

Космическая диагностика климатической системы Земли

И.Н.Гансвинд

Научный геоинформационный центр РАН (Москва, Россия)

Постоянно увеличивающийся объем данных наблюдений Земли из космоса с помощью различных спутников даст возможность изучать климат и погоду на планете, сочетая сведения о динамике атмосферы, океана и льда, в целях прогнозирования климатических изменений. Климатическая и погодная системы зависят от температурных режимов океана и его взаимодействия с атмосферой. Глобальные наборы данных по океанической альтиметрии вкупе с распределениями температуры и солености по глубине позволяют строить топографию океана, которая демонстрирует повышение уровня Мирового океана, и выявлять общую циркуляцию вод. Надежным индикатором изменений служит состояние ледяного и снежного покровов. Как следует из спутниковых и наземных наблюдений, площадь ледников в Якутии (Восточная Сибирь) за последние 60 лет сократилась на 60%. Корреляции, установленные между свойствами аэрозолей и облачностью, стимулируют изучение влияния этих образований на энергетический баланс планеты и, следовательно, на ее климат.

Семь высокотехнологичных спутников летают в составе свособразного поезда A-train, обеспечивая мониторинг состояния облаков, температуры атмосферы и земной поверхности, скорости ветра и давая основу для их совместного анализа. Последним в этой группировке стал спутник Orbiting Carbon Observatory-2, предназначенный для контроля концентрации важнейших парниковых газов. А спутники на низких околоземных орбитах ведут измерения с высокой точностью гравитационного и магнитного полей Земли.

Систематизация накопленного объема разнородных спутниковых данных, их усвоение в моделях и превращение в базы знаний позволит снизить уровень неопределенности в сценариях динамики климатической системы Земли.

Ключевые слова: динамика климата, глобальные спутниковые наблюдения, энергетический бюджет Земли, система атмосфера-океан-криосфера, спутниковые измерения гравитационного и магнитного поля.

После того как 60 лет назад был запущен первый искусственный спутник Земли (юбилей советского прорыва в космос отмечается в октябре), открылись новые возможности изучения нашей планеты с околоземных орбит. Параметры, определяемые со спутников в интересах наук о Земле, относятся к числу так называемых климатоформирующих. Стабильный тепловой режим на планете соответствует близости ее глобального энергетического баланса к равновесному. Океан и атмосфера перепоят избыточную тепловую энергию, приходящую на верхнюю границу атмосферы в тропиках, в высокие широты. Получение данных об отдельных звеньях тепловой машины — атмосфере, океане, криосфере и связях между ними — основная задача космической диагностики Земли как системы. Результаты спутниковых измерений характеризуют взаимодействие атмосферы с приходящим солнечным излучением и собственным излучением



Игорь Николаевич Гансвинд, старший научный сотрудник лаборатории систем космического мониторинга Научного геоинформационного центра РАН (Москва). Область научных интересов — системы управления и навигации космических летательных аппаратов.

Земли, распределение в ней газов, создающих парниковый эффект, структуру облачности, роль аэрозолей.

Океан, занимающий большую часть поверхности Земли, оказывается самым инерционным звеном тепловой машины: его изменчивость существенно влияет на климат. Для спутникового мониторинга доступны данные об океанической топографии, температуре поверхности, солености вод, скорости и направлении ветра в приповерхностном слое, параметрах поля волн (высоте, направлении и длине волны), цвете водной поверхности, цир-

куляции вод Мирового океана и изменении его уровня за время наблюдений, характере взаимодействия в системе «океан—атмосфера».

Спутниковые наблюдения позволяют получать данные о множестве образований криосферы — от ледяных облаков до горных пород с подземными льдами, оценивать состояние полярного ледяного щита, ледниковых покровов, возраст и сплоченность морских льдов, динамику промерзания—оттаивания почвы в зонах вечной мерзлоты. Влияние криосферы на Мировой океан проявляется в подъеме его уровня, связанного с таянием льда в Гренландии и Антарктиде, а также в распреснении и появлении слоя более легкой воды в районах формирования арктических глубинных вод.

Определяющее влияние на устойчивость климатической системы оказывают глобальный цикл углерода и гидрологический цикл. Факторы, на них влияющие, также подлежат спутниковой диагностике.

Важно отметить, однако, что одних только спутниковых данных недостаточно для их усвоения в моделях, необходимы наземные наблюдения, расширяющие и верифицирующие космические.

Прогноз нуждается в информации для модели

Климатообразующие процессы на Земле диагностируются космическими средствами уже на протяжении нескольких десятилетий, причем возможности методов постоянно расширяются. Когда срок активного существования аппаратов истекает, наиболее многообещающие миссии возобновляются — запускаются новые спутники с усовершенствованными приборами при сохранении преемственности [1].

Спутниковые системы наблюдения производят сотни миллионов измерений различных параметров природных процессов в сутки. Огромный объем информации, накопленный за время глобального космического мониторинга Земли, требует структурирования, чтобы выявить системные связи и скрытые закономерности, отражающие многоаспектные взаимоотношения между разнородными измерениями, комплексное использование которых стало серьезной проблемой. Хотя факт изменения глобального климата к концу XX в. стал несомненным, оценки вкладов различных факторов в потепление климата, особенно количественные, вызывают споры. Наличие многолетних рядов непрерывавшихся наблюдений позволяет ранжировать природные процессы на временной шкале, находить амплитуды естественных колебаний теплового и динамического режимов на разных пространственно-временных масштабах и выделять на этом фоне вклад антропогенных факторов. Главная задача при этом — усвоение большого объема спутниковых данных в имеющихся

и новых моделях, причем не только генерация баз данных, но и выявление тенденций и создание экспертных систем (баз знаний).

Разумеется, реальные природные системы гораздо сложнее, чем их отображение в математических моделях. При моделировании выделяют те компоненты, которые, скорее всего, играют первостепенную роль, пренебрегая не столь существенными, а также трудно представимыми количественно. Далее, путем целого ряда предположений, объект заключается в рамки описания определенной математической теорией, которая должна предоставить эффективные методы расчетов на основе имеющегося массива экспериментальных данных.

Современные модели климата основаны на численном моделировании климатической системы как диссипативной динамической системы циркуляции атмосферы и океана. Энергия, питающая тепловые и динамические процессы в атмосфере, океане и на суше, поступает от Солнца. Приходящее солнечное излучение, поглощенное атмосферой и земной поверхностью, отраженное и рассеянное в космос, и собственное излучение Земли формируют глобальный энергетический бюджет планеты.

Наиболее совершенные модели с хорошей точностью воспроизводят основные черты атмосферной циркуляции. Вместе с тем практически всем им свойственны систематические ошибки в представлении климатической картины. К числу существенных трудностей численного моделирования относится задача учета процессов взаимодействия океана и атмосферы, источником неопределенностей остаются и биосферные процессы. В качестве основы для полной теории климата, которую еще предстоит создать, рассматриваются модели общей воздушно-водной циркуляции с учетом суши и морского льда. Но уже сегодня совместные модели циркуляции атмосферы и океана находят применение в качестве инструмента для сезонных прогнозов погоды.

Метеорологические прогнозы на срок от 30 сут до двух лет называются долгосрочными. Они представляют собой распределение вероятностей состояний атмосферы на период прогноза. Динамическая неустойчивость течений в атмосфере определяет ее внутреннюю изменчивость, по сравнению с которой более медленные вынуждающие воздействия рассматриваются как факторы, способные оказать влияние на систематические характеристики атмосферной циркуляции. К ним относятся аномалии температуры поверхности океанов, температура и влажность почвы, протяженность и толщина морского льда, состояние снежного покрова. Иначе говоря, атмосфера рассматривается как часть системы «атмосфера — деятельный слой подстилающей поверхности».

Итак, для моделей климата и метеорологического прогнозирования нужно знать параметры процессов взаимодействия излучения Солнца

и собственного излучения Земли с атмосферой. Мониторинг содержания в атмосфере парниковых газов и образований в ней (облачности, аэрозольных частиц) позволяет проводить прямые измерения рассеяния и ослабления света облаками и осадками, атмосферными аэрозолями, различать в облаках капельную влагу и частицы льда, определять тонкую структуру облаков, их влажность и интенсивность осадков.

Характеристики системы «атмосфера—поверхность», необходимые для прогностических расчетов, поставляют, наряду с наземными станциями метеонаблюдений, полтора десятка космических спутников. Среди них выведенный в конце октября 2011 г. на полярную солнечно-синхронную орбиту спутник НАСА NPP (National Precipitation Project), переименованный впоследствии в SuomiNPP в честь Вернера Е.Суоми, отца спутниковой метеорологии. На борту спутника установлены пять приборов, обеспечивающих измерения температуры поверхности океана, суши, построение профилей температуры и влагосодержания атмосферы, а также зондирование образований в ней. Два радиометра предназначены для получения характеристик альbedo и радиационного баланса Земли.

