

Использование методов космической геодезии в геодинاميке

С.П. КУЗИН,
кандидат технических наук
К.В. ЭБАУЭР,
кандидат физико-математических наук
А.А. КЛЮЙКОВ,
кандидат технических наук
Институт астрономии РАН



В статье обсуждаются вопросы, связанные с использованием измерений различных спутниковых систем для

геодинамических исследований, проводимых группой космической геодезии ИНАСАН. Рассмотрены основные

современные методы наблюдений геодинاميческих параметров. Приведены некоторые результаты исследований.

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ
В ГЕОДИНАМИКЕ

Наша жизнь протекает на динамичной, изменяющейся планете. Это

делает необходимым проведение постоянного и долговременного изучения глобальных изменений в системе Земли, их количественной

оценке в высокоточной, стабильной системе координат. Для исследования и понимания изменений формы, вращения и гравитационного поля

Земли, а также для установления глобальной геодезической системы отсчета под эгидой Международной геодезической ассоциации была создана Глобальная геодезическая система наблюдений (Global Geodetic Observing System – GGOS). Эта организация действует в нескольких направлениях: сбор, математическая обработка и анализ данных, поступающих от глобальных навигационных спутниковых систем и доплеровских наблюдений системы DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite – спутниковые доплеровские измерения орбиты и местоположения); получение информации от радиointерферометров со сверхдлинными базами (VLBI) и результатов спутниковой лазерной локации (SLR), принятых с пунктов наземных геодезических сетей. Составной частью системы GGOS являются также гравиметрические обсерватории. GGOS поддерживает разработку новых космических альтиметрических программ с использованием спутников по составлению карт гравитационного поля Земли, а также помогает использовать для этих же целей классические геодезические наземные измерения. Система GGOS внедряет в область изучения Земли геометрические и гравитационные аспекты геодезии,

стимулируя улучшение качества геодезических решений, увеличивая инвестиции в космические технологии.

На ближайшее десятилетие определены главные проблемы в изучении Земли с целью регистрации глобальных планетарных изменений: мониторинг водного цикла в мировом и региональном масштабах, исследования изменений уровня Мирового океана и ледниковых масс. Поскольку амплитуды этих изменений малы (составляют несколько миллиметров в год), то для их регистрации необходимо иметь точную “земную” опорную систему координат соответствующей стабильности – 1 мм по координатам и 0,1 мм в год по скорости их изменения. Достижение такой точности к 2020 г. – главная цель проекта GGOS. В рамках проекта GGOS планета Земля рассматривается как единое целое, включая ее твердые слои, океаны и атмосферу в статике и во времени. В случае успешной реализации проекта его достижения станут значительным вкладом в фундаментальные научные исследования происходящих глобальных изменений на Земле.

Малые изменения уровня Мирового океана, объема ледниковых масс и глобального водного цикла отражаются в структуре гравита-

ционного поля планеты и в его изменениях, происходящих во времени. Отметим некоторые особенности коэффициентов гравитационного поля Земли. При их определении методом математической обработки лазерных измерений ученые используют данные геодезических ИСЗ “Lageos-1/2” (США) и “Эталон-1/2” (Россия). Тонкая структура гравитационного поля уточняется на основе градиентометрических измерений (данные с европейского научного спутника “GOCE”, 2009–2013; Земля и Вселенная, 2009, № 4, с. 71) и наблюдений в измерительных системах “спутник – спутник” по схеме “низкий – низкий” (данные с немецких геодезических спутников “GRACE-1/2”) и “высокий – низкий” (результаты проектов “CHAMP” и “GRACE”; Земля и Вселенная, 2010, № 5).

МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Изучение Земли астрометрическими и геодезическими методами подразумевает решение трех основных задач:

- определение положений точек земной поверхности, а также скоростей их изменения и положения центра масс Земли (геоцентра);
- исследование изменения ориентации оси вращения в теле Земли

