

УДК 528.8 (15)

СОВРЕМЕННЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗУЧЕНИЯ ЗЕМЛИ КАК СИСТЕМЫ

И.Н. Гансвинд

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Научный геоинформационный центр Российской академии наук»

ignik-1g@yandex.ru

Аннотация

Систематические спутниковые наблюдения позволили проследить изменения на Земле на протяжении десятилетий. Низкие околополярные орбиты служат идеальной платформой для измерений параметров гравитационного и магнитного полей. Переход к определению параметров движения путем непрерывного GPS-слежения, межспутниковые измерения и градиентометрия обеспечили получение данных для анализа гравитационного поля с привлечением океанской топографии. Группировка спутников позволяет проводить измерения магнитного поля одновременно в разных точках пространства. Накопленный объем спутниковых данных нуждается в междисциплинарном структурировании и усвоении в моделях.

Ключевые слова: *GPS-слежение за низкоорбитальными спутниками, межспутниковые измерения, спутниковая гравитационная градиометрия, океанская топография геопотенциальные модели, спутниковая «магнитная градиометрия», мониторинг солнечно-земных связей.*

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении последних десятилетий в рамках многих международных программ (GEOSS, ESM, ESSP и др.) проводится систематически глобальный космический мониторинг Земли, направленный как на получение оперативных данных для решения прикладных задач (состояние растительности, прогноз урожайности, координация спасательных работ в зонах стихийных бедствий и т. п.), так и в интересах наук о Земле: измерения климатообразующих параметров состояния

атмосферы, земного покрова, океана, криосферы и характера процессов в этих средах [1].

Исследования Земли как системы были бы далеко не полными без получения данных о фигуре Земли, поля силы тяжести и магнитном поле. Спутники на низких околополярных орбитах служат идеальной платформой для высокоточных измерений параметров гравитационного и магнитного полей Земли. Получение данных на достаточно протяженной пространственно-временной шкале обеспечивается при выполнении ряда условий. Длительное существование на низкой орбите достигается выбором формы и массово-геометрических характеристик спутника с малым аэродинамическим сопротивлением. Межспутниковые измерения координат и скоростей при непрерывном GPS-слежении реализуют технологию высокой-низкой. Прецизионные измерения вариаций взаимного расстояния в группе из пары идентичных спутников GRACE (низкий-низкий) служат для получения данных об усредненной и переменной составляющих гравитационного поля Земли (ГПЗ). Поддержание ионными двигателями орбиты спутника GOCE позволило проводить градиентометрические наблюдения на высотах до 229 км и получить надежные и точные данные для определения геоида и картирования аномалий гравитационного поля. Регулярная спутниковая альтиметрия при использовании измерений температуры и солености морской воды на разных горизонтах позволяет восстанавливать океанскую топографию [2].

Как показал опыт, измерение параметров магнитного поля Земли (МПЗ) требуется проводить одновременно в разных точках пространства. Группировка из трех спутников SWARM позволила улучшить определение как статического поля, так и его вариаций при помощи «магнитной градиентометрии».

Низкоорбитальные спутниковые измерения не позволяют создавать глобальные гравитационные модели высокого разрешения, если не использовать наземные гравиметрические данные, альтиметрию и анализ возмущений спутниковых орбит.

НИЗКООРБИТАЛЬНЫЕ СПУТНИКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Околополярные орбиты служат для непрерывного охвата планеты наблюдениями. Преимуществом низких орбит являются высокое разрешение и качество измерений, недостатком – растущее с уменьшением высоты аэродинамическое сопротивление. Продолжительность существования спутника на возможно более низких высотах (от 500 км и ниже) зависит от формы, массово-геометрических характеристик аппарата, возможности компенсации действующих на него негравитационных сил и характера изменений плотности атмосферы на высотах полета, подверженной вариациям, связанным с солнечной активностью. Чем выше солнечная активность, тем больше плотность – на высоте 400 км плотность может изменяться в несколько раз.

Измерения на орбите параметров гравитационного поля складываются из межспутниковых (высокий–низкий, низкий–низкий), спутниковой градиентометрии, измерений высоты водной поверхности Мирового океана, анализа возмущений орбит спутников.