Когда альbedo, или отражающая способность, возрастает, больше приходящей солнечной радиации возвращается в космос. Снижение альbedo приводит к увеличению нагрева. Изменение нагрева всего на 1% дает радиационный эффект 3.4 Вт/м², сопоставимый по результату с удвоением содержания CO₂. Как показали исследования с использованием измерений со спутников Terra, Aqua, SuomiNPP, отступление льдов в Северном Ледовитом океане значительно больше, чем ожидалось, уменьшает альbedo Земли. Между 1979 и 2011 гг. альbedo Арктики уменьшилось с 52 до 48%. Снег и лед хорошо отражают свет [2], но, когда они тают, альbedo понижается. Леса имеют более низкое альbedo, чем открытое пространство, поэтому сведение лесов приводит к повышению отражения. Аэрозоли влияют на альbedo двояким образом. Прямое влияние состоит в отражении света в космос. Косвенный эффект заключается в том, что частицы аэрозолей служат центрами конденсации влаги и участвуют в формировании и динамике облачности. Облака же, с одной стороны, отражая солнечный свет, охлаждают Землю, а с другой — удерживая уходящее собственное тепловое излучение Земли, дают эффект нагрева.

Без привлечения спутников альbedo можно измерить с помощью так называемого пепельного света Луны. Это свет, сначала отраженный Землей, а затем посланный Луной обратно к Земле. В каждом наблюдении рассматривается примерно треть планеты, некоторые области остаются невидимыми. Подобные наблюдения выполняются в узком диапазоне длин волн 0.4–0.7 мкм и проводятся лишь изредка.

С запуском в феврале 2015 г. космического аппарата DSCOVR (Deep Space Climate Discovery) в интересах НАСА, NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) и Военно-воздушных сил США измерения альbedo Земли перенесены в глубокий космос и ведутся на постоянной основе.

Космический разведчик

Аппарат DSCOVR — эта климатическая обсерватория в дальнем космосе находится на орбите в окрестности точки Лагранжа 1 (L1), примерно в 1.5 млн км от нас на линии Земля—Солнце (рис.1), откуда можно увидеть всю освещенную светилом планету от рассвета до заката с угловым размером от 0.45° до 0.53° (для сравнения: угловой размер наблюдаемой человеком полной Луны как раз равен 0.5°). Оси визирования приборов обсерватории, стабилизированной по всем трем осям, направлены на Солнце и на Землю одновременно. Что же измеряет эта аппаратура?

За нашим светилом следит комплекс приборов PlasMag (Plasma Magnetometer), который предназначен для наблюдения солнечного ветра, состоящего в основном из протонов и электронов —

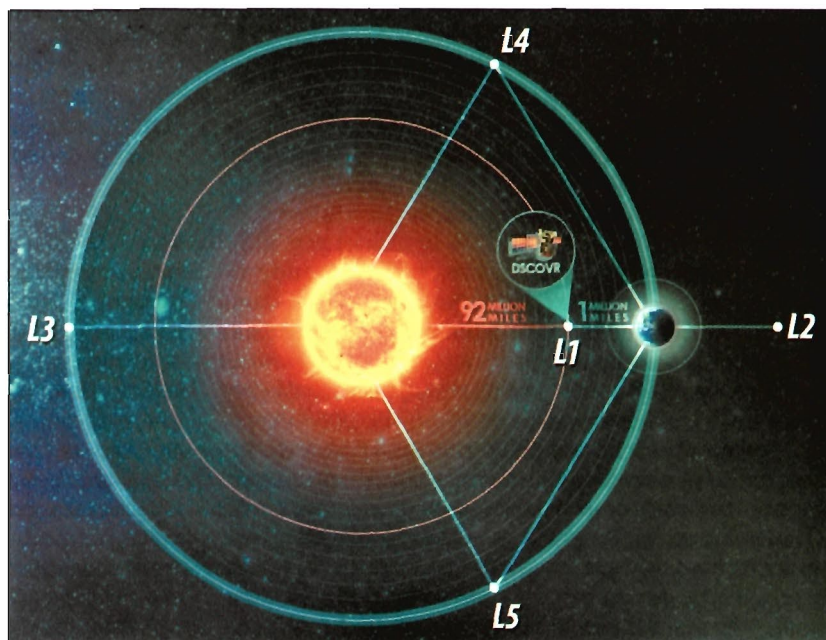


Рис.1. Климатическая обсерватория DSCOVR в точке Лагранжа L1.

непрерывного потока плазмы, распространяющегося от Солнца приблизительно в радиальных направлениях. Энергия магнитного поля, накопленная в активных областях Солнца, расходуется на ускорение миллиардов тонн вещества корональных выбросов, уносящего в межпланетную среду «вмороженное» магнитное поле.

PlasMag состоит из трех частей: векторного магнитометра, детектора положительно заряженных ионов и спектрометра электронов. Измерения в точке L1 позволяют следить за «космической погодой», исследовать влияние солнечных событий на земные процессы, обнаруживать опасные для наземной инфраструктуры корональные выбросы, получать их характеристики, чтобы за 15–60 мин предупредить об опасности для уязвимых объектов на Земле и в околоземном пространстве.

Солнечное излучение, проходя через атмосферу, взаимодействует с ней и с поверхностью Земли в процессах поглощения, отражения и рассеяния, которые происходят на взвешенных частицах — аэрозолях — и на молекулах. Коэффициенты рассеяния на молекулах очень быстро убывают с ростом длины волны: существенное значение имеет зависимость от частоты и коэффициента молекулярного поглощения. Процессы с участием аэрозольных частиц «завязаны» на частоту в меньшей степени. Величина оптической толщины атмосферы в красной части спектра заметно меньше, чем в фиолетовой. Ее зависимость от длины волны позволяет судить о соотношении между молекулярной и аэрозольной составляющими атмосферы.

Оптические характеристики атмосферы Земли изучаются с помощью ориентированного на нее комплекса NISTAR (National Institute of Standards & Technology absolute Radiometer), состоящего из трех полостных радиометров — полного (интегрального по спектру), отраженного и собственного излучения, усредненного по освещенному полушарию:

- в канале 0.2–100 мкм устанавливается суммарная мощность излучения в ультрафиолетовом, видимом и дальнем инфракрасном диапазонах;
- в канале 0.2–4 мкм контролируется отраженное солнечное излучение от УФ до ближнего ИК;
- в канале 0.7–4 мкм регистрируется тепловое излучение Земли.

Радиометр измеряет плотность потока излучения освещенной Солнцем поверхности Земли, чтобы уточнить энергетический бюджет планеты. Зная полную энергию, выходящую через внешнюю границу атмосферы, и освещенность внешней границы атмосферы солнечным излучением, получим альbedo Земли как отношение этих величин.

Видовая полихроматическая камера EPIC (The Earth Polychromatic Imaging Camera) формирует изображения Земли в десятках узких спектральных каналов от ультрафиолетового до ближнего инфракрасного. Изображения сразу всей освещенной



Рис.2. Вид освещенной стороны Земли по наблюдениям полихроматической камеры обсерватории DSCOVR.

части планеты (рис.2) позволяют наблюдать глобальные характеристики облачного покрова, распределение аэрозолей, толщину озонового слоя, вегетационные характеристики растительности, перемещения масс пыли и вулканического пепла.

На множестве изображений были неожиданно обнаружены яркие световые отблески как над океаном, так и над сушей. За время с июня 2015 г. исследователи зафиксировали и изучили [3] 866 вспышек и снабдили каждую данными о географической широте, углах рассеяния света и другой относящейся к делу информацией. Выяснилось, что вспышки над сушей обусловлены отражением света от тонких кристаллов льда в облаках, находящихся в горизонтальном положении. Обнаруженные из глубокого космоса тропосферного льда можно использовать для вероятностной оценки содержания в атмосфере ориентированных ледяных кристаллов и их вклада в альbedo. Ранее горизонтально ориентированные кристаллы льда в облаках были отмечены по данным спутника с лидаром CALIPSO (The Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation). Лидар с твердотельным лазером излучает короткие импульсы с высокой частотой в узком луче. Наблюдается сигнал обратного рассеяния фотонов: возвращается порядка 12% фотонов от молекулярного рассеяния на аэрозолях. По величине сигнала и его поляризации можно определить верхнюю границу облаков, водной и ледяной фаз в них, характеристики аэрозоля в стратосфере, концентрации газов.