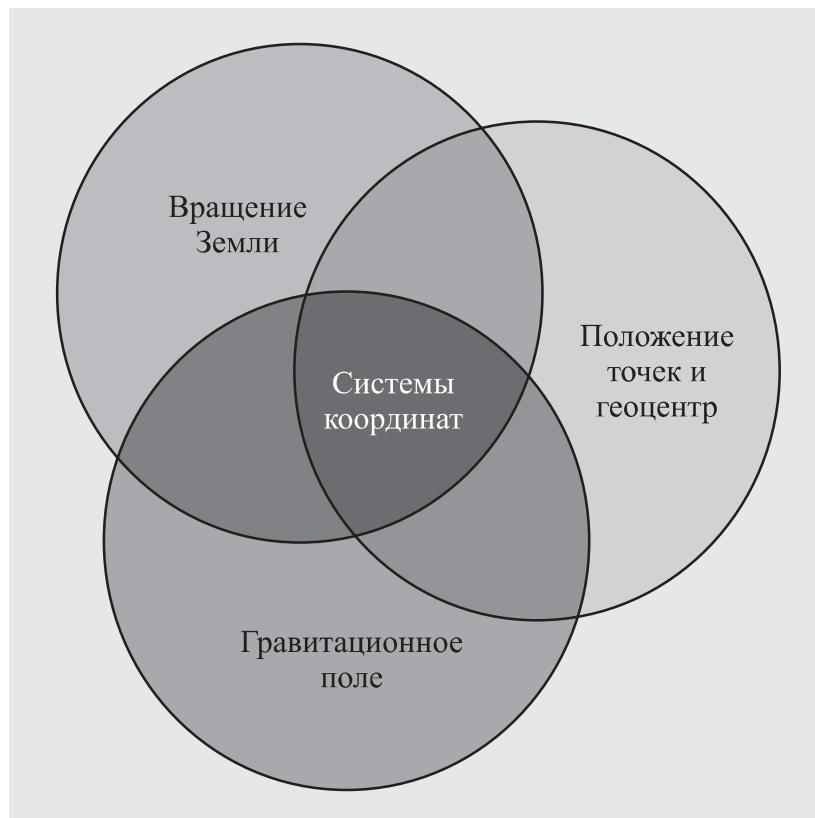
(движение полюсов) и в пространстве (прецессия и нутация), а также изучение вариаций скорости вращения Земли;

– определение гравитационного поля Земли, изучение его временных вариаций.

Необходимым условием в определении и изучении этих трех составляющих является определение общей системы отсчета, относительно которой проводятся все измерения. Построение такой системы и контроль за ее стабильностью есть первоочередная задача космической геодезии. Геодинамические параметры – это координаты наземных станций, параметры вращения Земли, движение геоцентра, коэффициенты гравитационного поля планеты и их изменения со временем.

В настоящее время исследования Земли выполняются с применением шести основных методов, каждый из которых позволяет определять ее геодинамические параметры:

– использование радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (VLBI);



– использование возможностей глобальных навигационных спутниковых систем (российской “Глонасс”, американской GPS, китайской “Compass”, европейской “Galileo”);

– с помощью доплеровских измерений (система DORIS);

– использование результатов лазерных наблюдений спутников (SLR) и Луны (LLR);

– с помощью спутниковой альтиметрии;

– с помощью спутниковой градиентометрии (SGG) и системы “спутник-спутник” (STT).

Каждый из методов помогает решать определенный круг задач. Они представлены ниже в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ СПУТНИКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Измерения системы DORIS. Спутниковая радиотехническая система DORIS была разработана и реализована французским космическим агентством (CNES) в тесном сотрудничестве с научно-исследовательской группой по космической геодезии (GRGS, Франция) и французским Национальным институтом географии (IGN) с целью осуществления высокоточного контроля орбит океанографических спутников, имеющих на борту прецизионные альтиметры. Первый из семи спутников французской системы ИСЗ дистанционного

ПРИМЕНЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ

Определяемые параметры	РСДБ	ГНСС	ДОРИС	SLR	LLR	Альтиметрия	SGG STT
Нутация							
Движение полюса							
UT1-UTC							
Δ LOD							
Амплитуды океанических волн							
Координаты станций							
Гравитационная постоянная GM							
Координаты геоцентра							
Гравитационное поле Земли							

зондирования Земли “SPOT-2” был выведен на орбиту в феврале 1990 г. и проработал до 2009 г.

В середине 2003 г. Международная геодезическая ассоциация (IAG) установила для Международной службы DORIS (IDS) новый высокий статус – она стала одной из технических служб IAG в составе создаваемой в настоящее время системы GGOS. В данный момент более 50 исследовательских групп из 35 стран принимают участие

в деятельности IDS на разных этапах ее работы. Сейчас шесть Центров анализа измерений DORIS получают и посылают свои результаты в Центры данных; один из них находится в ИНАСАН.

