

<https://doi.org/10.15407/knit2019.04.057>

Л. В. Рыхлова, А. А. Ключиков

Институт астрономии РАН

ИСКУССТВЕННЫЕ СПУТНИКИ ЗЕМЛИ: КОСМИЧЕСКАЯ ГЕОДЕЗИЯ И ГЕОДИНАМИКА

С изучения полета первого ИСЗ и определения орбит последующих ИСЗ началась принципиально новая эра в изучении фигуры и гравитационного поля Земли. Методы решения геодезических задач по наблюдениям ИСЗ можно условно разделить на геометрические и динамические. Для решения геодезических задач первыми стали применяться геометрические методы космической геодезии. В этих методах ИСЗ рассматривается только как высокая визирная цель. Решение геодезических задач геометрическими методами космической геодезии осуществлялось на основе синхронных наблюдений спутника с нескольких пунктов. Наблюдения ИСЗ выполнялись с помощью фотографических, радиотехнических или лазерных измерительных систем. Одними из первых объектов наблюдения в геометрических методах космической геодезии были спутники-баллоны «Эхо-1», «Эхо-2», ПАГЕОС, а также геодезические спутники серии ГЕОС, на борту которых были размещены лампы-вспышки для осуществления синхронности фотонаблюдений. Эти методы использовались при практической реализации первых геодезических программ спутниковой (космической) триангуляции, что позволило с высокой точностью определять геоцентрические координаты станций слежения. Бурное развитие теории движения ИСЗ, создание специальных геодезических спутников и разработка новых средств для их наблюдений (доплеровские приемники, лазерные дальномеры, радиодальномерные системы) привели к тому, что для решения геодезических задач все более широко стали применяться динамические методы космической геодезии, основанные на вычислении точной орбиты ИСЗ по результатам траекторных измерений с учетом всех действующих на него сил. При этом определяемыми параметрами являлись координаты пунктов, параметры гравитационного поля Земли, параметры модели движения ИСЗ, а также некоторые геодинамические параметры (например параметры вращения Земли). Кроме того, в отличие от геометрических методов космической геодезии динамические методы не требовали выполнения синхронных наблюдений ИСЗ и позволяли определять координаты пунктов в системе координат, связанной с центром масс Земли. Значительный вклад в решение геодезических и геодинамических задач внесло использование наблюдений космических аппаратов глобальных навигационных спутниковых систем. Решение геодинамических задач связано с исследованием динамических процессов, протекающих в системе Земли, и силовых полей, обуславливающих эти процессы. Как показали результаты решения многих геодинамических задач, а также спутниковых гравитационных миссий, методы космической геодезии могут успешно использоваться для определения многих параметров, отражающих динамические процессы в недрах Земли. При этом ИСЗ часто бывают общими, как при решении геодезических, так и задач других наук о Земле. В статье отражены основные этапы развития методов космической геодезии при определении фигуры и гравитационного поля Земли, а также использование этих методов для решения задач геофизики, геодинамики, океанологии и других наук о Земле.

Ключевые слова: космическая геодезия, геодинамика, искусственный спутник Земли, методы космической геодезии, спутниковая триангуляция, гравитационное поле Земли.

ВВЕДЕНИЕ

Запуск первого искусственного спутника Земли ознаменовал начало космической эры, что способствовало появлению во многих областях нау-

ки новых направлений развития. Это коснулось и геодезии: на стыке геодезии, геофизики, астрометрии, небесной механики, радиоэлектроники появилась новая научная дисциплина — космическая геодезия.

© Л. В. РЫХЛОВА, А. А. КЛЮИКОВ, 2019

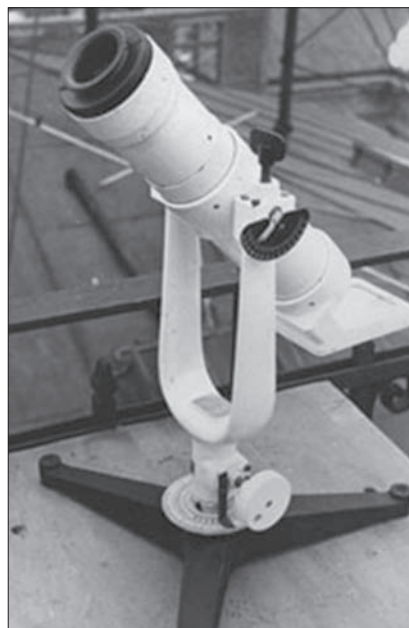


Рис. 1. Астрономическая трубка АТ-1 [9]