В радиодиапазоне излучение с длинами волн больше 1 см проходит через облачный покров (закрывающий в среднем 55% земной поверхности) и позволяет наблюдать внутриоблачные процессы, а также процессы в пространстве между облаками и поверхностью Земли; по оптическим

и ИК-каналам такие наблюдения невозможны, поскольку они относятся лишь к верхнему слою облаков (от десятков до сотни метров). В радиодиапазоне наблюдаемую интенсивность излучения при данной длине волны характеризуют радиояркостной температурой. Современные ИК- и СВЧ-радиометры регистрируют собственное излучение суши, поверхности Мирового океана и атмосферы. На базе многолетних СВЧ- и ИК-радиометрических спутниковых наблюдений разработаны методы их использования для оценки теплового и динамического взаимодействия в системе «океан—атмосфера». Спутниковые данные позволяют установить общее влагосодержание атмосферы, среднесесячные значения которого коррелируют со среднесесячными значениями влажности и температуры приземного воздуха и в сочетании с измерениями температуры поверхности океана характеризуют потоки влаги и тепла в контактном слое океана и атмосферы [4]. Были использованы данные СВЧ-радиометрических приборов SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager), установленных на американских космических аппаратах серии DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) за период 1988–1998 гг.

В декабре 2001 г. на полярную солнечно-синхронную орбиту был выведен «Метеор-ЗМ», первый из российской серии спутник, оснащенный многоканальным температурно-влажностным зондировщиком атмосферы МТВЗА, возможности которого сочетают функции трех СВЧ-радиометров спутников DMSP: SSM/I, SSM/T, SSM/T2. На космическом аппарате «Метеор-ЗМ» №2 установлены оптико-микроволновой сканер МТВЗА-ОК (его уникальная особенность - совмещенное синхронное сканирование оптического блока с семью каналами, включая тепловой ИК- и СВЧ-блоки).

По спутниковым данным за интервал 2004–2015 гг. разработаны сетевые сервисы геоportала глобального радиотеплового поля системы «океан—атмосфера» [5].

Океанические высоты

Перенос энергии океаном от низких широт к высоким осуществляется потоком теплых вод в поверхностных слоях, тогда как потоки холодных и соленых вод у дна океана направлены к экватору. Отдельные бассейны Мирового океана различаются по температуре и солености, что вызывает межконтинентальную циркуляцию, играющую значительную роль в тепловой машине Земли. Поэтому первостепенное значение в наблюдениях климата имеет глобальная система мониторинга Мирового океана. Сочетая спутниковые и прямые средства, она служит как фундаментальным научным, так и прикладным целям.

В январе 2016 г. была выведена на орбиту уже четвертая с 1992 г. океанографическая станция

для точных измерений высоты поверхности океана — Jason-3, продолжающая международную кооперацию NOAA (США) и EUMETSAT (European Organization for the Exploration of Meteorological Satellites). Сейчас она работает в паре с Jason-2, которая с 2008 г. успешно измеряет высоту водной поверхности относительно земного эллипсоида, принятого в навигационной модели спутников. Индийско-французский спутник SARAL с 2013 г. поставляет данные о расстоянии до поверхности океана с погрешностью 8 мм. Дальнейшие измерения будут проводиться серией спутников Sentinel-3 Европейского космического агентства (ESA), первый из них был запущен в феврале 2016 г., а следующий планируется вывести на орбиту в 2021 г. Метод измерения высоты спутника над водной поверхностью с помощью импульсного высотомера требует точного знания относительного положения спутника, для чего нужны точные траекторные определения и измерения времени прохождения сигнала до поверхности океана и обратно.

Волнение усредняется за счет того, что площадь, освещаемая радиолокационным дальномером, имеет диаметр в несколько километров. Траекторные измерения орбиты спутника и его положения на орбите позволяют вычислить текущее расстояние до центра Земли. Разность двух величин дает расстояние от центра Земли до водной поверхности в подспутниковой точке. Несмотря на неопределенности модели (постоянно совершенствуемой на основании данных спутниковых измерений гравитационного поля Земли об этом речь пойдет дальше), использование накопленных многолетних данных о распределении температуры и солености морской воды по глубине позволяет восстанавливать топографию океана по альтиметрическим измерениям отклонений высоты поверхности моря от средних ее значений вдоль трассы спутника [6].

Существенным дополнением к дистанционным спутниковым наблюдениям служит всемирная сеть океанографических станций АРГО, состоящая из 3000 дрейфующих пьющих буйев, измерителей температуры и солености морской воды на разных горизонтах. Это глобальный научный проект международного общества океанологов с участием 50 организаций из 26 стран.

Масштабная наблюдательная система спутниковой альтиметрии и зондирующих буйев АРГО — основа исследований пространственно-временной изменчивости уровня моря, циркуляции вод в Мировом океане, переноса тепла, накопленного водой, призванная решать следующие задачи:

- изучить структуру вод Мирового океана и ее изменчивость;
- уточнить характер циркуляции вод в Мировом океане;
- выяснить роль Мирового океана в климатической системе.

Океаническая топография заставила пересмотреть представления об океаническом волнении, характере динамических процессов на всех пространственно-временных масштабах — вихрей, фронтов, апвеллингов, волновых процессов (волн Россби, волн Кельвина), явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Дистанционные наблюдения поверхности моря, прежде всего спутниковая альтиметрия, вместе с данными зондирующих буев служат источниками информации для расчетов по соответствующей модели, предоставляющих оперативную картину изменчивости океана.

Ледяной SOS

Спутниковые данные о динамике природных систем, состоящих из снега и льда, дают прямые свидетельства изменений окружающей среды. Изучение процессов в криосфере как комплексного индикатора изменений природной среды — один из приоритетов наук о Земле. Площадь льдов, покрывающих Арктику, уменьшилась за 1979–2011 гг. на 40%. По данным Института мерзлотоведения СО РАН, высота горных ледников Якутии сократилась за последние 60 лет на 70%, а их площадь съезжилась почти на 40% [7]. Одно из самых холодных мест Северного полушария — север Янского плоскогорья в Якутии с сухим и резко континентальным климатом. И тем не менее в 1967–2010 гг. здесь более чем на 1° увеличилась средняя летняя температура воздуха, а средняя зимняя возросла еще сильнее, на 2 с лишним градуса. Увеличилось поступление летних атмосферных осадков и сократилось поступление зимних. Изменение климата вызвало усиление термоденудации — криогенного разрушения горных пород с переносом продуктов разрушения в пониженные участки. В Верхоянском уезде вблизи р. Батагайки образовался гигантский термокарстовый котел с километр в длину и глубиной 100 м. Динамика развития форм разрушения льдистых пород прослеживается на спутниковых снимках начиная с 1968 г. У «Батагайского чуда» найден и палеоботанический аспект: при оттаивании вечной мерзлоты обнаружались останки древнейших животных и древнейших растений. Из ископаемых семян возрастом 32 тыс. лет удалось прорастить способные к цветению и размножению растения [8]. Отсутствием льдов в Северном Ледовитом океане существенно уменьшается альбедо Арктики: с 1979 по 2011 г. его значение уменьши-

лось с 52 до 48%. Космический аппарат ICESat-1 (Ice Cloud and Land Elevation Satellite) в системе наблюдения Земли НАСА, используя лазерные технологии, проводил измерения высоты ледяного щита в течение семи лет (до 2010 г.). На 2018 г. планируется запуск аппарата ICESat-2. Сравнение с данными, полученными ранее, позволит оценить динамику границ и объема ледовых щитов Гренландии и Антарктиды за 15-летний период и выявить тенденции изменения толщины морского льда.

Заметное изменение условий взаимодействия в системе «воздух—вода—лед» влияет на характеристики поля волнения в прибрежных морях, эрозию берегов, условия судоходства и вместе с тем на проектные требования к судам и добывающим платформам.

Понижение альбедо подстилающей поверхности, обусловленное таянием морского, ледяного и снежного покрова, а также ледников на суше приводит к усилению потепления в Арктике за счет обратной связи: чем меньше отражение, тем большая часть солнечного излучения поглощается поверхностью, что усиливает таяние и провоцирует дальнейшее падение альбедо.

