной экваториальной части Тихого океана во время явлений Эль-Ниньо (начало 2010 года и 2015 года) уменьшается к западу во время явлений Ла-Нинья (конец 2010 года и 2011 года).

Справа: индекс Ниньо 3.4 на основании наблюдений температуры поверхности океана, где явления Эль-Ниньо показаны красным, а явления Ла-Нинья – синим



RS.1883-05

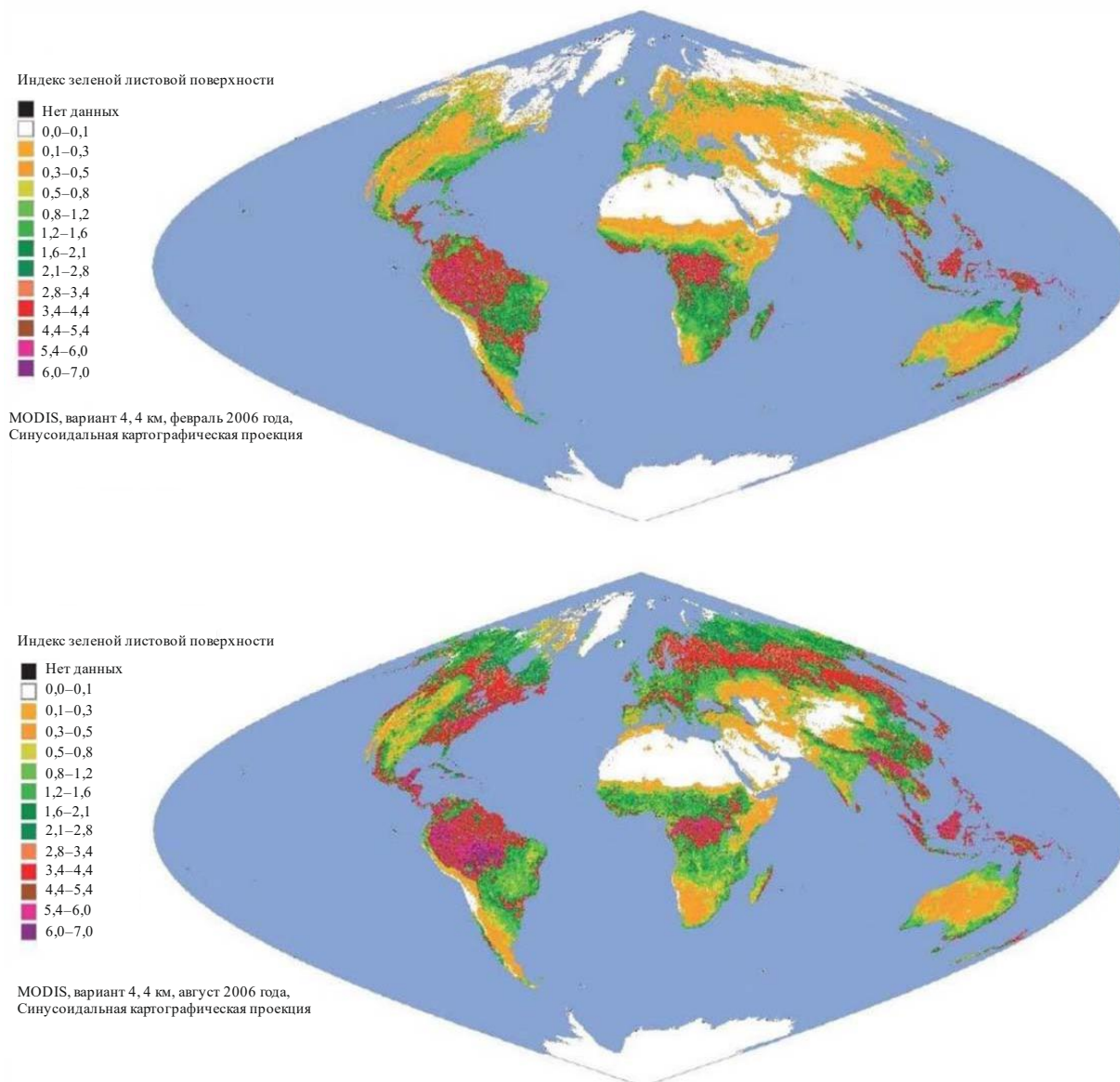
Задача спутника SMOS состоит в осуществлении мониторинга влажности почвы совместно со спутником SMAP, а также солености воды в океане совместно со спутником Aquarius.

4 Биосфера

Спутниковый мониторинг динамики растительности Земли важен для понимания функционирования глобальной экосистемы и реагирования на колебания и изменчивость климата. С помощью прибора MODIS, установленного на спутниках TERRA и AQUA, а также VIIRS на спутнике SUOMI NPP такое наблюдение (рисунок 6) стало более точным за счет охвата биофизических измерений.

РИСУНОК 6

Индексы зеленой листовой поверхности, полученные с помощью MODIS и свидетельствующие о сезонных изменениях в растительности