Рис. 2. Наблюдения первого искусственного спутника Земли [9]

Космическая геодезия имеет своей основной задачей создание глобальной земной системы координат и определение параметров гравитационного поля Земли. Началом решения этой задачи в нашей стране можно считать Постановление Советского правительства 1956 г., согласно которому Академии наук СССР была поручена работа по созданию сети станций наблюдения и организации подготовки наблюдателей «космических изделий». Непосредственное исполнение этой работы было возложено на Астрономический совет (далее — Астросовет) АН СССР [9].

Первоначально было решено использовать находящиеся в системе АН СССР, а также в высших учебных заведениях, астрономические телескопы. Однако имевшиеся в крупных обсерваториях телескопы оказались непригодными для слежения за низкоорбитальными космическими объектами из-за больших угловых скоростей последних. Поэтому по заказу Астросовета АН СССР были изготовлены небольшие астрономические «спутниковые» широкоугольные трубки АТ-1 с диаметром входного зрачка 50 мм, шестикратным увеличением и полем зрения 11° (рис. 1) [9].

В августе 1957 г. поступило указание Астросовету АН СССР сообщить о готовности сети к контролю за полетом космического аппарата. К 1 октября 1957 г. на территории СССР были готовы к работе 66 станций (рис. 2). При этом еще несколько десятков станций находились за пределами СССР. Эти простейшие оптические наблюдения позволили в дальнейшем начать отработку методов обнаружения, контроля движения и распознавания искусственных спутников Земли (ИСЗ).

МЕТОДЫ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СРЕДСТВА КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ

Для решения фундаментальной задачи геодезии (исследование фигуры, размеров и гравитационного поля Земли) стали использоваться методы космической геодезии, которые условно можно разделить на геометрические и динамические (орбитальные).

Для решения геодезических задач первыми стали применяться геометрические методы космической геодезии. Решение геодезических задач геометрическими методами космической геодезии осуществлялось на основе синхронных

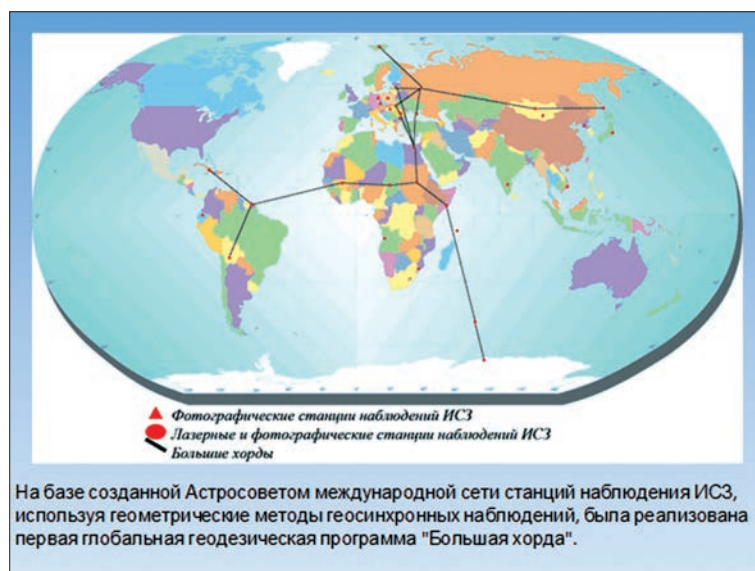


Рис. 3. Два векторно-триангуляционных хода: «Арктика — Антарктика» и «Восток — Запад» (от Боливии до Японии) [9]

наблюдений спутника с нескольких пунктов. Наблюдения ИСЗ выполнялись с помощью фотографических, радиотехнических или лазерных измерительных систем. В этих методах ИСЗ рассматривается как высокая визирная цель, а теория движения ИСЗ использовалась лишь в эфемеридных целях. Это приводило к простым математическим соотношениям между измеряемыми и определяемыми параметрами. Координаты определяемых пунктов получали в системе координат исходных пунктов.