Вклад в подъем уровня Мирового океана от таяния льда в Гренландии и Антарктиде с большой неопределенностью оценивается в 0.35 мм/год (что составляет 10% наблюдаемой среднегодовой скорости подъема океанического уровня), точность оценок существенно возросла благодаря спутниковым измерениям вариаций гравитационного поля Земли (об этом чуть ниже), а также дистанционными наблюдениями за изменениями высоты поверхности ледового покрова (рис.3). Основная часть подъема уровня океана приходится на тепловое расширение воды. Прямые измере-

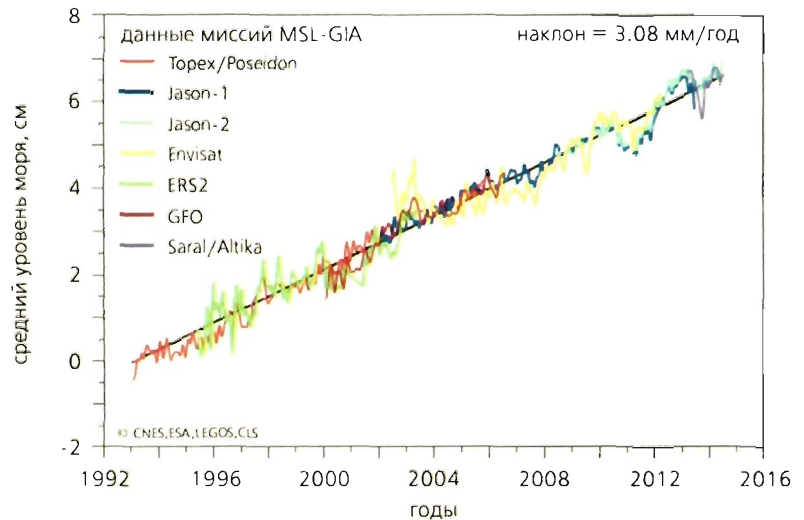


Рис.3. Подъем уровня Мирового океана за период спутниковых измерений высоты поверхности моря.

ния повышения температуры океана на глубине до 2000 м объясняют около 32% наблюдаемой среднегодовой скорости подъема океанического уровня. Незатронутыми потеплением климата остаются глубины океана (в силу огромной тепловой инерции и отсутствия сильных течений).

Вообще изучение влажности почвы и ее заморозания — оттаивания в глобальном масштабе — важнейшее направление исследований Земли. В 2010 г. влажность почвы была признана существенной климатообразующей переменной. Влажность почвы — характеристика водообмена между атмосферой, почвой и грунтовыми водами — один из определяющих факторов круговорота воды в природе. Мониторинг распределения влаги в почве дистанционными методами с использованием радиометрических измерений в СВЧ- и ИК-диапазонах ведет начало с октября 1978 г., обеспечивая регулярное поступление сравнительно однородных данных, которые помимо научных применений в моделях климата используются на практике для прогнозов наводнений и засух, а также урожайности сельскохозяйственных культур. На измеряемую с помощью СВЧ-радиометра излучательную способность суши или водной поверхности одинаково влияют и влажность почвы, и соленость вод океана, что позволяет по данным измерений периодически формировать как карты полей солености, так и карты влажности почвы. Соленость поверхностного слоя океана наряду с температурой определяет плотность воды и сказывается на глубине циркуляции и меридиональном переносе тепла. Поля солености, их сезонная и межгодовая изменчивость, — один из факторов, влияющих на поглощение и выделение двуоксида углерода и тем самым контролирующим цикл углерода в океанических районах Земли. И следовательно, они имеют прямое отношение к глобальному потеплению.

Свидетельства изменений земного климата в прошлом столетии и последних десятилетиях, как известно, вызывают обеспокоенность политиков, экономистов, экологов из-за возможных неблагоприятных последствий для окружающей среды и устойчивого развития. Потепление объясняют существенным возрастанием концентрации в атмосфере парниковых газов (прежде всего углекислого газа и метана), поглощающих тепловое излучение земной поверхности в ИК-интервале. Стратегия, предлагаемая Киотским протоколом, предусматривает ограничение промышленных выбросов углекислого газа [9].

На смену Киотскому протоколу пришло Парижское соглашение по климату, принятое 12 декабря 2015 г. по итогам 21-й конференции Рамочной конвенции об изменении климата (РКИК, 1992 г.) в Париже. Делегации со всего мира пришли к соглашению, что для предотвращения необратимых последствий для экологии человечеству необходимо удержать рост средней темпера-

туры на планете в пределах 1.5–2° по отношению к соответствующему показателю доиндустриальной эпохи.

В 2015 г. было зафиксировано превышение средней температуры планеты более чем на 1°С по сравнению с XIX в., когда начались наблюдения за изменением температуры.

Регулярные наблюдения уровня концентрации атмосферного диоксида углерода, начатые в 1958 г. Ч.Киллингом в обсерватории на Гавайях, производятся сейчас на 150 с лишним станциях по всему миру.

Установлено, что с начала индустриальной эры содержание CO₂ увеличилось более чем на 40% — с приблизительно 280 на миллион частей в объеме до примерно 400. Другими словами, сегодня 400 штук из каждого миллиона молекул воздуха — молекулы углекислого газа. Половина этого роста ведет начало с 1980 г., четверть приходится на период после 2001 г., до этого климатическая система находилась в относительно узком диапазоне изменения температуры и концентрации парниковых газов. Современное содержание CO₂ возрастает более чем на 0.5% ежегодно. Чтобы объяснить такой рост, достаточно менее половины из 36 млрд т CO₂, поступающих ежегодно в атмосферу в результате использования ископаемого топлива и других видов человеческой деятельности. Оставшаяся половина поглощается в природе: около четверти — океаном, другая четверть — биосферой суши. Природные поглотители ограничивают скорость поступления CO₂ в атмосферу. Однако процессы, контролирующие «стоки» диоксида углерода, мало изучены, наземные измерения не могут с необходимой точностью охватить большую часть земной поверхности. Вопрос о динамике CO₂ в атмосфере остается основным в проблеме глобального потепления и оценке вклада человеческой деятельности в изменения климата.

2 июля 2014 г. был выведен на солнечно-синхронную орбиту с периодом повторения трасс 16 сут космический аппарат ОСО-2 (Orbiting Carbon Observatory). Эта миссия НАСА, предназначенная для изучения CO₂ в атмосфере, позволит получить по возможности полную картину природных и технических источников углекислого газа и мест, где он покидает атмосферу. От измерительной аппаратуры космического аппарата требуется высокая точность, поскольку концентрация углекислого газа в атмосфере в региональном и континентальном масштабе меняется менее чем на 2%, а локальные вариации могут составлять и треть процента.

На борту ОСО-2 установлен комплекс из трех соосных одноцелевых спектрометров с дифракционной решеткой. Оптическая схема позволяет формировать изображения в трех узких полосах спектра. Полоса слабого поглощения CO₂ (1.61 мкм) наиболее чувствительна к его концентрации вблизи поверхности Земли. Канал погло-

щения молекул кислорода (0.765 мкм) является контрольным, поскольку молекулярный кислород равномерно распределен в атмосфере с хорошо известной концентрацией. Спектры в линии кислорода 2.06 мкм служат еще одному способу определения концентрации CO₂. Кроме того, последний канал чувствителен к присутствию аэрозолей и изменению влажности вдоль оптического пути.

Свет, попадающий в объективы спектрометров, проходит через атмосферу дважды: сначала достигая поверхности Земли, а затем отразившись от нее (рис.4). Углекислый газ и молекулярный кислород поглощают свет в своих узких полосах, и получаемые изображения могут изменяться от светлых до самых темных с малыми градациями, в зависимости от обилия этих газов на оптическом пути.

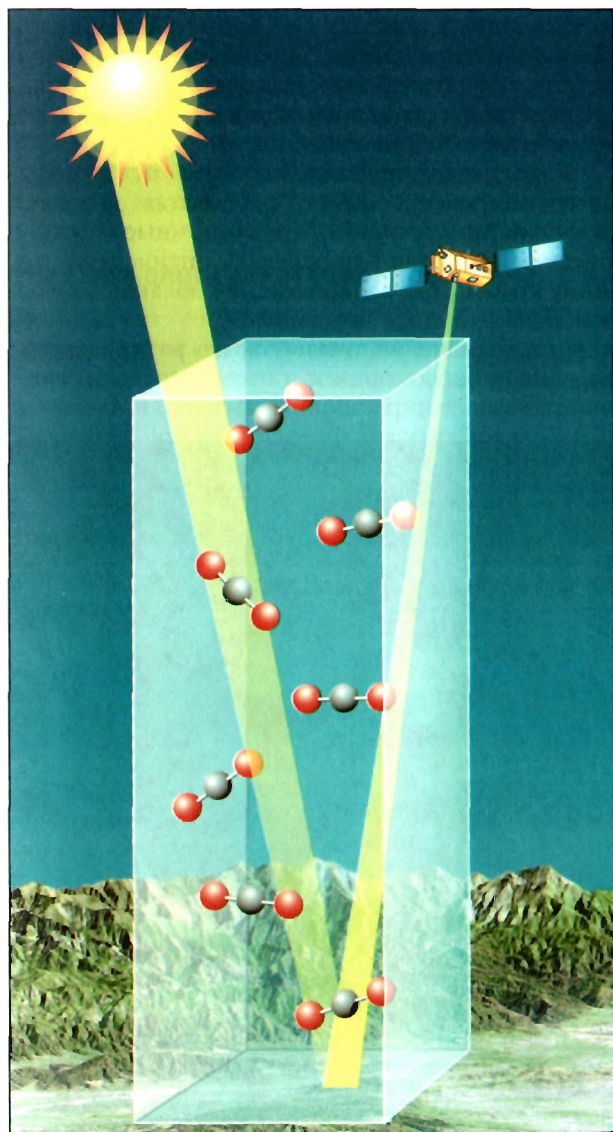


Рис.4. Орбитальная обсерватория OCO-2, картирующая глобальное распределение углекислого газа в атмосфере Земли с источниками и стоками.