RS.1883-06

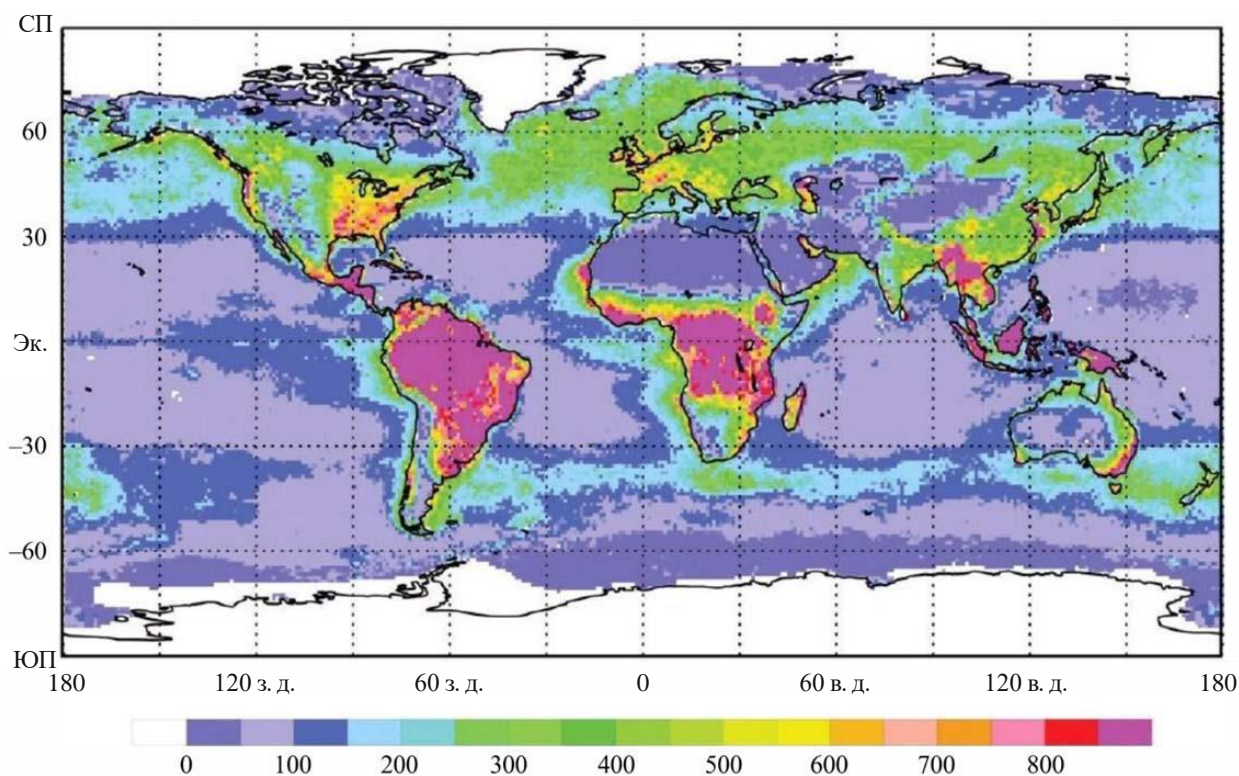
Источник: *Earth Observations from Space: the First 50 Years of Scientific Achievements*, p. 75, 2008. Можно загрузить по адресу URL <http://www.nap.edu/catalog/11991.html>.

Исследования углеродного цикла и флуктуации энергии Земли, проводившиеся на базе спутников, помогли также в проведении исследований в области изменения климата.

Чистая первичная продуктивность (NPP) определяется как чистый приток углерода из атмосферы в зеленые растения за единицу времени. Спутниковые наблюдения NPP вносят бесценный вклад в понимание основ влияния изменения климата на биосферу. На NPP влияет управление климатом и естественное регулирование численности видов растений и животных, которые взаимодействуют друг с другом. Вклад суши и океана в NPP практически одинаковый (рисунок 7), однако на местном уровне наблюдается поразительная неустойчивость в NPP. Поскольку жизненные циклы фитопланктона на порядки меньше (дни против годов или десятилетий), по сравнению с жизненными циклами земных растений, то фитопланктон может гораздо быстрее реагировать на влияние изменения климата на океаническую циркуляцию, смешивание, запас питательных веществ и свет, чем растения в земных экосистемах. Поэтому океанический компонент (примерно половина) углеродного цикла, как ожидается, будет быстрее реагировать на изменения климата.

РИСУНОК 7

Глобальная ежегодная NPP (в граммах углерода/м²/год) для биосферы, рассчитанная на основе объединенной модели CASA-VGPM (вертикально обобщенная модель продуктивности). Входные данные для цветности океана, полученные с помощью датчика CZCS, являются средними величинами за период с 1978 по 1983 год. Индекс земной растительности, полученный с помощью датчиков AVHRR, является средней величиной за период с 1982 по 1990 год



RS.1883-07

Запущенный в 1978 году прибор для сканирования прибрежной зоны показал, что за продуктивностью океана можно наблюдать, используя видимый и ближний инфракрасный диапазоны; однако измерения CZCS были насыщены сушей и поэтому не подлежали использованию.

Радиометры AVHRR, установленные на метеорологических спутниках на полярной орбите Национального управления по исследованию океанов и атмосферы (NOAA), получают начиная с 1978 года непрерывный поток данных ежедневных глобальных наблюдений, используя как красный, так и ближний инфракрасный диапазоны. В настоящее время набор данных AVHRR, поступающих ежедневно, охватывает более чем 25-летний период и является наиболее полным с точки зрения охватываемого периода непрерывным массивом данных о земной продуктивности, фенологии (изучение периодических событий в жизненном цикле растительного и животного мира, а также того, какое влияние на них оказывают сезонные и межгодовые колебания климата) и изменении экосистемы для мониторинга биосферных реакций на изменения и колебания климата.

Хотя AVHRR не предназначен для мониторинга климата, продолжающиеся усовершенствования в калибровке и повторный анализ позволяют получать устойчивые данные, необходимые для мониторинга и оценки прошлых и будущих биосферных реагирований, обусловленных изменением и колебанием климата, а также деятельностью человека.

Одной из важных проблемных областей является влияние изменения климата на сельское хозяйство. По мере потепления климата увеличивается продолжительность посевного периода, северные районы становятся более продуктивными, а южные районы, оказавшиеся в чрезвычайно жарких погодных условиях, – менее продуктивными. Мониторинг продуктивности сельского хозяйства ведется из космоса на протяжении десятилетий. Индекс относительной разности растительности (NDVI) имеет свойство колебаться в пределах от -1 до $+1$, имея значения около $+1$, когда наблюдается растительность. Технически индекс NDVI определяется как величина ближнего инфракрасного диапазона за вычетом величины красного (видимого) диапазона, поделенная на сумму этих величин.