С 1997 г. в Аналитическом центре нашего Института ведется регулярная обработка данных измерений, поступающих из глобальной сети DORIS. Для обработки этих измерений наш Институт использует лицензионный программный пакет GIPSY/OASIS II,

разработанный в Лаборатории реактивного движения (JPL, NASA). Эта программа позволяет обрабатывать и анализировать различные типы спутниковых измерений (лазерные, доплеровские; выполненные различными радионавигационными системами). Центр анализа DORIS на базе ИНАСАН переработал все измерения, полученные системой DORIS за 1993–2015 гг., используя при этом модели, рекомендованные Международной службой вращения Земли



и опорных систем координат (IERS).

Особое значение для построения глобальной системы координат имеет задача определения и контроля за движением центра масс Земли (геоцентра). Относительно

геоцентра описываются движение Земли в инерциальном пространстве и орбитальное движение искусственных спутников Земли.

Под таким движением понимают смещение центра масс Земли

Карта сети станций системы DORIS. Рисунок из интернет-сайта IDS.

Станция BADB системы DORIS (Бадары, Россия).





Карта международной сети лазерных станций. Рисунок из интернет-сайта SLR.

относительно центра поверхности твердой Земли, которое, в свою очередь, может быть определено по данным наблюдений ИСЗ станций глобальной сети.

Лазерные измерения. В 2015 г. в нашем Институте разработан программно-вычислительный комплекс “ГеоИС” (геодинамические исследования), реализующий самые современные и высокоточные алгоритмы и модели, применяемые при обработке спутниковых измерений. Программный пакет “ГеоИС” предназначен для обработки лазерных наблюдений, полученных искусственными

спутниками Земли; он позволяет определять орбиты сферических геодезических ИСЗ, уточнять координаты станций, параметры вращения Земли, коэффициенты гравитационного поля нашей планеты, а также координаты ее геоцентра.

При вычислении возмущающих ускорений, действующих на спутники, исследователи учитывают широкий спектр факторов: влияние гра-

витационного поля Земли; твердых земных, океанических и полюсных приливов; притяжение тел Солнечной системы, световое давление, атмосферное торможение, переотражение и переизлучение Землей солнечной радиации; перемещения неприливных масс в атмосфере и в океанах, влияние атмосферных приливов. Реализованы способы определения смещения станций



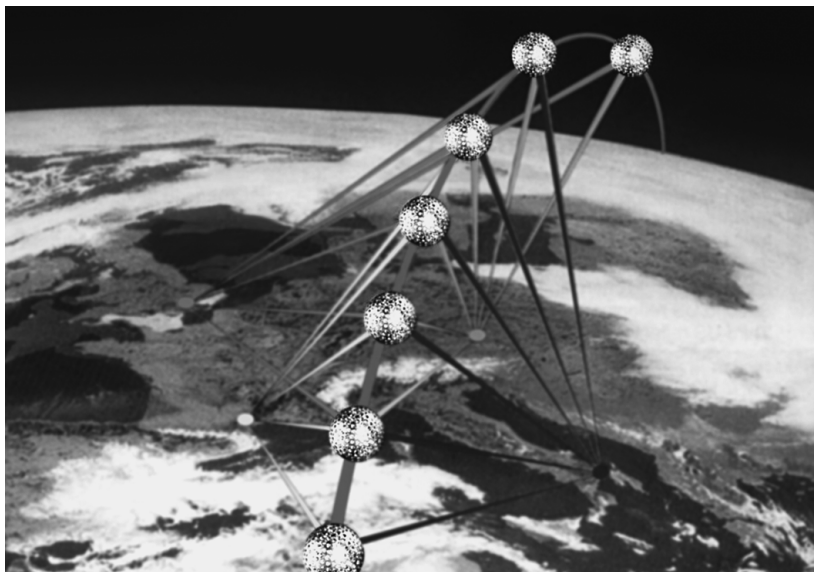
Луч лазера из купола лазерной станции в Гринбелт, США. Фото NASA.

Схема проведения лазерных измерений.

наблюдений, происходящие из-за влияния различных видов нагрузок, действующих на станции измерения (твердой приливной, океанической, атмосферной); деформаций, вызванных вращением Земли.