Технология спутник–спутник состоит в измерении расстояний и скорости изменения расстояния между спутниками. Это могут быть два спутника, следующих один за другим по близким орбитам на расстоянии от 50 до 300 км. Другая возможность – спутники высокий и низкий, орбита которых отслеживается по навигационным измерениям GPS или других спутников глобальной навигационной системы.

Спутник, который можно точно и непрерывно наблюдать, является зондом в гравитационном поле Земли. Вызванные полем возмущения его орбиты проявляются как трёхмерные наблюдаемые ускорения спутника. В спутниковой градиентометрии измеряются разности ускорений силы тяжести, действующей на пробные массы внутри аппарата.

Цель анализа глобального гравитационного поля – построение модели потенциала, представленной коэффициентами разложения по гармоникам сферических функций и отнесённой к поверхности Земли, по измерениям вдоль орбиты спутника. Большая часть методов анализа гравитационного поля по спутниковым

измерениям была разработана около сорок лет назад, но их реализация стала возможной вместе с непрерывным GPS-слежением за низкоорбитальными спутниками CHAMP, GRACE, GOCE. [3]

Таблица 1. Низкоорбитальные спутники для измерений параметров ГПЗ

	CHAMP	GRACE	GOCE	GRACE-FO
Дата запуска	2000	2002	2009	≈2017
Количество спутников	1	2	1	2
Высота орбиты (км)	450-350	450-300	250	500
Масса (кг)	400	430	1100	600
Наклонение орбиты (град)	87,3	89,5	96,6	—
Точность акселерометра (м/с ²)	$3 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-12}$	—
Точность измерения взаимного расстояния (μм)	—	10 (дальномер К-диапазона)	—	0,5 (лазерный дальномер)

Миссией CHAMP реализована технология высокий–низкий, выполнено первое исследование с GPS-приёмником в космосе (16 каналов и многоантенная система, 2 канала использовались для радиопросвечивания атмосферы и ионосферы путём затменных наблюдений спутников GPS). Точные измерения на протяжении десяти лет ГПЗ и МПЗ (5 лет измерений на высотах, больших 300 км, и несколько месяцев – на меньших 300 км к концу срока активного существования) позволили изучать их пространственные и временные вариации на длительном интервале.

Успех миссии CHAMP был развит в проекте GRACE, реализовавшем технологию низкий–низкий. Спутники-близнецы следуют друг за другом по компланарным орбитам на удалении около 200 км. Высокая точность измерения расстояния

между спутниками дальномерами К-диапазона с погрешностью, не превышающей 10 мкм, позволяет отслеживать вариации силы тяготения по изменениям их взаимного расстояния. Наряду с непрерывными GPS-измерениями, позволяющими получать значения потенциала по измерениям орбит (высокий–низкий), по разностям расстояний находятся производные потенциала. Форма спутника и значительная часть аппаратуры (акселерометр, астроблок, сборка лазерных отражателей) были унаследованы от CHAMP).

Обновление глобальной карты ГПЗ с периодом в 30 суток позволило количественно оценить распределение масс на поверхности Земли и в её недрах на пространственно-временной шкале. В результате торможения в атмосфере высота орбиты спутников понизилась с 500 км до 400 км и ниже. На смену готовится запуск спутников GRACE-FO с усовершенствованной аппаратурой при сохранении преимущественности наблюдений.

Спутник ESA GOCE, выведенный в марте 2009 года на ССО с высотой 280 км, проработал 4 года. От предшествующих CAMP и GRACE его отличают:

- низкая орбита (260–229 км), поддерживаемая ионными двигателями, компенсирующими негравитационные силы (воздействие атмосферы, солнечное давление);
- форма «аэродинамическая стрела» статически устойчивая в атмосфере;
- новый принцип измерений.

Система измерений состоит из трёхкомпонентного электростатического гравитационного градиометра и навигационной подсистемы с использованием GPS и лазерной локации. По данным измерений определяется тензор вторых производных гравитационного потенциала. Градиометр состоит из шести акселерометров, попарно установленных по трём взаимно ортогональным осям с началом в центре масс аппарата, связанным с корпусом КА.