В прошлом десятилетии данные NDVI, полученные с AVHRR, стали важнейшим компонентом при мониторинге изменения климата, оценке изменения продолжительности и времени посевного периода, мониторинге состояния биосферы и других явлений экосистемы. Многолетний период наблюдений NDVI выявил возрастание реагирования на потепление климата в 1980-е и начале 1990-х годов, однако в последнее время эта тенденция стабилизировалась. Изменения в планетарном NDVI (зеленость) устойчиво коррелируются с ежедневной динамикой земной улавливаемой фотосинтетически активной радиации и концентрацией CO_2 в окружающей атмосфере. Наблюдается устойчивая отрицательная корреляция между NDVI и содержанием CO_2 в атмосфере. Таким образом NDVI является высоким, когда концентрация CO_2 не высока, и наоборот. Такой временный пример фотосинтеза и биологического круговорота экосистемы показывает динамику, связывающую биосферу и атмосферу.

Высокая частота обращаемости спутников Sentinel-2 способствует попыткам смягчить последствия обезлесения, давая возможности получения данных изображений, свободных от облаков. Это будет особенно полезным в тропических широтах, где плотная облачность может препятствовать получению полного каталога данных. Данные с высоким разрешением могут способствовать обнаружению изменений, ведущих к наводнениям в затрагиваемых странах.

5 Региональное изменение климата и деятельность человека

Изменение климата не является однородным, то есть температура Земли в целом не повышается одинаково. Обычно изменение климата происходит по регионам – в одних регионах температура повышается больше, чем в других, а в некоторых регионах в краткосрочной перспективе может наблюдаться понижение температуры.

На окружающую среду Земли оказывает воздействие увеличение населения. Многие из мер, принимаемых для поддержки этого увеличения, воздействуют на климат, как на локальном, так и на глобальном уровне, и их можно отслеживать с помощью спутников.

Одним из примеров является изменение течения Аму-Дарьи в 1960-е годы для орошения полей хлопка и пшеницы. Спустя десятилетия Аральское море, бывшее когда-то четвертым по величине озером в мире, с площадью 68 тыс. кв. км, практически полностью высохло (рисунок 8). Местное рыболовство, дававшее в Советском Союзе шестую часть рыбы, было уничтожено. Побережья на километры отступили от городов, и остающиеся жители страдали от вредоносных песчаных бурь. Пересыхание Аральского моря было названо одним из жесточайших экологических бедствий нашей планеты.

РИСУНОК 8

Историческая площадь Аральского моря



1977 (Landsat-2)



2014 (MODIS on TERRA)

RS.1883-08

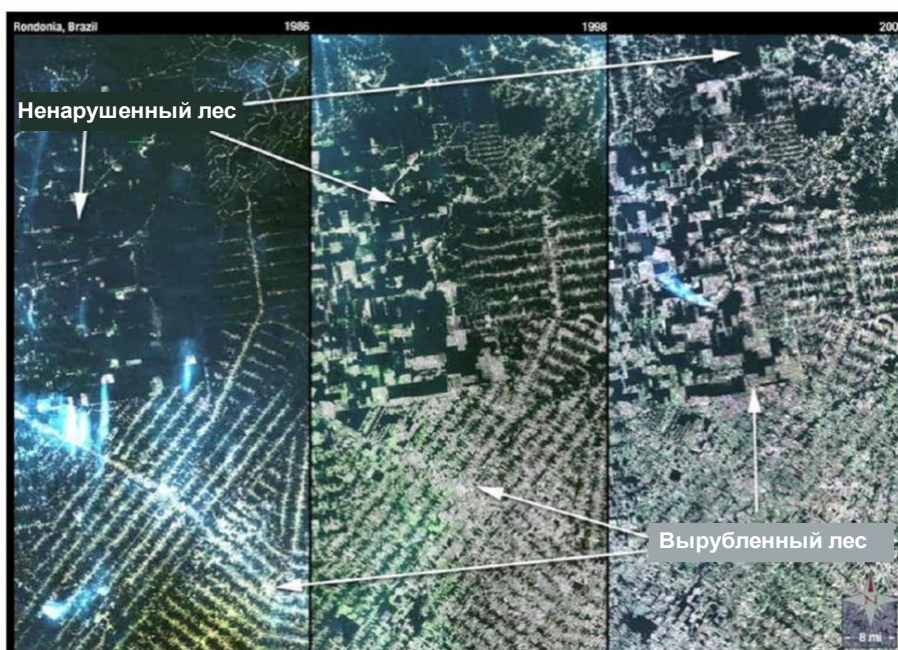
1977 год (Landsat-2)

2014 год (MODIS на TERRA)

Деревья в лесах могут служить фильтром воздуха, забирая из него углекислый газ и давая нам кислород и воду. Спутники могут осуществлять мониторинг состояния и площади лесов. На картах отражены территории, где леса были сведены (рисунок 9), а также где леса были восстановлены (рисунок 10). На обоих рисунках использованы данные Landsat. Долгосрочные изменения лесного покрова сказываются на климате, и следует осуществлять их мониторинг.

РИСУНОК 9

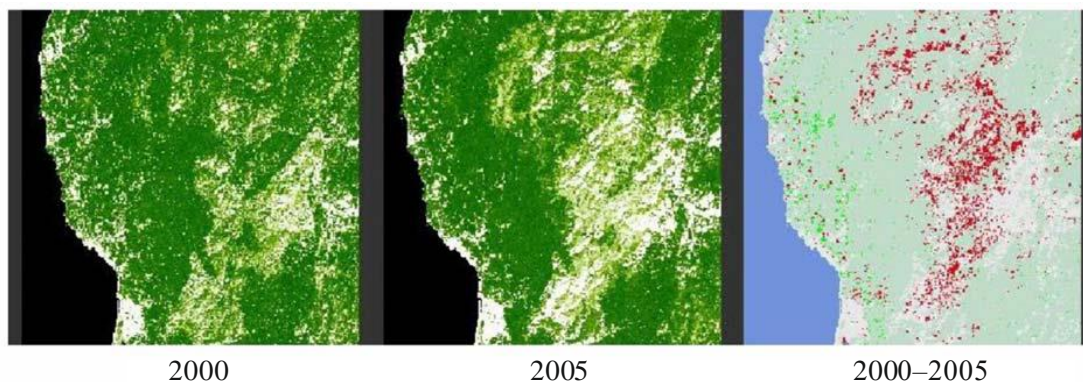
Обезлесение в районе Амазонки



RS.1883-09

РИСУНОК 10

**Обезлесение и восстановление
Орегон (северо-запад США), лесной покров по данным Landsat**



RS.1883-10

Захват пустынями плодородных земель сказывается не только на снабжении продовольствием и наличии земли для проживания людей; изменение отражательной способности Земли из-за нехватки растительного покрова изменяет климат Земли. Выпас сельскохозяйственных животных может оказать серьезное воздействие на испытывающие давление районы, в особенности пустыни. Козы могут уничтожить уже уязвимую растительность пустыни, но просто помещение таких животных в загоны может восстановить окружающую среду (см. рисунок 11).