В 2001–2013 гг. GGOS выполнена обработка результатов некоторого количества лазерных наблюдений, полученных со спутников “Lageos-1,2”. Ученые ИНАСАН определили орбиты указанных спутников, координаты станций, параметры вращения Земли и коэффициенты гравитационного поля до четвертой степени. При совместной обработке высоко- и низкоорбитальных спутников удалось существенно снизить связь между некоторыми параметрами и повысить их точность, особенно для поправок ко Всемирному времени. В результате определения длительности суток получают среднеквадратические отклонения от эталонного ряда – 0,194 мс и 1,074 мс соответственно.

В целом на основе полученных результатов можно утверждать, что разработанный программный комплекс “ГеоИС” позволяет определять орбиты спутников, координаты станций, параметры вращения Земли (ПВЗ) и коэффициенты



гравитационного поля Земли с высокой точностью. Он соответствует уровню зарубежных программных комплексов, а именно:

- ряды коэффициентов гравитационного поля Земли согласуются с аналогичными результатами из мировых центров, полученными в результате обработки лазерных наблюдений различных спутников;

- полученные ряды параметров вращения Земли сопоставимы с результатами, полученными с применением других программных пакетов;

- суммарные ошибки в плоскости и по высоте определения координат станций не превосходят 7–10 мм для большинства станций (важное значение имеет количество проведенных наблюдений).

Перспективы дальнейшего развития качества обработки лазерных измерений в ИНАСАН мы

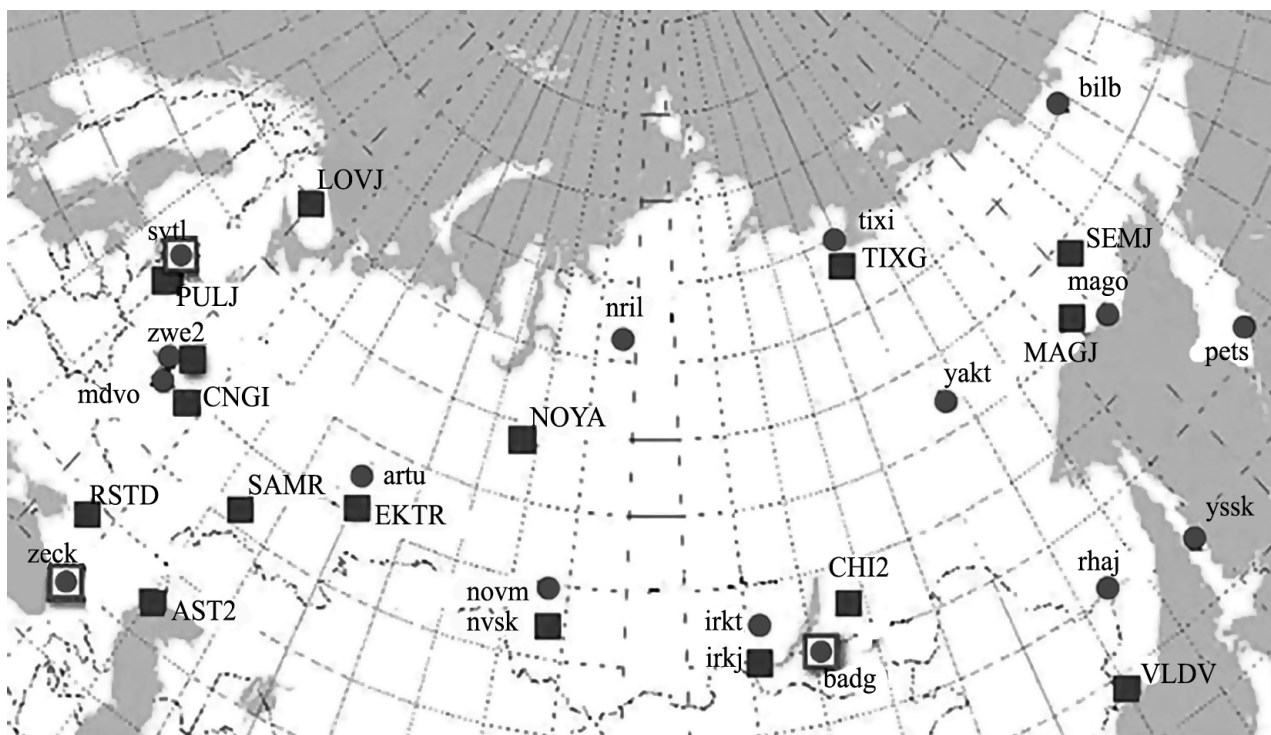
связываем с решением следующих задач:

- комплекс “ГеоИС” в дальнейшем планируется развивать, расширяя количество определяемых параметров и повышая точность их определения путем включения в обработку большего числа ИСЗ;

- необходимо увеличивать количество исследований и повысить точность получаемых результатов;

- включить результаты, получаемые с использованием комплекса “ГеоИС”, в базу данных Международной службы лазерной локации.

Обработка измерений навигационных спутниковых систем. Помимо обработки измерений, полученных со станций сети DORIS и лазерной локации, нами проводится обработка измерений глобальных навигационных спутниковых систем GPS и “Глонасс”. Эта работа проводилась с помощью



Карта действующих станций российской фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС), использующей данные глобальных навигационных спутниковых систем. Станции ФАГС обозначены квадратами, международные станции – кружками, станции с несколькими космическими технологиями – кружками в квадрате.

типов. Разницы в оценке координат, полученных из независимых источников (от систем “Глонасс” и GPS), находятся в интервале от 1 до 10 мм – тем самым подтверждая идентичность точностных характеристик, полученных двумя указанными навигационными системами.

Гравитационное поле является одним из физических полей системы Земля. Точная информация о его параметрах необходима для решения задач во многих областях науки (в геодезии, геофизике, геодинاميке, в океанологии, в небесной

программного комплекса GIPSY/OASIS II, при этом учитывались новые модели и методики, влияющие на точность измерений. Использовались данные от 15-ти постоянно действующих станций российской фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) за один год (2013–2014).

На станциях были установлены двухчастотные приемники различных

Гравитационное поле Земли и спутниковая градиентометрия. В ИНАСАН выполняются исследования по определению параметров гравитационного поля Земли на основе использования градиентометрических измерений.

Станция IRKT (Иркутск, Россия) глобальной навигационной спутниковой системы.



механике). Для решения этих задач до начала XXI в. использовались результаты наземных и морских измерений, а также наблюдений ИСЗ с пунктов слежения. После 2000 г. началась новая эра в изучении гравитационного поля Земли. Прежде всего это связано с реализацией проектов “CHAMP” (Германия), “GRACE” (США, Германия), “GOCE” (ESA).

Проект “CHAMP” был разработан в 1994 г. Немецким аэрокосмическим центром (DLR) и Научно-исследовательским центром Земли в Потсдаме. Этот проект был разработан для решения следующих задач:

- глобальное определение длинноволновой структуры гравитационного поля Земли и его временных вариаций;
- оценка глобального магнитного поля Земли и характеристик его

пространственно-временной изменчивости;

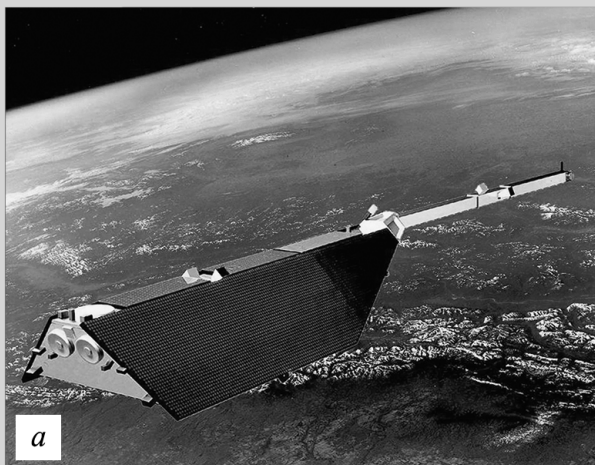
- получение данных о рефракции, вызванной влиянием атмосферы и ионосферы.