Кроме «фотоохоты» на углекислый газ эта обсерватория, наблюдая солнечно-индуцированную флуоресценцию, связанную с фотосинтезом, отслеживает сезонные изменения поглощения CO₂ растениями. Целевая аппаратура OCO-2 ежедневно проводит почти 100 тыс. измерений глобального охвата. Обработку данных, построение карт и 3D-изображений динамики CO₂ в атмосфере выполняет Подразделение глобального моделирования и усвоения данных НАСА в Годдардовском космическом центре (г.Гринблат, штат Мэриленд) по программе с привлечением наземных наблюдений. Районы с наибольшим содержанием CO₂ в атмосфере — Восточный Китай, восток США, Центральная Европа и Средний Восток. Аппаратура OCO-2 позволяет различать отдельные источники диоксида углерода (такие, как города), отслеживать сезонные вариации его содержания и перенос в атмосфере [10].

Аэрозольный зонтик

Значительное влияние на климат оказывает атмосферный аэрозоль. Частицы радиусом 10⁻⁷–10⁻⁶ см присутствуют в атмосфере на всех высотах. Аэрозоль естественного происхождения попадает в атмосферу с поверхности суши и океана, а также образуется в химических реакциях между газами в атмосфере. Частицы антропогенного происхождения в основном появляются как продукты горения лесов и сжигания ископаемых топлив, но отчасти возникают и в результате изменения земных покровов.

Частицы аэрозоля поглощают и отражают солнечную радиацию главным образом в диапазоне 0.4–4 мкм, изменяя альбедо в системе «поверхность Земли — атмосфера». Аэрозольное радиационное возмущающее воздействие оказывается противоположным парниковому эффекту. Косвенное влияние аэрозоля проявляется через возрастание оптической толщины и альбедо облаков в результате уменьшения размеров и роста счетной концентрации мелких облачных капель при той же влажности облаков — за счет действия частиц аэрозоля как облачных ядер концентрации. Иначе говоря, взаимодействие аэрозоля и облаков также частично компенсирует парниковый эффект. Поэтому исследование поведения атмосферных частиц особенно важно.

На характеристики стратосферного аэрозоля на высотах 15–25 км влияют постоянно поступающие из тропосферы различные сернистые соединения, которые образуются при сжигании горючих ископаемых и выбрасываются при извержении вулканов. Двуокись серы в фотохимических реакциях окисляется до трехоксида, и в условиях влажности в атмосфере образуются капли раствора серной кислоты высокой концентрации радиусом 0.03 мкм. Аэрозольный слой такого рода заметно ослабляет солнечное излучение. На Зем-

ле около 2 тыс. действующих вулканов. Мощные вулканические извержения середины VI в. породили в Северном полушарии малый ледниковый период в Средневековье — 120-летнее похолодание VI–VII вв., которое было усилено и затянуто сопутствующим ростом ледников и морского льда в высоких широтах. Неурожай, голод, эпидемии и неизбежные тогда войны сократили население Европы на многие десятки миллионов людей.

В пале время извержение вулкана Пинатубо на Филиппинском острове Лусон 10–15 июня 1991 г. вызвало выброс около 10 м³ горных пород, самый мощный (по шкале вулканических извержений) с момента извержения вулкана Кракатау в 1883 г. Высота эруптивной колонны достигала 34 км. В стратосферу поступило огромное количество вулканического пепла и газов, и на протяжении нескольких месяцев наблюдался глобальный слой сернистого тумана. Однако при этом было зарегистрировано снижение средней температуры на планете лишь на 0,5°C и некоторое сокращение озонового слоя.

Характеристики сложных процессов, в которых участвуют излучение Солнца, водяной пар, облачность, аэрозольные частицы, газовые примеси в атмосфере, изучаются измерительными средствами, распределенными между семью спутниками (рис. 5). Последние расположены на орбитах с почти одинаковыми параметрами и пролетают над одной и той же точкой земной поверхности с интервалом в несколько минут. Группировка

спутников A-train на солнечно-синхронной орбите высотой 700 км, которая начала создаваться с 2002 г., пополняется спутниками с аппаратурой, обладающей новыми функциями или более совершенной. В 2012 г. в состав «дневного орбитального поезда» вошел японский спутник GCOM-W1 (Global Change Observation Mission — Water 1st) с микроволновым сканирующим радиометром AMSR-2 на борту, усовершенствованным вариантом радиометра AMSR-E, который длительное время служит на спутнике Aqua (с него началось создание «поезда»). Данные измерений позволяют восстанавливать паросодержание атмосферы, водозанас облаков, скорость приводного ветра и температуру поверхности океана [11]. В состав группировки A-train в июле 2014 г. вошла и орбитальная углеродная обсерватория OCO-2. С помощью трехканального дифракционного спектрометра предполагается с достаточной точностью оценить распределение источников и стоков углекислого газа на Земле, уточнить представления о цикле углерода и роли в нем природных и антропогенных процессов.

Французский спутник Parosol работает в составе группировки с 2004 г., располагая радиометром-поляриметром. Поляризационные характеристики позволяют определять оптическую толщину атмосферы, распределение облаков, изучать аэрозольный цикл в тропосфере, спектральные характеристики аэрозолей и их распределение над сушей и над морем.

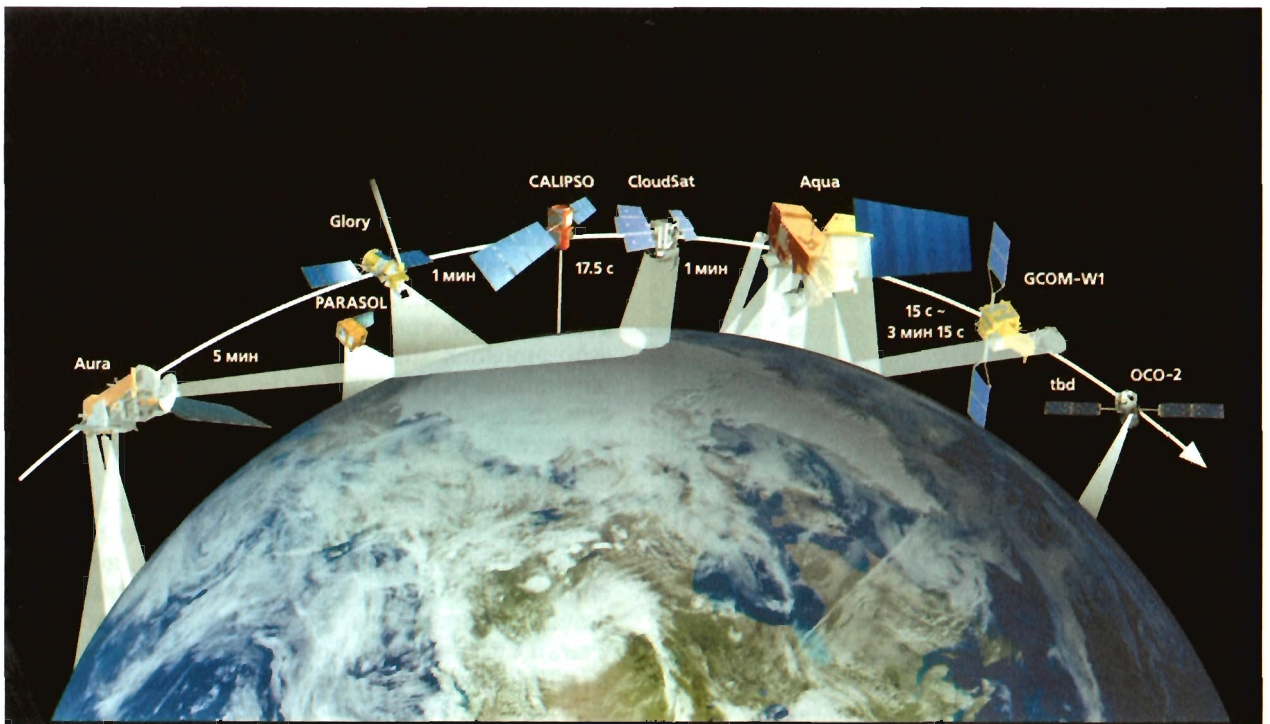


Рис. 5. Группировка из семи спутников A-train для получения климатоформирующих данных в одном пространственно-временном окне.