РИСУНОК 11

Восстановление национального парка Сиди-Туи (Тунис)



1987 (Landsat)

1999 (Landsat)

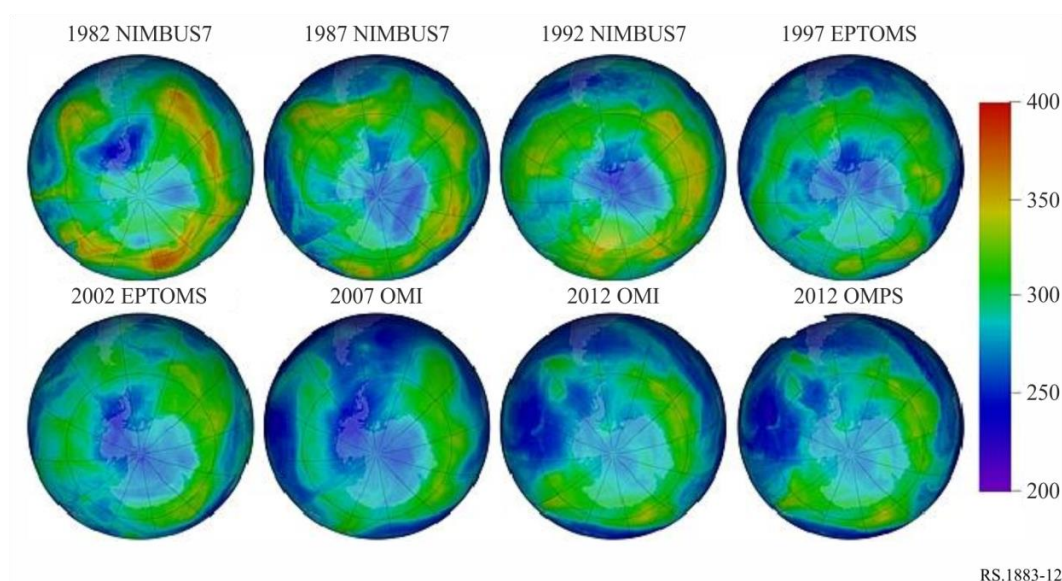
RS.1883-11

К 1987 году засуха, ведение сельского хозяйства и перевыпас привели данный район к опустыниванию. В 1993 году Тунис создал национальный парк Сиди-Туи и оградил его. К 1999 году имевшиеся луговые угодья были восстановлены (снимок зимой). Превращение пахотных земель в пустыню – необязательно необратимый процесс.

Люди также привносят в атмосферу искусственные химические вещества. В начале 1980-х годов появилось осознание того, что озоновый слой атмосферы, защищающий нас от ультрафиолетового излучения Солнца, истончается. В частности над Южным полюсом появилась озоновая "дыра", увеличивающаяся год от года. Это впервые показали данные наблюдений со спутников, а затем подтвердили наземные наблюдения. Было установлено, что причиной этого является каталитическое уничтожение озона атомными галогенами. Основным источником этих галогенов является фотодиссоциация антропогенных фреонных охлаждающих веществ, растворителей, топливных веществ и пенообразующих веществ.

РИСУНОК 12

Распределение озона над Южным полюсом



Источник: НАСА

На Конференции полномочных представителей для принятия Протокола по хлорфторуглеродам к Венской конвенции об охране озонового слоя (Монреаль, 1987 год) был подписан протокол по ограничению производства и использования этих веществ. Следствием этого явилось постепенное замедление разрушения озонового слоя. Спутниковые инструменты постоянно вели мониторинг состояния атмосферы (рисунок 12) и отображали воздействие мер, принятых в Монреальском протоколе и последующих протоколах (Лондон, 1990 год, и Копенгаген, 1992 год).

Распределение населения также влияет на климат, поскольку в настоящее время более половины населения Земли живет в городских районах. Первоначальное представление о распределении населения дают ночные наблюдения о видимом свете, исходящем из населенных районов (см. рисунок 13).

РИСУНОК 13

Ночные наблюдения освещенности населенных районов



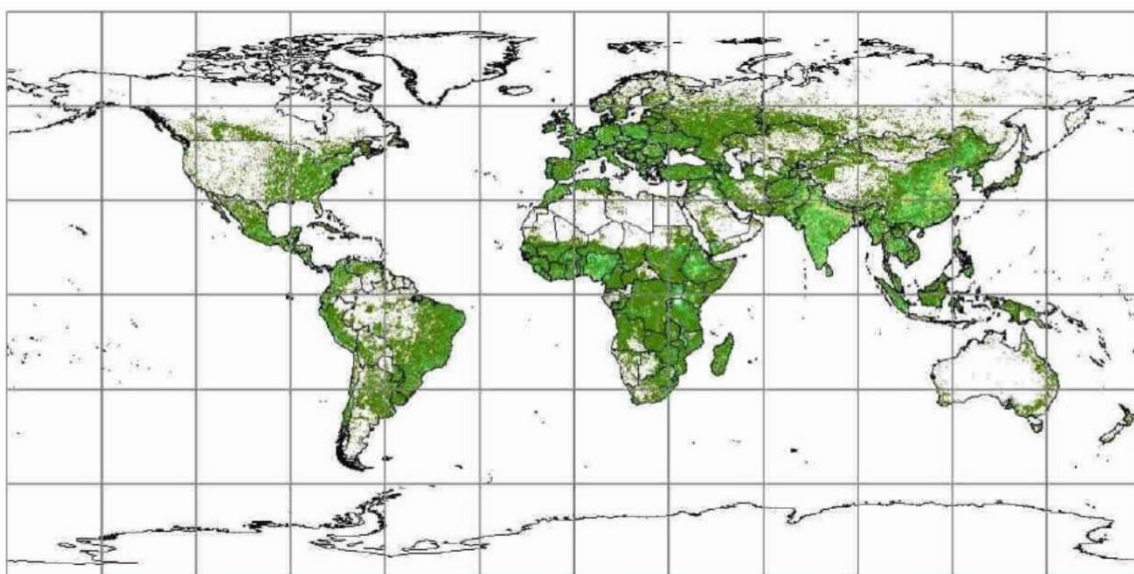
RS.1883-13

(Данные DMSP)