Построение первых экспериментальных геодезических сетей было начато в США (Смитсоновская астрофизическая обсерватория) и в СССР (Астросовет АН СССР, ныне — Институт астрономии РАН). В этих работах в СССР помимо отечественных станций наблюдений активное участие принимали станции наблюдений Академий наук Болгарии, Венгрии, ГДР, Кубы, Монголии, Польши, Румынии, Чехословакии. В рамках сотрудничества этих стран в области космической геодезии велись работы по проекту «Большая хорда», согласно которому на основе фотографических и лазерных измерений предполагалось проложить два векторно-триангуляционных хода: «Арктика — Антарктика» и «Восток — Запад» (от Боливии до Японии) (рис. 3) [9].

Одними из первых объектов наблюдения в геометрических методах космической геодезии были спутники-баллоны «Эхо-1», «Эхо-2», ПАГЕОС, а также геодезические спутники серии ГЕОС, на борту которых были размещены лампы-вспышки для осуществления синхронности фотонаблюдений [3].

Искусственные спутники Земли серии «Эхо» были разработаны для использования спутниковых космических ретрансляторов и представляли собой баллон: сферу из тонкой полиэфирной плёнки (толщина 0.0127 мм) с алюминиевым напылением для отражения радиосигнала. ИСЗ «Эхо-1» (рис. 4) был выведен на орбиту Земли 12 августа 1960 г. Благодаря зеркальному покрытию и большому размеру, «Эхо-1» был ярчайшим искусственным спутником на ночном небе: его звёздная величина достигала -1^m . ИСЗ «Эхо-2», запущенный на орбиту 25 января 1964 г., предназначался для выполнения исследований в совместной программе СССР и США по спутниковой связи. Кроме этого, широко проводились его фотографические наблюдения для создания спутниковой триангуляции, а также по наблюдениям эволюции орбиты ИСЗ «Эхо-2» исследовались вариации плотности верхней атмосферы Земли.



Рис. 4. Спутник «Эхо-1» (слева) [https://ru.wikipedia.org/wiki/Эхо_(программа)] и конверт, посвященный его запуску (справа) [11]



Рис. 5. Спутник ПАГЕОС (слева) [https://ru.wikipedia.org/wiki/PAGEOS] и конверт, посвященный его запуску (справа) [11]

ИСЗ ПАГЕОС (PAGEOS — *Passive Geodetic Earth Orbiting Satellite* — *пассивный геодезический спутник Земли*) — искусственный спутник-баллон, выведенный NASA на полярную орбиту с высоким наклонением ($85...86^\circ$) и высотой полета около 4000 км 24 июня 1966 г. ИСЗ ПАГЕОС (рис. 5) также представлял собой сферу из тонкой полимерной пленки диаметром 31 м и имел массу 56 кг. Наблюдения ИСЗ ПАГЕОС использовались для создания мировой сети спутниковой триангуляции, состоящей из 46 пунктов (расстояние между пунктами 3000...5000 км). Пункты располагались на всех континентах. Математическая обработка наблюдений ИСЗ ПАГЕОС позволила определить координаты пунктов наблюдения спутника с точностью по-

рядка 3...5 м, т. е. в 20 раз точнее результатов наземной триангуляции. Спутник функционировал до июля 1975 г.

Фотографические наблюдения ИСЗ за рубежом выполнялись в основном знаменитой фотографической камерой Бейкера — Нанна (рис. 6) [3], результаты наблюдений которой были использованы при выводе системы геодезических параметров «Стандартная Земля-1» [13], а в СССР и некоторых других странах — с помощью фотографической камеры АФУ-75 (рис. 7). Фотографическая камера АФУ-75 была создана М. Абеле и К. Лапушка, сотрудниками станции наблюдений ИСЗ при Латвийском университете. К концу 1965 г. этой фотокамерой были оснащены все станции наблюдений Астросовета АН СССР.



Рис. 6. Фотографическая камера Бейкера — Нанна [3]

Фотографические наблюдения ИСЗ впервые обеспечили достаточную точность решения геодезических задач по наблюдениям спутников. Однако серьезным недостатком фотографических методов наблюдения ИСЗ была их полная зависимость от погодных условий и жесткие условия видимости в случае синхронных наблюдений. Кроме того, турбулентность атмосферы являлась серьезным препятствием для повышения точности фотографических наблюдений ИСЗ.