Спутники CALIPSO (Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) и CloudSat, вместе вошедшие в состав группировки в 2006 г., оснащены разными инструментальными средствами для получения трехмерных изображений облаков и аэрозолей. На американском CloudSat установлен радар с миллиметровой длиной волны, что позволяет различать в облаках частицы воды и льда меньшего размера по сравнению с радаром сантиметрового диапазона. За американским, не отставая более чем на 15 с, следует французский, основным инструментом которого служит лидар с ортогональной поляризацией (лидар аналогичен радару, но разница между ними состоит в том, что наблюдается сигнал обратного рассеяния, а не отражения). По величине сигнала обратного рассеяния и его поляризации, напомним, возможно восстановление физических характеристик атмосферы, определение верхней границы облаков, водной и ледяной фаз в них, оптической плотности, концентрации газов в тропосфере, характеристик стратосферного аэрозоля на высотах 15–25 км. Лидарное зондирование позволяет измерить эффективный радиус облачных капель.

Земные поля: гравитационное...

Рассказывая о дистанционном зондировании, нельзя обойти высокоточные измерения параметров гравитационного и магнитного полей Земли. Спутники на низких околополярных орбитах служат идеальной платформой для этих задач.

Эллипсоидальная форма Земли уже упоминалась — так называемый геоид, ограниченный поверхностью Мирового океана в состоянии покоя и равновесия (продолженной под материками), близок к эллипсоиду, сплюснутому у полюсов и растянутому в экваториальной зоне. От геоида отсчитывается геодезическая высота земной поверхности над уровнем моря. Но массы распределены на поверхности и в недрах неравномерно, земная кора неоднородна, что проявляется в вариациях и аномалиях гравитационного поля. Прогресс в области методов изучения гравитационного поля способствовал созданию новых моделей с улучшенными характеристиками по точности и детальности и позволил довести точность определения параметров геоида до 1–2 см. Новые модели геоида показывают, что сила тяжести на разных территориях планеты существенно варьирует. Область с самой низкой силой тяжести — Южная Индия, слабое гравитационное поле наблюдается в Североамериканском регионе. Наибольшая сила тяжести фиксируется на западе Южной Америки, в районе Кордильер, и в Австралии. Эти вариации отражают различия масс и плотностей вещества недр.

Крупными перераспределениями масс сопровождаются многие процессы на планете — прилив-

ные, гидрологические, гляциологические (в том числе течения и изменение уровня океана); дают свой вклад также тектоника плит, течения в мантии и во внешнем ядре.

Пространственные и временные вариации гравитационного поля вызваны крупномасштабными изменениями распределения масс на Земле, связанными в значительной мере с круговоротом воды, в ходе которого океан, атмосфера, суша и криосфера обмениваются запасами влаги во временных масштабах от суточных, сезонных, годовых и десятилетних. Эти подвижки масс можно соотнести с такими процессами, как сокращение ледового покрова суши, подъем уровня Мирового океана, обширные засухи и наводнения.

Мониторинг гравитационного поля Земли спутниками на возможно более низких орбитах с глобальным покрытием поверхности проводится с середины 2000 г. В марте 2002 г. с космодрома Плесецк были выведены на околополярную орбиту спутники-близнецы миссии GRACE-1, в разработке которых кроме НАСА участвовал Немецкий аэрокосмический центр DLR*.

Суть подобного исследования была бы ясна еще королевскому астроному Великобритании преподобному Невилу Масклайну. В 1772 г. в докладе Королевскому обществу он утверждал: «Если бы тяготение проявлялось так, как полагает сэръ Исаак Ньютон, действуя не только между большими телами Вселенной, но и между мельчайшими частицами, из которых они состоят, то с необходимостью следовало бы, что каждая возвышенность должна своим притяжением изменять направление силы тяготения тяжелых тел, расположенных поблизости».

Однотипные аппараты следуют один за другим на расстоянии около 200 км, изменяющимся под влиянием вариации силы тяжести. Дальномерные измерения с точностью не хуже 10 мкм позволили за 30 сут выполнять глобальный обзор гравитационного поля Земли. Высота орбиты за счет торможения в атмосфере уменьшилась за 14 лет с 500 до 360 км, солнечные батареи за это время заметно деградировали. На смену, предположительно в августе 2017 г., придет миссия GRACE-FO с аппаратурой, дополненной лазерными измерениями взаимного расстояния между спутниками, поскольку только долговременные наблюдения могут дать надежную информацию о климатических тенденциях.

Измерения гравитационного поля Земли на новой инструментальной основе были продолжены со спутника Европейского космического агентства GOCE (Gravity field and steady state Ocean Circulation Explorer) с корпусом типа «аэродинамическая стрела», статически устойчивым

* Подробнее о миссии GRACE-1 см.: *Зотов Л.В., Фролова Н.Л., Шлам С.К.* Гравитационные аномалии в бассейнах крупных рек России // Природа. 2016. №5. С.3–8.

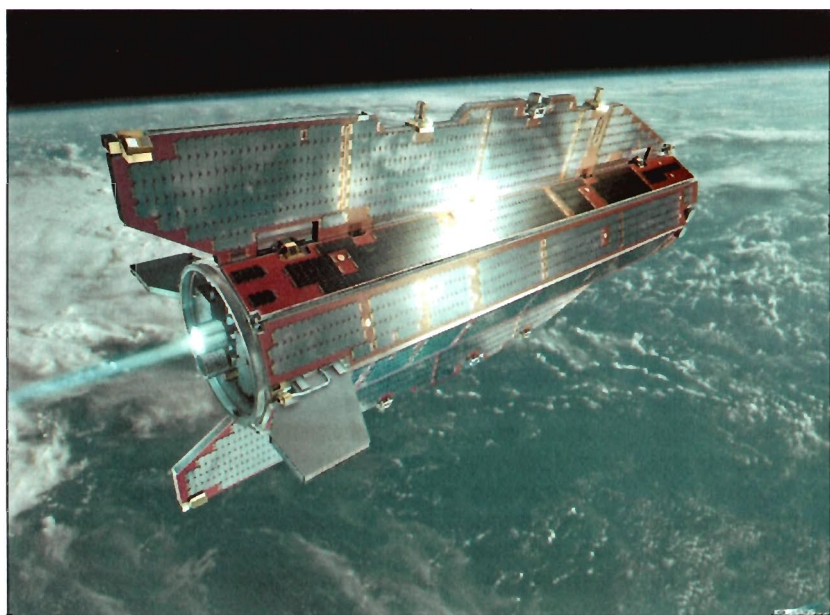


Рис.6. Спутник GOCE для проведения высокоточных измерений гравитационного поля Земли с самой низкой орбиты.

в разреженной атмосфере на низкой орбите — 260–229 км (рис.6). Его ионные двигатели компенсировали негравитационные силы (аэродинамическое торможение и солнечное давление). Выведенный на орбиту с космодрома Плесецк в марте 2009 г. спутник проработал четыре года до исчерпания запаса ксенона, питавшего ионные двигатели. Новые измерения с пространственным разрешением 100 км и использование особо точных акселерометров позволили усовершенствовать модели гравитационного поля [12].

Дешифрирование связей вариаций гравитационного поля, измеренных спутниками GRACE-FO, с перераспределением водных масс на суше существенно упростится с запуском в 2020 г. спутника SWOT (Surface Water and Ocean Topography), предназначенного для получения данных о динамике пресной воды в озерах, водохранилищах и реках путем измерения высоты стояния воды с погрешностью не более 1 см с помощью канадской радарной системы. Миссия SWOT — совместный проект канадского, американского и французского космических агентств.

Большие перспективы открываются перед использованием спутниковых измерений гравитационного поля в сочетании с сейсмической томографией, в которой регистрируются сейсмические волны. Вариации скорости их распространения от источника землетрясения в недрах Земли зависят от температуры и состава горных пород, но не несут информации о массе. Совместное использование структурной информации, поставляемой сейсмической томографией, и гравитационных данных, чувствительных к массе, позволит исследовать потоки в мантии с учетом плавучести материала.

Высокоточные измерения гравитационного поля представляют интерес для широкого круга задач физики Земли, геодезии, геологии, геодинамики, океанологии и находят применение в прикладных задачах построения геоида регионального уровня для оценки материальных ресурсов, поиска областей с высоким геотермальным потенциалом, повышения точности определения орбит космических аппаратов, спутниковой альтиметрии, оптических и глобальных навигационных систем.