Тем не менее было признано, что эти наблюдения приводят к недооценке населенности развивающихся стран, где нет уличного освещения и другого ночного освещения, характерного для развитых стран. Впоследствии была разработана модель населенности, в которую к наблюдениям по ночному освещению были добавлены близость к дорогам, склоны, растительный покров и другая информация. Данные по склонам, растительному покрову и ночному освещению получаются со спутников. Эта более поздняя модель представлена на рисунке 14, ниже, и лучше представляет населенность развивающихся стран.

РИСУНОК 14

Распределение населения Земли



RS.1883-14

Население городов, расположенных у побережья, в большей степени уязвимо в отношении повышения уровня моря. Населению городов также требуется концентрация бóльшего объема ресурсов, таких как вода и продовольствие, и это оказывает дополнительную нагрузку на локальную окружающую среду. "Островки тепла", связанные с крупными городами, влияют на климат на локальном и региональном уровнях, а в долгосрочной перспективе сказываются и на глобальном климате.

6 Заключение

Датчики, находящиеся на борту спутников, предоставляют данные, необходимые для нашего понимания планеты и последствий изменения климата. Поскольку такие приборы продолжают предоставлять важные данные, то в будущем им должна быть обеспечена защита.

Приложение 2

Состояние наблюдений за основными климатическими переменными и вынуждающими факторами

В таблице A2-1 необходимые измерения, подробно представленные в таблице A2-2, приводятся в соответствии с технологиями, использованными для их получения. Необходимые измерения были получены на основе доклада Национального научно-исследовательского совета "Наука о Земле и практические применения из космоса" (Earth Science and Applications from Space, National Academies Press, Washington, DC, 2007 (Таблица 9.A.1, стр. 298–303). Документ доступен по адресу <http://www.nap.edu/catalog/11820.html>.

В таблице A2-2 перечислены, в соответствии с использованной технологией, элементы наблюдений и методы, применяемые для получения этих измерений, как в 2016 году (когда составлялось данное Приложение), так и в будущем. В таблице A2-2 обновляется информация, приведенная в вышеупомянутом докладе Национального научно-исследовательского совета США.

ТАБЛИЦА А2-1

Технологии, используемые для получения относящихся к климату измерений

Задача	Технология Изображения, получаемые с помощью РЛС с синтезированной апертурой	Радарная высотометрия	Радарная скатерометрия	Радар осадков/облачности	Радиозатмение GPS	Пассивный микроволновой формирователь изображений	Пассивный микроволновой зонд	Лидар	Оптическое (ультрафиолетовое –инфракрасное) формирование изображений	Многоспектральный оптический	Инфракрасные зонды/ спектрометры	Оптические радиометры	Измерения краевого излучения	На основании силы тяжести
Стратосферные аэрозоли								X					X	
Тропосферные аэрозоли								X		X		X		
Профиль температуры атмосферы					X		X							
Профиль воды атмосферы					X		X			X	X			
Всего воды атмосферы					X		X				X			
Свойства облаков				X		X		X		X		X		
Возгорания									X					
Газы, другие											X			
Газы, озон									X					
Газовые примеси, контролирующие озон							X				X			
Ледники/морской лед	X					X		X		X				X
Грунтовые воды						X								X
Уровень воды в озерах	X							X		X				
Наземная биомасса										X				
Растительный покров	X									X				
Индекс листовой поверхности										X				
Цвет океана										X				
Уровень океана (моря)	X	X												
Соленость океана			X			X								
Высота поверхности океана		X	X											X
Температура поверхности океана							X			X				
Ветер/состояние океана			X			X								
Вечная мерзлота, снег	X					X								
Осадки				X		X								
Радиационный баланс										X				
Речной сток	X							X		X				
Общее солнечное излучение												X		