Для решения этих задач 15 июля 2000 г. был запущен немецкий научный ИСЗ “CHAMP” (Challenging Minisatellite Payload – перспективный научно-исследовательский мини-спутник) массой 522 кг и длиной 8 м (включая “хвостовую стрелу” в 4 м) на орбиту высотой 422×475 км и наклоном $87,27^\circ$ (Земля и Вселенная, 2002, № 1, с. 104). На его борту были установлены следующие сенсорные системы: трехосный акселерометр для измерения действующих на него возмущений негравитационного характера; двухчастотная аппаратура спутниковой навигации для определения орбиты спутника; система поддержания ориентации

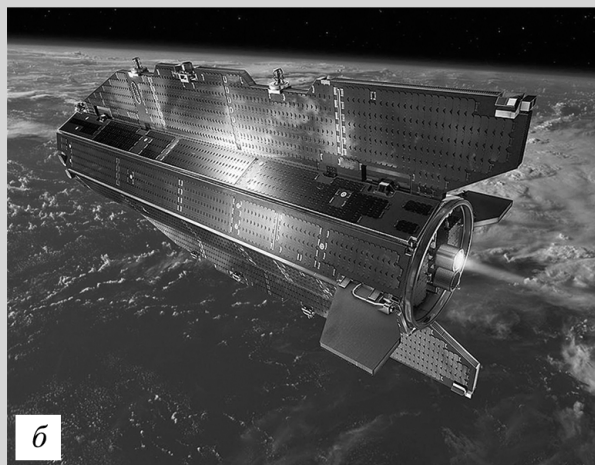
и параметров орбиты; лазерные уголкообразные отражатели для измерения дальности до спутника с наземных пунктов наблюдения; две звездные камеры для получения информации об ориентации в инерциальном пространстве; магнитометр для измерения параметров магнитного поля Земли.

Основываясь на математических данных из обработанной информации, полученной за 10 лет работы ИСЗ “CHAMP”, были построены модели гравитационного поля Земли. По этим моделям были рассчитаны высоты геоида (поверхности Земли)

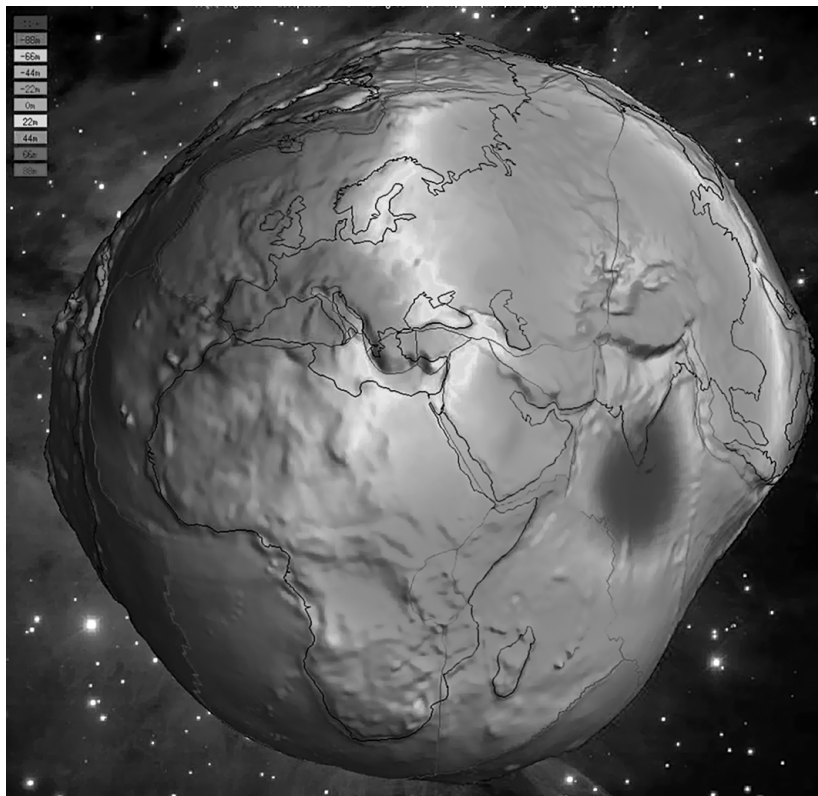
Немецкий научный спутник для изучения гравитационного и магнитного полей Земли “CHAMP” – а; европейский геодезический ИСЗ “GOCE” – б. Рисунки DLR и ESA.



а



б



Модель геоида. Темными и светлыми оттенками показаны отклонения от земной поверхности, полученные при обработке данных проекта "GRACE". Рисунок из интернет-сайта GFZ, Потсдам.