... И МАГНИТНОЕ

Данные о состоянии магнитного поля Земли (МПЗ) зачастую приводят в метеорологических прогнозах, поскольку его возмущения сказываются на самочувствии многих людей, но для ученых их информативность гораздо шире.

Тело Земли — это тонкая кора, объемная мантия и ядро размером примерно с Марс. Треть массы планеты содержится в ядре, остальные две трети — в мантии и коре. Измерения гравитационного и магнитного полей Земли с низкоорбитальных спутников предоставляют данные, связывающие движения масс во внешнем ядре с вариациями гравитационного поля и изменением магнитного поля. Длительные наблюдения изменений МПЗ на интервалах от года до десятков лет наряду с пространственно-временными вариациями гравитационного поля позволяют проникнуть в механизмы, порождающие самоподдерживающееся магнитное поле.

Магнитные поля, измеряемые спутниками на низких околоземных орбитах, суммируют вклады от трех источников:

- от геодинамо в земном ядре (главное поле);
- от намагниченных горных пород коры (коровые литосферные поля);
- от электрических токов в ионосфере и магнитосфере (внешние поля).

Главное поле создает и поддерживает в некотором роде динамомашина, движимая, но-видимому, тепловыми процессами в проводящей жидкости внешнего ядра, граничащего с твердым, очень плотным внутренним ядром из металлического железа. Вариации главного поля связаны с динамикой потоков вещества в жидком ядре, находящихся под влиянием силы Кориолиса (она искривляет потоки, переносящие тепло), а также с переменной плавучестью материала. Изучение намагниченности коры несет информацию о тер-

мическом состоянии литосферы и о составе горных пород. С удалением от поверхности Земли ее собственное магнитное поле быстро спадает и на расстояниях в десятки тысяч километров оказывается сравнимым с межпланетным. Взаимодействие солнечного ветра и магнитного поля Земли создает магнитосферу планеты, конфигурация которой поддерживается электрическими токами, текущими по ее границам, и управляется солнечной активностью. Магнитное поле внешних источников, в отличие от поля внутренних, изменяется на короткой временной шкале. Чтобы быть уверенным в точности оценок вклада главного и литосферного полей, необходимо тщательно измерять внешнее поле. Даже в магнитоспокойные дни в ионосфере существуют значительные электрические токи. Основная задача анализа измерений — разделить вклады в МПЗ от ядра Земли, мантии, коры, океана, ионосферы, магнитосферы.

Считается, что МПЗ существует более 3 млрд лет и, защищая Землю от заряженных частиц солнечного ветра, служит одним из основных факторов в геологической истории планеты и в эволюции жизни. На протяжении всего этого времени МПЗ не было стабильным и регулярным — северный и южный полюса магнитного диполя спонтанно менялись местами. За последние 150 млн лет инверсия полюсов происходила сотни раз, о чем свидетельствуют изверженные горные породы, сохраняющие с момента своего остывания намагниченность, направление и величина которой соответствуют магнитному полю своей эпохи. В океанической коре записаны все изменения МПЗ за 180 млн лет. Промежуток времени между переменной полюсов составляет в среднем 250 тыс. лет, а сам процесс исчезновения прежней полярности и возникновения новой занимает от четырех до десяти тысяч лет. Этому процессу предшествует ослабление напряженности поля, но за ослаблением не всегда следует инверсия. Так, за последние 780 тыс. лет магнитные полюса местами не менялись.

С тридцатых годов XIX в. напряженность геомагнитного поля уменьшилась почти на 10%, она продолжает уменьшаться и сегодня. В наше время северный магнитный полюс из Арктической Канады, вблизи о.Элмир, смещается в Российскую Арктику и, по прогнозу Канад-

ской геомагнитной службы, к 2050 г. достигнет архипелага Северная Земля.

Первая глобальная карта МПЗ на базе спутниковых измерений была создана по данным спутника NASA MagSat (октябрь 1979 г. — июнь 1980 г.). Двадцать лет спустя наблюдения МПЗ продолжили космические аппараты — датский Ørsted, немецкий CHAMP (Challenging Minisatellite Payload), аргентинский SAC-C (Satellite de Aplicaciones Cientificas-C). Как показал опыт, чтобы избавиться от неопределенностей, необходимо проводить одновременные наблюдения в разных точках пространства. В ноябре 2013 г. была создана группировка из трех одинаковых спутников Swarm («рой») Европейского космического агентства. Два из них на низкой орбите измеряют градиент МПЗ в направлении восток—запад, тогда как третий обращается по орбите с большей высотой и другим временем прохождения восходящего узла, обеспечивая одновременные измерения в разных точках пространства в соответствии со структурой группировки (рис.7). Через два года эволюция орбит приведет к новой структуре, когда плоскости орбит нижних спутников и верхнего станут взаимно пер-

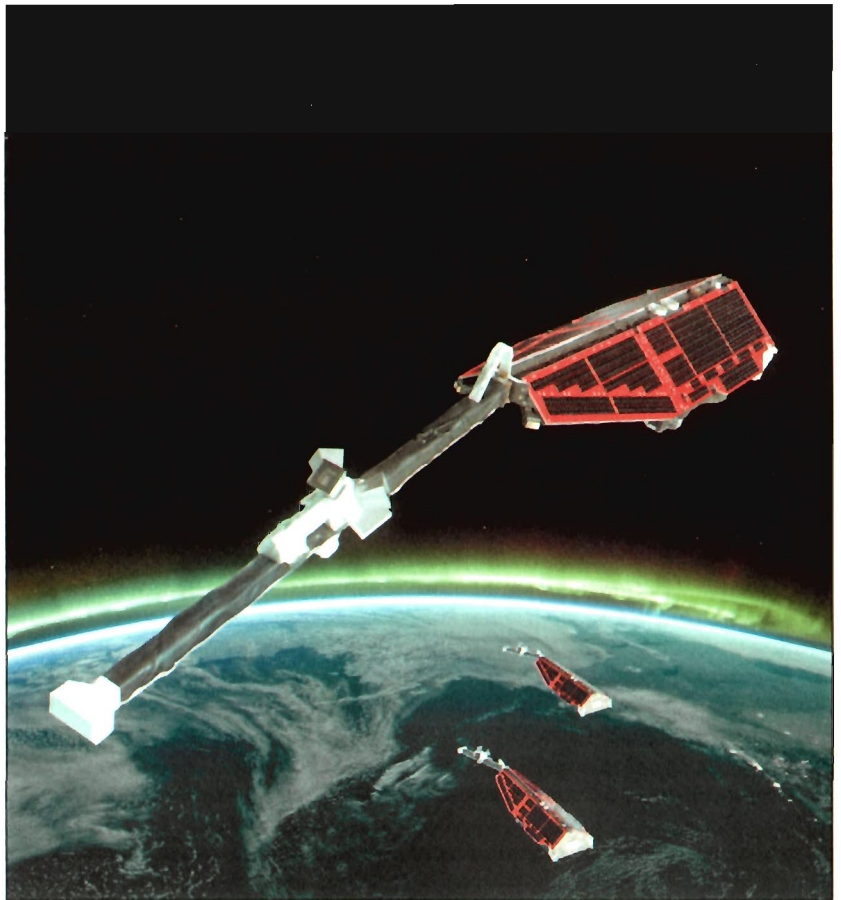


Рис.7. Группировка спутников Swarm («рой») на низких орбитах для измерения магнитного поля Земли одновременно в разных точках пространства.

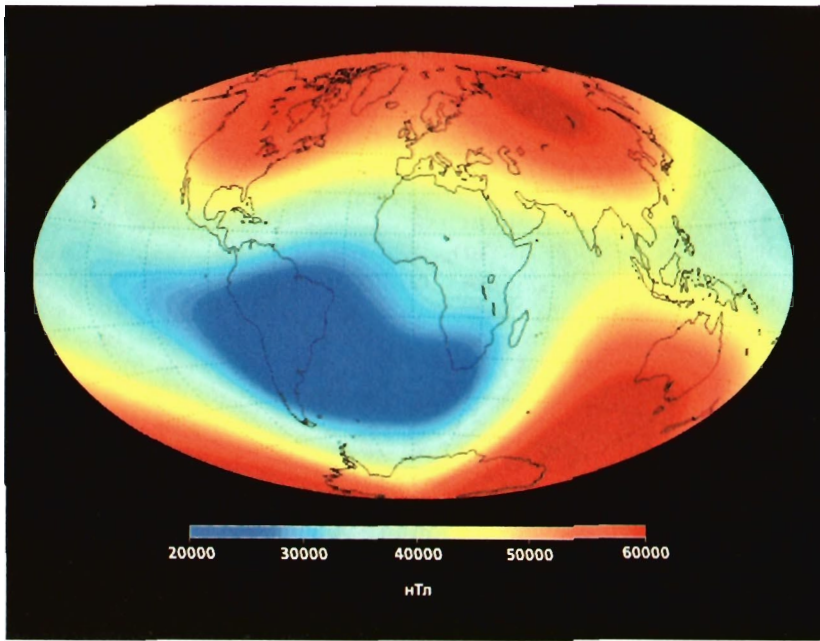


Рис.8. Модель магнитного поля Земли по результатам Swarm (по июнь 2014 г.).