Бурное развитие теории движения ИСЗ, создание специальных геодезических спутников и разработка новых средств для их наблюдений (доплеровские приемники, лазерные дальномеры, радиодальномерные системы) привели к тому, что для решения геодезических задач все более широко стали применяться динамические методы космической геодезии, основанные на вычислении точной орбиты ИСЗ по результатам траекторных измерений с учетом всех действующих на него сил. При этом определяемыми параметрами являлись координаты пунктов, параметры гравитационного поля Земли, параметры модели движения ИСЗ, а также некоторые геодинимические параметры (например, параметры вращения Земли). Кроме того, в отличие от геометрических методов космической геодезии, динамические методы не требовали выполнения синхронных наблюдений ИСЗ и позволяли определять координаты пунктов в системе координат, связанной с центром масс Земли. Значительный вклад в развитие динамического метода



Рис. 7. Фотографическая камера АФУ-75 [3]

космической геодезии внесли такие ученые, как У. Каула [4], Е. Гапошкин [12], Р. Андерле, Г. Устинов, А. Изотов [3] и др.

ПЕРВАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ СПУТНИКОВАЯ ПРОГРАММА NGSP

В 1964 г. NASA совместно с Министерством обороны США и Геодезической службой США разработала Национальную геодезическую спутниковую программу (National Geodetic Satellite Program, NGSP), целью которой являлось [https://ru.wikipedia.org/wiki/Эхо_(программа)]:

- создание глобальной геодезической сети, состоящей из 86 пунктов, точность положения которых составляла не хуже 10 м,
- определение гармонических коэффициентов разложения геопотенциала в ряд по сферическим функциям до 15-го порядка.

Для практической реализации этой программы были запущены три специальных геодезических спутника: ГЕОС-1 (GEOS-1, запущен 6 ноября 1965 г.), ГЕОС-2 (GEOS-2, запущен 11 января 1968 г.), ГЕОС-3 (GEOS-3, запущен 9 апреля 1975 г.). Все спутники были оснащены: лампами-вспышками; отражателями для лазерных наблюдений, доплеровской системой, радиодальномерной системой.

Спутник ГЕОС-3 (Geodynamics Experimental Ocean Satellite 3, см. рис. 8) был разработан в соответствии с программой NGSP и Прикладной программой физики Земли и океана (Earth and

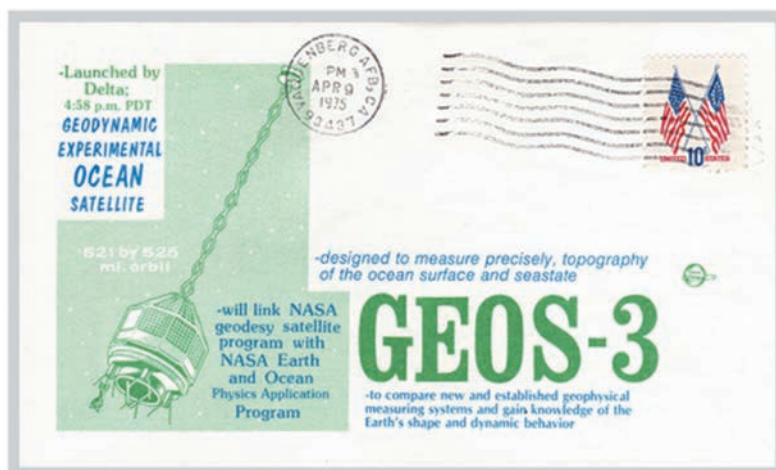
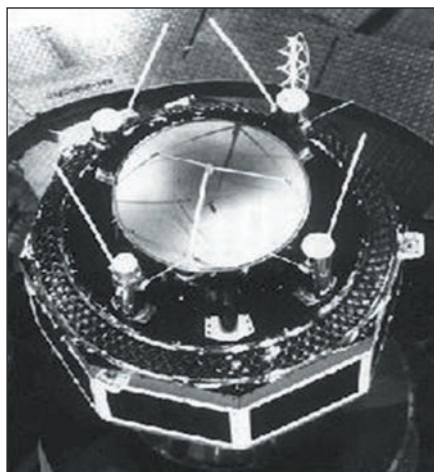


Рис. 8. Спутник ГЕОС-3 (слева) [[https://ru.wikipedia.org/wiki/GEOS_\(NASA\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/GEOS_(NASA))] и конверт, посвященный его запуску (справа) [11]