с точностью 10 см и пространственным разрешением 350 км (70 первых гармоник гравитационного потенциала Земли).

Проект "GRACE" (Gravity Recovery And Climate Experiment – эксперимент по изучению гравитационного поля и климата Земли) разработали Немецкий аэрокосмический центр и Научно-исследовательский центр в Потсдаме. 17 марта 2002 г. на круговую орбиту высотой около 500 км, наклонением 89° и периодом обращения 94,5 мин запущены два идентичных немецких научных спутника "GRACE" (Земля и Вселенная, 2003, № 1, с. 76). Между ними выдерживается расстояние – 220 км. Оба ИСЗ массой по 432 кг и длиной 3,12 м оснащались

микроволновым дальномером, аппаратурой спутниковой навигации GPS, акселерометром и лазерным отражателем для высокоточных измерений дальности (1–2 см) до КА с наземных пунктов наблюдения. В задачи полета спутников входили:

- определение параметров гравитационного поля Земли (его длинноволновой и средневолновой части с более высоким пространственным разрешением, чем в проекте "CHAMP");

- исследование временных вариаций гравитационного поля Земли, вызванного крупномасштабными перемещениями воздушных масс и установление их связи с изменением климата на Земле.

Определяют параметры гравитационного поля Земли следующим образом: два спутника движутся по одной и той же орбите на расстоянии около 220 км один от другого; расстояние между ними измеряется дальномерной системой с точностью до 1 мкм; изменяющееся расстояние между спутниками дает информацию о возмущающих ускорениях, исходящих от гравитационного поля Земли; эффект действия на спутники возмущающих сил негравитационного характера измеряется с помощью акселерометров; орбита каждого спутника, оборудованного аппаратурой спутниковой навигации, непрерывно отслеживается глобальной навигационной спутниковой системой GPS, а также определяется по лазерным измерениям дальности до спутников с наземных пунктов наблюдения.

Основываясь на математических результатах обработанной информации, полученной за время работы ИСЗ "CHAMP-1,2", были построены модели гравитационного поля Земли:

GGM01S (2003), GGM02S (2004), GGM03S (2008). По ним были рассчитаны высоты геоида с точностью до 5 см и пространственным разрешением 160–110 км (120–180 гармоник гравитационного потенциала Земли).

В проекте “GOCE” (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer – гравитационное поле Земли и океанические течения) планировалось изучить физику процессов, связанных с геодинамикой литосферы Земли и ее мантии; исследовать циркуляцию океана и перемещения океанических масс; оценивать толщину полярных шапок; устанавливать глобальную высокоточную систему высот, которая служит основой при исследовании различных физических процессов, протекающих на Земле (включая эволюцию ледяных полярных шапок). Этим целям предлагалось достичь путем определения параметров гравитационного поля Земли относительно

высот геоида и аномалий силы тяжести с точностью до 1 см и 1 мГал соответственно, с пространственным разрешением 100 км. Столь высокая точность в решении этой задачи достигается в результате математической обработки информации, полученной спутниковым гравитационным градиентометром. На борту ИСЗ “GOCE” находятся следующие приборы: двухчастотные датчики спутниковой навигации для определения орбиты по наблюдениям спутников глобальной навигационной спутниковой системы GPS; уголкового лазерные отражатели для высокоточных измерений расстояния (от 1 до 2 см) до спутников с наземных пунктов наблюдения; звездные камеры для определения ориентации КА в инерциальном пространстве; система контроля высоты полета спутников.

17 марта 2009 г. был успешно осуществлен запуск европейского науч-

ного спутника “GOCE”, который выведен на круговую орбиту с высотой 270 км, наклоном $96,8^\circ$ и периодом обращения 90 мин. По измерениям, выполненным за время его работы (до 13 октября 2013 г.), составлены высокоточные модели гравитационного поля Земли (Земля и Вселенная, 2010, № 5).

Земля – одна из планет Солнечной системы, на которой мы живем, поэтому изучение ее строения, взаимодействия составных частей между собой и проявления этого взаимодействия во внешней среде представляет огромный научно-практический интерес. Это помогает предсказывать многие катастрофические явления, влияющие на жизнь всего человечества. Методы космической геодезии позволяют исследовать геодинамические параметры, отражающие физические процессы, протекающие на нашей планете.