Траекторные измерения по технологии спутник–спутник и средствами лазерной локации определяют отклонения спутника в координатно-временном поле от расчётного, таким образом, сам аппарат является элементом системы измерений вариаций гравитационного поля.

Принцип работы акселерометра основан на измерении электрического поля, необходимого для удержания пробной массы в неизменном положении.

Расстояние между эталонными массами в парах акселерометров составляет 0.5 м и сохраняется постоянным при отклонении не более чем на 0.01 ангстрема на временном интервале порядка 3 мин.

Ускорение, измеряемое отдельным акселерометром:

$$\bar{a} = -\nabla^2 \bar{V} \cdot \bar{r} + \dot{\bar{\omega}} \times \bar{r} + \bar{\omega} \times (\bar{\omega} \times \bar{r}) + \bar{a}_n,$$

где \bar{V} – гравитационный потенциал; \bar{r} – положение акселерометра в связанных осях; $\dot{\bar{\omega}}$ – вектор углового ускорения аппарата; $\bar{\omega}$ – вектор угловой скорости; \bar{a}_n – ускорение аппарата, вызванное внешними неконсервативными силами.

Разности ускорений, измеренных каждым датчиком пары вдоль их осей, позволяют вычислить диагональные члены тензора градиента силы тяжести. Общая мода акселерометров используется для контроля приложенного к аппарату ускорения негравитационных сил. Ускорения общей моды вычисляются на борту в реальном времени и подаются на вход системы управления ориентацией и компенсацией. Если общая составляющая ускорения направлена по полёту, система отреагирует либо увеличением, либо уменьшением тяги непрерывно работающих ионных двигателей, которые для создания импульса используют ионизированные атомы ксенона, обеспечивая условия движения, близкие к свободному падению. После исчерпания запаса ксенона GOCE прекратил существование в ноябре 2013 года. Низкая орбита спутника и высокая точность акселерометров позволили к окончанию срока активного существования улучшить точность определения геоида до 1–2 см при пространственном разрешении порядка 100 км. Метод высокий–низкий, GPS-анализ орбиты даёт информацию о длинноволновой части поля силы тяжести, тогда как градиометрия позволяет определить коротковолновую часть. В то время, как GRACE показывает наивысшую точность для низких гармоник гравитационного потенциала до 70-го порядка и может выявлять изменения гравитационного поля на этом уровне, GOCE достигает наилучших результатов между степенями 70 и 350 и может обеспечить геоид с точностью 1–2 см для коротких полуволн с длиной около 80 км. Использование данных GRACE приводит к одноосному градиометру в космосе.

Высокоточные градиентометрические наблюдения используются для решения широкого круга задач в физике Земли, геодезии, геологии, геодинамике, океанологии наряду с прикладными задачами построения моделей квазигеоидов

для региональных территорий и геологических моделей, оценки минеральных ресурсов, поиска областей с высоким геотермальным потенциалом, служат для повышения точности спутниковых навигационных измерений, использующих системы взаимосогласованных геодезических параметров, включая параметры гравитационного поля Земли.

СПУТНИКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТЫ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Спутниковые измерения высоты водной поверхности позволяют восстанавливать океанскую топографию. Альтиметрические измерения соответствуют высоте водной поверхности по отношению к поверхности относимости (эллипсоида, принятого в системе навигации спутника) и дают отклонение свободной поверхности моря от средних её значений по трассе спутника. Однако с использованием многолетних наблюдений распределения температуры и солёности морской воды по глубине удаётся восстанавливать топографию морской поверхности, характеризующую отклонений высоты поверхности моря от геоида [2].

Метод спутниковой альтиметрии требует точного знания относительного положения спутника, в первую очередь его радиальной составляющей, для чего нужны точные траекторные определения. Система траекторных измерений использует около пятидесяти наземных радиомаяков, GPS-измерения и лазерную локацию.