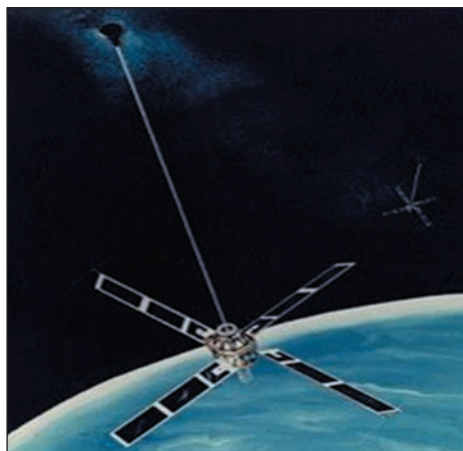


Рис. 9. Космический аппарат спутниковой навигационной системы TRANSIT (слева) [<https://ru.wikipedia.org/wiki/Transit>] и конверт, посвященный его запуску (справа) [11]

Ocean Physics Application Program, ЕОРАР). Поэтому помимо перечисленного выше оборудования, на борту спутника ГЕОС-3 имелся радиовысотометр для измерений высоты полета спутника над поверхностью океана, точность которого составляла 0.5 м [3].

Основной целью запуска ИСЗ ГЕОС-3 было уточнение параметров гравитационного поля Земли и фигуры геоида, исследование океанических приливов, топографии уровня морей и океанов, строения земной коры и динамики твердой Земли. Альтиметрические данные ИСЗ ГЕОС-3 были использованы при выводе моде-

лей гравитационного поля Земли GEM-T3, JGM-1 и JGM-2. Это был один из первых проектов комплексного использования наблюдений ИСЗ для решения геодезических задач и задач смежных наук о Земле. Эта тенденция сохраняется до настоящего времени.

Кроме этого, одной из целей миссии ГЕОС-3 было определение орбиты этого спутника посредством межспутникового слежения с геостационарного спутника ATS-6. Это был первый эксперимент межспутникового слежения.

В результате математическая обработка результатов наблюдений этих спутников в рамках

программы NGSP было определено, что точность определения координат пунктов в среднем по сети составляет 4.5 м [13].

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ TRANSIT В ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ЦЕЛЯХ

Значительный прогресс в решении геодезических задач был получен на основе наблюдений космических аппаратов спутниковой навигационной системы США TRANSIT (рис. 9) [3]. Система начала разрабатываться в США в 1958 г. Космический сегмент навигационной системы TRANSIT состоял из 6—7 навигационных спутников (масса каждого составляла 56 кг), движущихся по полярной околоземной орбите на высоте 1000 км. Координаты потребителя навигационной системы рассчитывались на основе приёма и выделения доплеровского сдвига частоты навигационного сигнала, излучаемого передатчиком навигационного космического аппарата на двух частотах 400 и 150 МГц. При этом навигационный спутник находился в зоне радиовидимости приемника в течение примерно 40 мин. Для коммерческого использования эта система была предоставлена в 1967 г., причем число гражданских потребителей вскоре существенно превысило число военных. Недостатком системы был охват не всей территории Земли и ограниченное время доступа к системе.

Использование навигационной системы TRANSIT в геодезических целях осуществлялось с использованием точных эфемерид КА КНС TRANSIT и обеспечивало высокую точность (единицы метров) определения координат для стационарных объектов.

За время эксплуатации КНС TRANSIT были получены:

- глобальная система геодезических параметров World Geodetic System 1972 (WGS-72), точность координатной основы составляла 1...2 м;
- модели гравитационного поля Земли — APL 1.0 (1963, $n = 4$); APL 3.5 (1965, $n = 8$); NWL -5E-6 (1966, $n = 7$); NWL -8 (8B, 8C, 8D, 1967, $n = 12$); NWL10E (1974, $n = 15$);
- высокоточные ряды координат полюса Земли (точность порядка 5 мсд), полученные впервые по спутниковым наблюдениям.

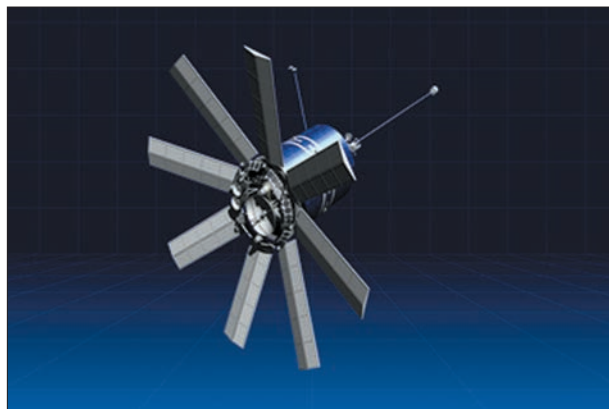


Рис. 10. КА КГК ГЕОИК [<https://www.iss-reshetnev.ru/spacecraft/spacecraft-geodesy/geo-ik>]