ТАБЛИЦА А2-2

Состояние изменения климата и поддержка колебаний

Технология	Задача	Измерение	Состояние (около 2018 года)	Последующие меры (2018–2025 годы)
Изображения, получаемые с помощью РЛС с синтезированной апертурой	Вечная мерзлота, периодически промерзающая почва, снежный покров (и запас воды в снежном покрове)	В сочетании с микроволновыми радиометрами дает сочетание площади и неровности, с топографией дает запас воды в снежном покрове	РЛС с синтезированной апертурой на RADARSAT (1995 год, +), TSX (2007 год), TDX (2010 год), COSMO-SkyMeds (2007 год, +), C-SAR на серии Sentinel-1 (2014 год,+);	BRLK на METEOR-MP (2021 год); S-SAR на NovaSAR-S (2018 год); SAR-L на SAOCOM-1,2 (2018 год); SAR-P на BIOMASS (2020 год); SAR-X на METEOR-MP (2021 год); SARs на PAZ (2018 год); CSG (2018 год, +); группировка RADARSAT (2018 год, +); RISAT-1A (2019 год); TSX-NG (2018 год)
	Уровни озер	Площадь озер		
	Речной сток	Площадь озер, рек		
	Растительный покров	Растительный покров от обратного рассеяния радиолокационных сигналов	HI-1C (2012 год); COSI на KOMPSAT-5 (2013 год); PALSAR-2 на ALOS-2 (2014 год); RISAT-SAR на RISAT-1 (2012 год); SAR-C на RISAT-2 (2009 год); S-M OBRC на METEOR-M2 (2014 год); SAR-10 на Kondor-E1 (2013 год); X-SAR на TECSAR (2008 год)	
	Уровень моря	Площадь прибрежных зон		
	Ледники, морской лед, ледниковые шапки	Площадь и движение льда, толщина морского льда по топографии	SAR на RADARSAT (1995 год, +); TSX (2007 год); TDX (2010 год); COSMO-SkyMed (2007 год, +); C-SAR на серии Sentinel-1 -1B (2014,+); SIRAL на CRYOSAT-2 (2010 год); SRAL на серии Sentinel-3 (2016 год,+)	Группировка RADARSAT (2019 год); InSAR на NISAR (2021 год)
Радарная скатерометрия	Состояние моря, поверхностный ветер	Вектор поверхностного ветра	ASCAT на MetOps (2006, +); SCAT на HY-2A (2011 год); OSCAT на OceanSat-2 (2009 год); DDMI на CYGNSS (2016 год); OSCAR на ScaSat-1 (2016 год)	OSCAT на OceanSat-3 (2018 год) и SCA на METOP-SG-B (2020 год); SCAT и SWIM на CFOSAT (2018 год); SCAT на METEOR-MP, -M (2018 год); WindRAD на FY-3 (2018 год)
	Соленость моря	Поверхностная соленость, волнения на океане	KU-RFSCAT на HY-2A (2011 год); MWRI на HY-2A (2011 год);	
	Морской лед	Тип и площадь морского льда		SCA на METOP-SG-A (2022 год)
Радар осадков	Осадки	Радар осадков: вертикальный профиль интенсивности осадков	DPR на GPM (2014 год)	
		Радар облачности: интенсивность мелкого дождя	CloudSat (2006 год)	

ТАБЛИЦА А2-2 (продолжение)

Технология	Задача	Измерение	Состояние (около 2018 года)	Последующие меры (2018–2025 годы)
Радар облачности	Свойства облаков (расположение, размер капель, свойства облака из ледяных кристаллов)	Радар облачности: границы облачности, вертикальное распределение жидкой воды, интенсивность мелкого дождя	CloudSat (2006 год)	
Радарная высотометрия	Уровень моря	Высота уровня воды в океане	SSALT на серии JASON (2001 год, +); AltiKa-AMU на SARAL (2013 год); RA на HY-2A / (2011 год); SRAL на серии Sentinel-3 (2016 год,+); JASON-3 (2016 год)	KaRIN на SWOT (2020 год); SRAL на JASON-CS/ SENTINEL-6 (2018 год,+); SHIOSAI на COMPIRA (2019 год)
	Высота поверхности океана, подповерхностные течения	Высота уровня воды в океане, с которой начинаются течения	POSEIDON на серии JASON (2001 год, +); RA на HY-2A (2011 год); SRAL на серии Sentinel-3 (2016 год,+)	SRAL на JASON-CS/SENTINEL-6 (2018 год,+); KaRIN на SWOT (2020 год)
Радиозатмение GPS	Температура: вертикальные профили	Профили атмосферной температуры: до 0,5 км вертикального разрешения около поверхности	CHAMP (2000 год); COSMIC/FORMOSAT-2 (2006 год); KOMPSAT-5 (2013 год); FY-3 -C (2013 год); MetOp (2006 год, 2012 год); TDX (2010 год); TSX (2007 год); Megha-Tropiques (2011 год); OceanSat-2 (2009 год); DDMI на CYGNSS (2016 год)	COSMIC-2/FORMOSAT-7 (2018 год); FY-3D.-3F(2016–2020 годы); JASON-CS/SENTINEL-6 (2021 год); GRACE-FO (2018 год); METEOR-M-N3, METEOR-MP-N1,-N3 (2018 год); METOP-SG-A,-B (2022 год)
	Водяной пар: колонка данных о количестве, вертикальные профили	Профили водяного пара: до 0,5 км вертикального разрешения около поверхности		
Лидар	Тропосферные аэрозоли: местоположение и характеристики	Вертикальный профиль концентрации аэрозолей, размер и форма	CALIPSO (2006 год)	ATLID на EarthCare (2019 год)
	Стратосферные аэрозоли: местоположение и характеристики	Вертикальный профиль концентрации аэрозолей, размер и форма		
	Характеристики облаков (местоположение, размер капель, характеристики размера кристаллов ледяных облаков)	Верхняя граница для оптически тонких облаков с поляризацией, фаза частиц		
	Ледники, морской лед, ледниковые шапки	Поднятие льдов	GLAS на ICESat (2003 год)	
	Уровни озер	Повышение уровня воды		
Речной сток	Высотометр лидар: уровни рек	ICESat (2002 год)		

ТАБЛИЦА А2-2 (продолжение)

Технология	Задача	Измерение	Состояние (около 2018 года)	Последующие меры (2018–2025 годы)
Пассивные микроволновые формирователи изображений	Характеристики осадков и облаков	Интенсивность дождевых осадков и жидкой воды в облаках	GMI на GPM (2014 год); SSM/I на серии DMSP (1987 год, +); SSMIS на серии DMSP (2003 год, +); MWRI на серии FY-3 (2008 год, +); MWR на серии Sentinel-3 (2016 год,+)	SSM/IS на DMSP (2020 год); MWI на METOP-SG-A (2022 год); MWR на Sentinel-3B (конец 2017 года)
	Ледники, морской лед, ледниковые шапки	Ледники, масштабы морского льда	SSM/I на серии DMSP (1987 год, +); SSMIS на серии DMSP (2003 год, +); AMSR-2 на GCOM-W1 (2012 год); MWRI на HY-2A (2011 год)	
	Снежная масса	Содержание воды в снеге	SSM/I на DMSP (1995 год, +); AMSR-2 на GCOM-W1 (2012 год)	
	Грунтовые воды	Влажность почвы за исключением районов, покрытых ледяным снегом и густо поросших лесами	MIRAS на SMOS (2009 год); Radiometer на SMAP (2015 год); SSM/I на серии DMSP (1987 год, +); SSMIS на серии DMSP (2003 год, +); MWRI на серии FY-3 (2008 год, +); VIIRS на SNPP (2011 год) и NOAA-20 (2018 год)	
	Соленость моря	Поверхностная соленость	Радиометр SMAP на SMAP (2015 год); MIRAS на SMOS (2009 год)	
	Состояние моря, поверхностный ветер	Скорость поверхностного ветра	SSM/I на серии DMSP (1987 год, +), SSMIS на серии DMSP (2003 год, +); Windsat на Coriolus (2003 год); AMSR-2 на GCOM-W1 (2012 год); MTVZA-GY на серии Meteor-M (2009 год, +); MWRI на HY-2A (2011 год)	