пендикулярны и измерения будут проводиться в новой конфигурации «роя». Кроме двух магнитометров, установленных на штатге, на торце корпуса имеется прибор для измерения плотности, дрейфа и ускорения электронов плазмы. Вместе с измерениями электрического поля спутниковая информация позволит изучить процессы, создающие МПЗ.

Вопросы исследований первоочередной важности таковы:

- динамика ядра, процессы геодинамики, взаимодействие ядра и мантии;
- магнитные свойства литосферы и их геологическая интерпретация;
- трехмерная картина электропроводности мантии;
- токи в магнитосфере и ионосфере.

Литература / References

1. Лебедев В.В., Гансвинд И.И. Проектирование систем космического мониторинга. М., 2010. [Lebedev V.V., Gansvind I.I. Remote sensing systems design. Moscow, 2010. (In Russ.)]
2. Pallé E., Goode P.R., Montanes-Rodriguez P. et al. Changes in Earth's reflectance over the past two decades. *Science*. 2004; 304: 1299–1301.
3. Marshak A., Varnai T., Kostinski A. Terrestrial glint seen from deep space: oriented ice crystals detected from the Lagrangian point. *Geophysical Research Letters*. Accepted manuscript online: 15 May 2017. Doi:10.1002/2017GL073248.
4. Гранков А.Г., Мильшин А.А. Взаимосвязь радиовылучения системы океан-атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на границе раздела. М., 2004. [Grankov A.G., Milsbin A.A. The relationship between radio emission of the sistem ocean-atmosphere heat and dynamic processes at the interface. Moscow, 2004. (In Russ.)]
5. Ермаков Д.М., Раев М.Д., Суслов А.И., Шарков Е.А. Электронная база многолетних данных глобального радиотеплового поля системы океан-атмосфера в контексте задач исследования климата планеты и атмосферных катастроф. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005; 2(2): 17–22. [Ermaikov D.M., Raev M.D., Suslov A.I., Sharkov E.A. Electronic database of long-term data

Мониторинг МПЗ из космоса поможет глубже понять процессы внутри ядра, для чего привлекаются как компьютерные модели геодинамики, так и лабораторные опыты с динамо-машинами. Измерения, выполненные группировкой Swarm за первые месяцы работы, подтвердили тенденцию ослабления поля, главным образом в Западной полушарии. Однако в других районах, на юге Индийского океана, оно возрастает (рис.8). Последние измерения подтверждают также движение северного магнитного полюса в сторону Сибири. К апрелю 2014 г. испытания и проверки бортовых систем и научной аппаратуры были завершены и стали поступать надежные калиброванные данные измерений. Предварительные итоги работы группировки с ноября 2013 г. по сентябрь 2014 г. свидетельствуют,

что данные, получаемые из сравнения измерений двух нижних спутников, позволили улучшить определение как статического поля, так и его вариаций, а также увеличить пространственное разрешение вклада намагниченных пород земной коры [13].

В результате космического мониторинга состояния океана, атмосферы, земного покрова и характеристик крупномасштабных процессов в этих средах накоплен огромный объем разнородных данных, охватывающих несколько десятилетий. Систематизация и претворение этих данных в базы знаний, усвоение в моделях позволяют существенно снизить уровень неопределенности в сценариях будущей динамики глобальных изменений климатической системы Земли. ■

- global radio thermal field of the sistem ocean-atmosphere in the context of the objectives of the study the planet's climate and atmospheric disasters. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2005; 2(2): 17–22. (In Russ.)]
6. Современные проблемы динамики океана и атмосферы: К 100-летию со дня рождения проф. П.С.Линейкина. Ред. А.В.Фролов, Ю.Д.Роснянский. М., 2010. [Modern problems of ocean and atmosphere dynamics: The Pavel S.Lineykin memorial volume. Frolov A.V., Rosnyanskii Yu.D. (eds). Moscow, 2010. (In Russ.)]
 7. *Галанин А.А., Лыткин В.М.* Реконструкция сокращения ледников хребта Сунтар-Хаята за последние 60 лет на основе данных дистанционного зондирования и цифровой модели рельефа. Географические исследования Якутии: история современность и перспективы: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня создания Якутского отдела Императорского географического общества. Якутск, 21- 23 августа 2013, Якутск, 2014; 426–429. [*Galanin A.A., Lytkin V.M.* Reconstruction reduction of glaciers of the ridge Suntar-Hayat over the last 60 years on remote sensing data and digital elevation model. *Geograficheskiye issledovaniya Yakutii: istoriya, sovremennost i perspektivy. Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, August 21–23, 2013. Yakutsk, 2014; 426- 429. (In Russ.)]
 8. *Куницкий В.В., Сыромятников И.И., Ширмейстер Л.И. и др.* Льдинистые породы и термоденудация в районе поселка Богатай (Янское плоскогорье, Восточная Сибирь). Криосфера Земли. 2013. 17 (1): 56–58. [*Kunitsky V.V., Syromyatnikov I.I., Schirmeister L. et al.* Ice-rich permafros and thermal denudation in the Batagay arca (Yana Upland, East Siberia). *Kriosfera Zemli*. 2013. 17 (1): 56–58. (In Russ.)]
 9. *Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф., Савиных В.И.* Перспективы развития цивилизации: многомерный анализ. М., 2003. [*Kondrat'ev K.Ya., Krapivin V.F., Savinykh V.P.* Civilization Development Prospects: Multidimensional Analysis. Moscow, 2003. (In Russ.)]
 10. *Nelson R.R., Crisp D., Ott L.E., O'Dell C.W.* High-accuracy measurements of total column water vapor from the Orbiting Carbon Observatory-2. *Geophysical Research Letters*. 2016; 43 (23): 12261–12269. Doi:10.1002/2016GL071200.
 11. *Yannai T., Marshak A.* Analysis of co-located MODIS and CALIPSO observations near clouds. *Atmospheric Measurement Techiques*. 2012; 5 (2): 389–396. Doi:10.5194/amt-5-389-2012.
 12. *Wernuth M.K.* Gravity field analysis from the satellite mission CHAMP and GOCE. Dissertation, facultat für Bauingenieur und Vermessungswesen. Munchen, 2009.
 13. *Olsen N., Hulot Y., Lesur V. et al.* The Swarm initial field model for 2014 geomagnetic field. *Geophysical Research Letters*. 2015. Doi:10.1002/2014GL062659.

Space diagnostics of Earth's climate system

I.N.Gansvind

Geoinformation Research Centre, RAS (Moscow, Russia)

Progressively increasing data set of global observations from different satellites opens the way for Earth's climate and weather systems studies in combining data on the ocean, atmosphere and ice dynamics for gaining new insights into critical aspects of climate change. Climate and weather systems depend on the temperature patterns of the ocean and its interaction with the atmosphere. Global data sets of the ocean altimetry measurement along with accumulated data on the distribution of temperature and salinity with depth allows building ocean topography which demonstrate a rise in global sea level and elucidate the oceanic general circulation. The dynamics of ice and snow structures make excellent index of environmental changes. As evident from the satellite and ground based data the area of glaciers in Yakutia (the East Siberia) decreased over the last 60 years almost 60%.Correlations observed between aerosol and cloud properties gives reason to investigate their impact on the radiation budget and their influence on and interaction with climate.

The magnificent seven satellites flies in formation A-train for co-located observations of cloud properties, land, atmosphere and sea surface temperature, ocean surface wind speed, providing plenty of scope for synergistic studies. The latest in the formation found a place the Orbiting Carbon Observatory-2 for high accuracy measurement of the two most important greenhouse gases. Satellites in a low Earth orbits provide the required high resolution gravity- and magnetic-field measurements.

Assimilation of stored data in models and systematization of big interconnected data from different sources afford to reduce the level of uncertainties in scenarios of the Earth's climate dynamics.

Key words: climate dynamics, global satellite observational data, Earth's energy budget, atmosphere-ocean-ice system, gravity and magnetic field missions.