Рис. 11. Спутниковый лазерный дальномер LD-1 [9]

Помимо определения параметров вращения Земли доплеровские наблюдения КА КНС TRANSIT впервые использовались для определения параметров движения тектонических плит, получаемых на основе анализа длинных (20 лет) временных рядов координат пунктов сети TRANET. Спутниковая навигационная система TRANSIT просуществовала до 1996 г.

В СССР доплеровские наблюдения КА КНС TRANSIT выполнялись с 1978 г. в рамках программы «Интеркосмос». Главной целью этих ра-



Рис. 12. ИСЗ Starlette (слева) [https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/missions/satellite_missions/current_missions/star_general.html#obj] и конверт, посвященный его запуску (справа) [11]



Рис. 13. ИСЗ LAGEOS- I (слева) [<https://ru.wikipedia.org/wiki/LAGEOS>] и конверт, посвященный его запуску (справа) [11]

бот являлась геодезическая привязка действующих и перспективных геодинамических и лазерных станций и создание единой геодезической системы для геодинамических исследований [7]. Для решения геодезических задач помимо использования доплеровских наблюдений КА КНС TRANSIT использовались доплеровские наблюдения отечественных геодезических комплексов.

С 1985 г. в СССР началась эксплуатация космического геодезического комплекса ГЕОИК (рис. 10). Он был предназначен для решения следующих задач:

- установления единой системы координат с точностью геоцентрического положения пунктов не хуже 2 м и с точностью взаимного положения 0.5 м;

- уточнения параметров гравитационного поля Земли с точностью представления высот геоида в среднем по Земле — 2.5 м.

В процессе эксплуатации комплекса ГЕОИК выполнялось решение и некоторых других задач, в том числе — определение параметров вращения Земли. Результаты, полученные при решении целевых задач комплекса ГЕОИК, составили основу системы геодезических параметров Земли «Параметры Земли 1990 г.» и были опубликованы в сборнике «Космическая геодезия и современная геодинамика» под редакцией А. Г. Масевич в 1996 г. [1]. В настоящее время на орбите функционирует космический геодезический комплекс ГЕОИК-2. Поступающая со спутника информация обрабатывается в Центре обработки геодезической информации.

ЛАЗЕРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТЕЙ ДО ИСЗ В ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ЦЕЛЯХ

Параллельно с развитием радиотехнических средств наблюдений ИСЗ совершенствовались измерительные системы оптического диапазона — спутниковые лазерные дальномеры. В 1970 г. Астрономический совет АН СССР выступил с предложением организовать в рамках программы «Интеркосмос» рабочую группу по созданию спутникового лазерного дальномера. В работе приняли активное участие специалисты ВНР, ГДР, ПНР и ЧССР. В 1972 году общими усилиями ученых был создан первый экземпляр спутникового лазерного дальномера «Интеркосмос» (LD-1) (рис. 11), обеспечивающий измерение дальности до спутника с точностью 0.7...1..5 м при расстоянии до спутника 3500 км [9]. Появ-

ление нового поколения спутниковых лазерных высокоточных (дециметровый уровень точности) дальномеров и запуск двух геодинамических спутников Starlette (Satellite de Taille Adaptee avec Reflecteurs Laser pour les Etudes de la Terre, 6 февраля 1975 г.) и LAGEOS-1 (Laser Geodynamics Satellite, 4 мая 1976 г.), предназначенных для лазерных наблюдений (см. рис. 12, 13), стали новым этапом в развитии средств и методов космической геодезии для решения геодезических и геодинамических задач [3].