Регулярные наблюдения уровня океана проводятся с 1992 г. сначала американо-французским спутником TOPEX/Poseidon, затем сменившим его Jason, в 2008 г. выведен на подобную низкую околоземную орбиту (наклонение 66° , высота 1336 км, период повторного прохождения 9.9 сут), спутник Jason-2 с полезной нагрузкой, как у предшественника: импульсный высотомер Poseidon-3, трёхканальный СВЧ-радиометр AMR-2, измеряющий количество пара над океаном. В январе 2016 г. запущен КА Jason-3 с набором инструментов, аналогичным Jason-2. Индийско-французский океанографический спутник SARAL с 2013 г. измеряет расстояние до поверхности океана с погрешностью 8 мм.

Существенным дополнением к дистанционным спутниковым наблюдениям служат измерения температуры и солёности морской воды на разных горизонтах с помощью дрейфующих-ныряющих буёв глобальной сети Арго. Масштабная

наблюдательная система спутниковой альтиметрии и зондирующих буёв Арго – основа постоянного мониторинга поверхности океанов и морей, исследований пространственно-временной изменчивости уровня моря, циркуляции вод в Мировом Океане, переноса тепла, накопленного водой.

Данные спутниковой альтиметрии используются при разработке глобальных геопотенциальных моделей. Для моделей только по данным GOCE и GRACE разрешение ограничено до степени и гармоник не выше 260. Наиболее высокое разрешение достигнуто в комбинированных моделях с использованием наземной гравиметрии, океанской топографии, лазерной локации спутника: в модели EGM 2008 до степени гармоник 2190, в моделях EIGEN-6C и EIGEN-6C2 до 1420 и 1949 соответственно.

Геодезические приложения на основе высокочастотной области ГПЗ позволяют создавать модели квазигеоида для региональных территорий.

СПУТНИКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Создание глобальной модели магнитного поля Земли требует плотного охвата однородными наблюдениями всей планеты. Изучение параметров МПЗ проводится с 1979 г. спутниками MagSat, «Эрстед», CHAMP, SAC-C. Как показал приобретённый опыт, во избежание пространственно-временных неопределённостей необходимы одновременные измерения в разных точках пространства. Для этого требуется группировка спутников. Три одинаковых спутника Swarm («рой»), форма которых такая же, как у CHAMP, выведены на полярную орбиту в ноябре 2013 г. и проводят измерения в соответствии со структурой группировки. По данным двух из них, следующих на небольшом удалении друг от друга на орбите высотой 450 км и наклоном 87.4° , можно найти градиент поля в направлении восток–запад. Третий спутник группировки обращается на высоте 530 км по орбите с наклоном 87.75° и другим временем прохождения восходящего узла орбиты. Вследствие разной скорости прецессии плоскостей орбит верхнего спутника и нижних со временем станут взаимно перпендикулярными.

Магнитометры, скалярный на метастабильном гелии-4 с оптической накачкой и векторный, установлены на выносной девятиметровой штанге: скалярный – на её конце, на максимальном удалении от корпуса, векторный – в средней части на оптической скамье со звёздными датчиками. «Магнитная градиентометрия»

по измерениям двух нижних датчиков позволила улучшить определения как статического поля, так и его вариаций. Магнитные измерения вместе с сейсмической томографией и измерениями параметров ГПЗ на длительном временном интервале позволяют судить о движении потоков в жидком ядре Земли, с которыми связаны вариации МПЗ. Основная задача анализа измерений – разделить вклады в МПЗ от ядра Земли, мантии, коры, океана, ионосферы, магнитосферы.

На передней стороне трапециевидного корпуса спутников Swarm установлен прибор, измеряющий компоненты электрического поля, плотность, дрейф, ускорение электронов плазмы. На точность оценивания главного и литосферного полей влияют погрешности измерения внешнего поля, которое в отличие от поля внутренних источников, изменяется на короткой временной шкале. Многие явления в ионосфере и магнитосфере вызываются их взаимодействием с солнечным ветром.