ТАБЛИЦА А2-2 (продолжение)

Технология	Задача	Измерение	Состояние (около 2018 года)	Последующие меры (2018–2025 годы)
Пассивный микроволновой зонд	Вертикальные профили температур	Профиль атмосферных температур	MSU с 1979 года. В настоящее время на серии NOAA (2002 год, +); SSM/I на DMSP (1995 год, +); AMSU на Aqua (2002 год); MetOp (2006 год, +); DFMRM на FAST-T; MTVZA-GY на серии Meteor-M (2009 год, +); MWTS на серии FY-3 (2003 год, +) CrIS, ATMS на SNPP (2011 год) и NOAA-20 (2018 год)	MWS, MWI на METOP-SG-A (2022 год); MTVZA-GY-MP на METEOR-MP (2021 год)
	Характеристики атмосферных вод	Профили влажности и общие количества атмосферных вод	SSM/I на серии DMSP (1995 год, +); ATMS на SNPP (2011 год) и NOAA-20 (2018 год); Altika-RMU на SARAL (2013 год); AMSU на AQUA (2002 год); серии NOAA (1998 год, +); AMSU-A на серии MetOp (2006 год, +); SSM/T на серии DMSP (1999 год, +); SAPHIR на Megha-Tropiques (2011 год); MTVZA-GY на METEOR-M-1 (2009 год), -M2 (2014 год); MWRI на серии FY-3 (2008 год, +) и HY-2A (2011 год); MWR на серии Sentinel-3 (2016 год, +); AMR-2 на JASON-3 (2016 год)	AMR на SWOT (2020 год); AMR-C на JASON-CS/SENTINEL-6 (2018 год); MTVZA-GP-MP на METEOR-MP (2021 год); MWI и MWS на METOP-SG-A (2022 год)
	Водяной пар: колонка данных о количестве, вертикальные профили	Инфракрасные микроволновые радиометры кругового сканирования: количество слоя водяного пара в верхних слоях стратосферы	TES, MLS на Aura (2004 год); MWR на серии Sentinel-3 (2016 год,+)	
	Газовые примеси, контролирующие озон (HCl, N ₂ O, CH ₄ , H ₂ O, HNO ₃)	Микроволновое круговое зондирование: обеспечивает вертикальный профиль стратосферного озона	MLS на Aura (2004 год)	

ТАБЛИЦА А2-2 (продолжение)

Технология	Задача	Измерение	Состояние (около 2018 года)	Последующие меры (2018–2025 годы)
	Температура поверхности и подповерхностного слоя океана	Инфракрасные микроволновые зонды: температура поверхности моря	AVHRR на серии NOAA (2000 год, +); AIRS, MODIS на Aqua (2002 год); MODIS на Terra (1999 год); VIIRS, CrIS, ATMS на SNPP (2011 год) и NOAA-20 (2018 год); GMI на GPM (2014 год); AMSR-2 на GCOM-W1 (2012 год); MWRI на HY-2A (2011 год); MIRAS на SMOS (2009 год); WindSat на Coriolus (2003 год)	
Многоспектральное оптическое формирование изображений	Радиационный баланс Земли	В сочетании с широкополосными радиометрами обеспечивает идентификацию объекта наблюдения, потоки в верхних слоях атмосферы	MODIS, CERES на Terra (1999 год); Aqua (2002 год); VIIRS, CERES на SNPP (2011 год) и NOAA-20 (2018 год)	
	Радиационный баланс поверхности			
	Тропосферные аэрозоли: местоположение и характеристики	Обеспечивают оптическую глубину, определенный вывод относительно размера над океанами и темными поверхностями	AVHRR с 1981 года, в настоящее время на серии NOAA (2002 год, +); MODIS, MISR на Terra (1999 год); MODIS на Aqua (2002 год); VIIRS на SNPP (2011 год) и NOAA-20 (2018 год)	TROPOMI на Sentinel-5P (2017 год); UVNS (Sentinel-5) на Metop-SG-A (2020 год); UVNS (Sentinel-4) на MTG (2020 год)
	Характеристики облаков (местоположение, размер капель, характеристики кристаллов ледяных облаков)	Характеристики одного фактического облачного слоя. AVHRR – размер гидрометеора VIRS, MODIS, и VIIRS – вывод относительно фазы гидрометеоров		
	Водяной пар: колонка данных о количестве, вертикальные профили	Колонка данных о количестве водяного пара из каналов ближнего инфракрасного диапазона	MODIS на Terra (2000 год); Aqua (2002 год)	
	Покрытие земной поверхности и альbedo поверхности (снежный покров, ледники, ледниковые шапки в других местах)	Индекс растительности, вывод относительно альbedo поверхности	AVHRR на серии NOAA (2002 год, +); выводы относительно скорректированных спектральных альbedo; MODIS на Terra (2000 год), Aqua (2002 год); Landsat с 1973 года, -7, -8 (1999 год, 2013 год); VIIRS на SNPP (2011 год) и NOAA-20 (2018 год); MSI на Sentinel-2A/B (2015/2017 годы)	

ТАБЛИЦА А2-2 (продолжение)