К концу 80-х гг. XX столетия из математической обработки лазерных наблюдений ИСЗ получены значительные результаты, превосходящие по точности другие измерительные средства:

1) получены параметры вращения Земли со средними квадратичными погрешностями менее



Рис. 14. ИСЗ ALISAI (слева) [https://yandex.ru/images/search?pos=5&img_url=https%3A%2F%2Ffoportal.org%2Fdocuments%2F163813%2F2472699%2FEGS_Auto1.jpeg&text=%D1%84%D0%BE%D1%82%D0%BE%20%D1%81%D0%BF%D1%83%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0%20ALISAI&rpt=simage&lr=213] и конверт, посвященный его запуску (справа) [10]



Рис. 15. ИСЗ GFZ-1 (слева) [https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/missions/satellite_missions/past_missions/gfz1_general.html] и конверт, посвященный его запуску (справа) [11]

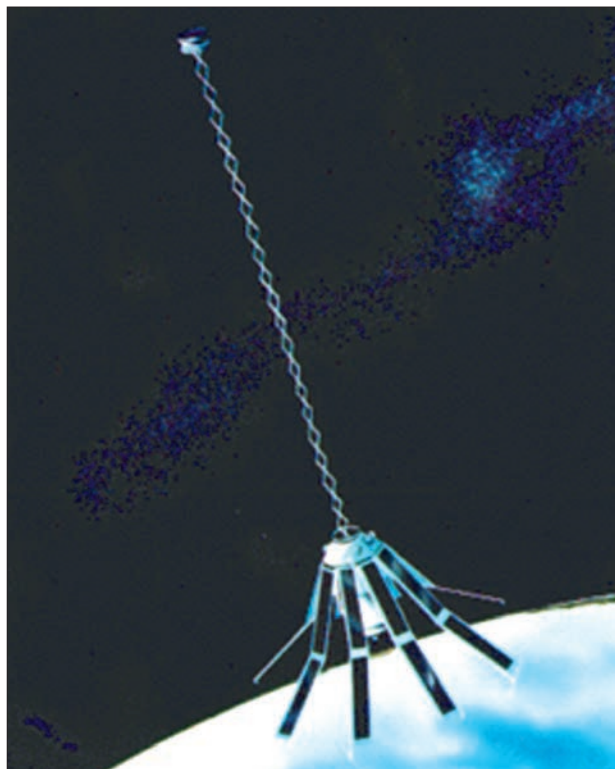


Рис. 16. ИСЗ GEOSAT [https://en.wikipedia.org/wiki/Geosat]

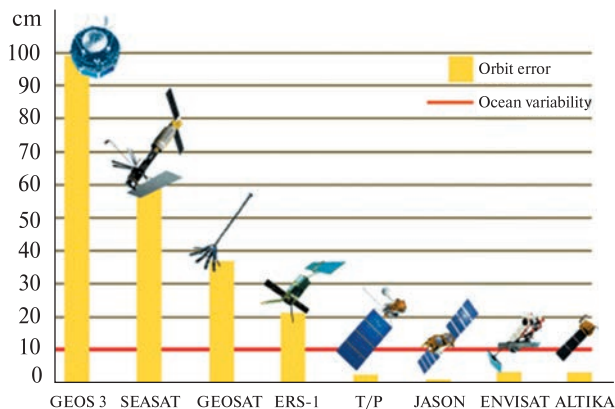


Рис. 17. Альтиметрические миссии

2 мсд — для координат полюса и менее 0.15 мс — для изменений длительности суток (LOD),

2) уточнены координаты 26 станций со средней квадратичной погрешностью не более 80 мм,

3) различными научными центрами созданы модели гравитационного поля, позволившие

повысить точность определения орбит спутников. Так, модель GEM-L2, полученная по лазерным наблюдениям, позволила повысить точность определения орбиты ИСЗ LAGEOS в четыре раза — с 1 м до 25 см,

4) получены параметры некоторых океанических приливных волн, хорошо согласующиеся с результатами, полученными из обработки различных типов наблюдений (наземных и спутниковых).

К середине 1990-х гг. точность измерения лазерных дальностей до ИСЗ достигает субсантиметровой точности. На орбиту выводятся новые спутники, предназначенные для лазерной локализации: ALISAI (1986 г., рис. 14), «Эталон-1» и «Эталон-2» (1989 г.), LAGEOS-2 (1992 г.), «Stella» (1993 г.), GFZ-1 (1995 г., рис. 15).

СПУТНИКОВАЯ АЛЬТИМЕТРИЯ

Классический динамический метод космической геодезии по измерениям с наземных пунктов слежения позволяет определять координаты пунктов и уточнять параметры модели гравитационного поля Земли. Однако этот метод имеет существенный недостаток: геодезическая сеть пунктов слежения, как правило, имеет недостаточную плотность. Кроме этого, используемые КА имеют высоты полетов над поверхностью Земли, при которых влияние гармонических коэффициентов геопотенциала высоких степеней является пренебрегаемо малым.