В окрестностях точки Лагранжа L1 работает климатическая обсерватория DSCOVR, приборы которой на линии Солнце–Земля позволяют наряду с исследованиями глобального энергетического баланса Земли наблюдать события на Солнце и оперативно, в пределах часа, предупреждать о корональных выбросах, опасных для объектов на Земле и в околоземном пространстве, зависящих от космической погоды. Комплексное использование данных Swarm и DSCOVR открывает перспективы мониторинга солнечно-земных связей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение Земли как системы спутниковыми методами в рамках ряда международных программ (GEOSS, ESM, ESSP и др.) направлено на получение климатоформирующих параметров состояния океана, атмосферы, криосферы, земного покрова и процессов в этих средах. Структурирование наблюдательных данных от постоянно поддерживаемых и совершенствуемых спутниковых платформ и выявление связей между ними требует широких междисциплинарных исследований. Так, сопоставление данных о ГПЗ и МПЗ показало, что процессы во внешнем ядре находят отражение в гравитационном поле.

Эффективное усвоение спутниковых данных на моделях обеспечивается привлечением прямых наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев В. В., Гансвинд И.Н. Проектирование систем космического мониторинга. М.: Наука, 2010. 388 с.
 2. Современные проблемы динамики океана и атмосферы// Сб. статей под ред. Фролова А.В. и Реснянского Ю.Д. М.: Триада, 2010. 400 с.
 3. *Wermuth M.K.* Gravity field analysis from the satellite missions CHAMP and GOCE. Dissertation, fakultat fur Bauingenieur – und Vermessungswesen, TU Munchen, 2009, 100 p. <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20080228-646546-1-7>.
 4. Swarm – eoPortal Directory – Sattelite missions. <http://directory.eoportal.org/web/eoportal/sattelite-missions/s/swarm>.
-

CURRENTLY AVAILABLE SPACE TECHNOLOGIES FOR EARTH SYSTEM STUDY

I.N. Gansvind

*Scientific Geoinformation Center of the Russian Academy of Sciences (NGIC RAS,
Russia)*

ignik-1g@yandex.ru

Abstract

Satellites in a low-Earth (under 450 km) near-polar orbits provide the required high resolution gravity and magnetic-field measurements. The application of Satellite-to-Satellite Tracking aboard CHAMP and GRACE missions, satellite gradientometry (GOCE mission) makes possible the reliable highly accurate assessments Earth's gravitational potential. Combining GOCE-TIM4 model with EIGEN-6C and EGM 2008 for degree expansion from 251 to $n=1420$ and $n=2190$ form the basis of elaboration new local and regional gravity models. Swarm satellite early magnetic field measurements explicit advantage is taken by including magnetic intensity gradient from the lower satellite pair. Progressively increasing data of global observations opens the way for Earth System Study by bringing disparate sources together.

GPS-tracking on the low orbiting satellites, satellite-to-satellite tracking, satellite gravity gradiometry, sea surface topography, gravity field models, magnetic field gradient satellite data, monitoring solar-terrestrial relations.

Keywords: GPS- tracking on the low orbiting satellites, satellite-to-satellite tracking, satellite gravity gradiometry, sea surface topography, gravity field models, magnetic field gradient from the satellite pair, monitoring solar terrestrial relations

REFERENCES

1. *Lebedev V.V., Gansvind I.N.* Proektirovanie system kosmicheskogo monitoringa. M.: Nauka, 2010. 388 s.
2. *Sovremennye problem dinamiki okeana I atmosfery*// Sb. Statey pod red. Frolova A.V. i Resnyanskogo Yu.D. M.: Triada, 2010. 400 s.
3. *Wermuth M.K.* Gravity field analysis from the satellite missions CHAMP and GOCE. Dissertation, fakultat fur Bauingenieureur – und Vermessungswesen, TU Munchen, 2009, 100 p. <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20080228-646546-1-7>.
4. Swarm – eoPortal Directory – Sattelite missions. <http://directory.eoportal.org/web/eoportal/sattelite-missions/s/swarm>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



ГАНСВИНД Игорь Николаевич – старший научный сотрудник Лаборатории систем космического мониторинга Научного геоинформационного центра Российской академии наук.

Igor Nikolaevich GANSVIND – senior research fellow of remote sensing system design laboratory.

e-mail ignik-1g@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 28 декабря 2016 года