Технология	Задача	Измерение	Состояние (около 2018 года)	Последующие меры (2018–2025 годы)
	Покрытие земной поверхности и альbedo поверхности (не снежный покров, ледники, ледниковые шапки)	Гиперспектральный формирователь изображения: типы растительности, почвенно-растительный покров	Hyperion на EO-1 (2000 год)	
	Уровни озер, рек	Гиперспектральный формирователь изображения: площади озер, рек	Landsat с 1973 года, -7, -8 (1999 год, 2013 год)	
	Наземная биомасса, доля фотосинтетически активной радиации; индекс листовой поверхности	Вегетативный индекс	Данные AVHRR с 1979 года, на серии NOAA (2002 год, +); MODIS на Terra (2000 год), Aqua (2002 год); MISR на TERRA (1999 год); SeaWiFS (1997 год); VIIRS на SNPP (2012 год) и NOAA-20 (2018 год); MSI на Sentinel-2A/B (2015/2017 годы)	FLORIS на Flex (2023 год)
	Индекс листовой поверхности	Вегетативный индекс с высоким пространственным разрешением	Landsat с 1973 года, -7, -8 (1999 год, 2013 год); ASTER на Terra (2000 год); Hyperion на EO-1; серии SPOT (1994 год, +)	FLORIS на Flex (2023 год)
	Ледники, морской лед, ледниковые шапки	Покрытие площадей	AVHRR с 1979 года, на серии NOAA (2002 год, +); MODIS на Terra (2000 год), Aqua (2002 год); Landsat с 1973 года, -7, -8 (1999 год, 2013 год); VIIRS на SNPP (2011 год) и NOAA-20 (2018 год)	
	Температура поверхности и подповерхностно го слоя океана	Температура поверхности моря	AVHRR, данные с 1981 года, на серии NOAA (2000 год, +); MODIS на Terra (2000 год), Aqua (2002 год); VIIRS на SNPP(2011 год) и NOAA-20 (2018 год)	
Оптическое (ультрафиолетовое – инфракрасное) формирование изображений	Озон в стратосфере, тропосфере	UV-радиометр – формирователь изображения обеспечивает колонку данных о тропосферном озоне, крупные профили стратосферного озона с разрешением по вертикали	OMI на Aura (2004 год); OMPS на SNPP (2011 год) и NOAA-20 (2018 год)	UVNS (Sentinel-5)/ на Metop-SG-A (2020 год); UVNS (Sentinel-4) на MTG (2020 год)

ТАБЛИЦА А2-2 (продолжение)

Технология	Задача	Измерение	Состояние (около 2018 года)	Последующие меры (2018–2025 годы)
	Возгорание	Формирование изображения в ближнем инфракрасном диапазоне обеспечивает обнаружение очагов возгорания с высокой разрешающей способностью	Данные AVHRR с 1981 года, на серии NOAA (2002 год, +); MODIS на Terra (2000 год); Aqua (2002 год); VIIRS на SNPP (2012 год) и NOAA-20 (2018 год)	UVNS (Sentinel-5) /на Metop-SG-A (2020 год); UVNS (Sentinel-4) на MTG (2020 год)
Оптические (ультрафиолетовые – инфракрасные) радиометры/ поляриметры	Полная освещенность солнечного излучения	Прямые измерения	SORCE (2003 год); TIM на Glory (2008 год)	
	Тропосферные аэрозоли: расположение и характеристики	UV-радиометры – формирователи изображения: оптическая глубина, определенный вывод относительно поглощения для верхних аэрозольных слоев	OMI на Aura (2004 год); OMPS на SNPP (2011 год) и NOAA-20 (2018 год)	
		Поляриметры: оптическая глубина, размер, форма, альbedo однократного рассеяния		
	Характеристики облаков (местоположение, размер капель, характеристики кристаллов ледяных облаков)	Зонды 15 мкм, формирователи изображения: давление облачного слоя для фактической однослойной облачной системы и даже для оптически тонких перистых облаков	HIRS на серии NOAA (2002 год, +); MODIS на Terra (1999 год), Aqua (2002 год); AIRS на Aqua (2002 год); CrIS на SNPP (2011 год) и NOAA-20 (2018 год)	
		Многообзорные радиометры, поляриметры	MISR на Terra (1999 год); высота облаков со стереоскопическим изображением	
Инфракрасные зонды	Газовые примеси, контролирующие озон (HCl, N ₂ O, CH ₄ , H ₂ O, HNO ₃)	Обеспечивают вертикальный профиль стратосферного озона	AIRS на Aqua (2002 год)	
	CO ₂ , CH ₄	Инфракрасные зонды	AIRS на Aqua (2002 год); только CO ₂ с OCO-2 (2014 год)	
	CH ₄	Инфракрасный спектрометр: колонка высокоточных данных о концентрации CH ₄	TES на Aura (2004 год); AIRS на AQUA (2002 год)	
	Водяной пар: колонка данных о количестве, вертикальных профилях	Количество слоев водяного пара при относительно низкой разрешающей способности по вертикали в тропосфере	Данные HIRS с 1979 года, на серии NOAA (2002 год, +); CrIS на SNPP (2011 год) и NOAA-20 (2018 год)	

ТАБЛИЦА А2-2 (окончание)

Технология	Задача	Измерение	Состояние (около 2018 года)	Последующие меры (2018–2025 годы)
		Инфракрасные радиометры с высокой разрешающей способностью обеспечивают количество слоев водяного пара при более высокой разрешающей способности по вертикали в тропосфере	AIRS на Aqua (2002 год); TES на Aura (2004 год); CrIS на SNPP (2011 год) и NOAA-20 (2018 год)	
Измерения краевого излучения	Стратосферные аэрозоли: расположение и характеристики	Измерения лимба солнца и солнечного затмения: профиль аэрозольного ослабления	Инфракрасный радиометр; SAGE II на ERBS (1984–2006 годы); SAGE III на Meteor (2002–2006 годы); SciSat (Canadian-U.S.)	
		Солнечный свет, рассеянный: профиль оптической глубины слоя аэрозолей	OMPS на SNPP (2011 год) и NOAA-20 (2018 год)	
Измерения на основании силы тяжести	Ледники, морской лед, ледниковые шапки	Масса льда, когда это сочетается с топографическими измерениями		GRACE-FO (2018 год)
	Грунтовые воды	Масштабные грунтовые воды (требуют дополнительных наблюдений на месте)		
	Течения на поверхности, под поверхностью океана	Сдвиги подповерхностной или баротропной массы (рассчитанные в связи с измерениями высотомера поверхности)		