Альтернативным путем изучения фигуры Земли и ее гравитационного поля, свободным от указанных ограничений, является определение геоцентрического радиуса-вектора точек морей и океанов из математической обработки измерений, полученных при помощи спутникового радиовысотомера. В этом случае участок земной поверхности, облучаемый высотомером, можно рассматривать как «подвижный пункт слежения» за спутником, который перемещается вдоль подспутниковой трассы. При этом измерения высот ИСЗ при известной орбите, в отличие от других типов траекторных измерений, позволяют непосредственно получить высоты геоида.

Первый альтиметрический эксперимент был проведен в 1974 г. во время полета американской

орбитальной станции «Skylab». В июне 1978 г. был осуществлен запуск экспериментального ИСЗ SEASAT-1, оснащенного радиовысотомером, точность которого составляла 0.1 м. 12 марта 1985 г. был запущен ИСЗ GEOSAT (GEOdetic SATellite) (рис. 16). Целью этой миссии являлось изучение морской топографической поверхности посредством альтиметрических измерений и измерение приводных ветров. Миссия GEOSAT закончилась в январе 1990 г. Это была первая альтиметрическая миссия, позволившая получить на длительном временном интервале качественные альтиметрические данные. Последующие альтиметрические миссии и динамика повышения точности определения орбит альтиметрических спутников показаны на рис. 17.

В настоящее время действующими альтиметрическими миссиями являются следующие: «Jason-2», «CryoSat-2», «HaiYang-2», SARAL, «Jason-3», «Sentinel-3». В недалеком будущем планируется осуществить следующие альтиметрические миссии: «Jason-CS» (2020 г.), SWOT (2020 г.).

Основными факторами, влияющими на точность определения параметров гравитационного поля Земли по спутниковым альтиметрическим наблюдениям являются систематические и случайные ошибки спутникового высотомера и ошибка определения положения спутника на орбите (орбитальная ошибка). Для повышения точности орбит океанографических спутников, имеющих на борту прецессионные альтиметры, Французским космическим агентством (CNES) в тесном содружестве с научно-исследовательской группой космической геодезии (GRGS) и французским Национальным институтом географии (IGN) была разработана и реализована спутниковая радиотехническая система DORIS (Determination d'Orbite Radiopositionnement Integres par Satellite), принцип работы которой основан на измерении бортовым приемником доплеровского сдвига радиочастоты, излучаемой наземным передатчиком-маяком, который связан известными математическими соотношениями с радиальной скоростью космического аппарата. Практическая эксплуатация системы DORIS началась в 1990 г. с запуском первого

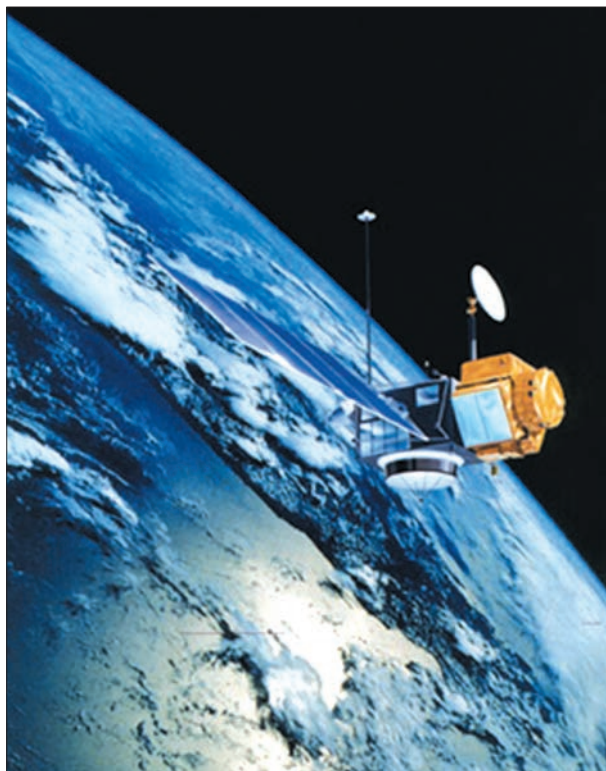


Рис. 18. КА TOPEX/Poseidon [<https://en.wikipedia.org/wiki/TOPEX/Poseidon>]

спутника SPOT2, оснащенного приемной аппаратурой системы DORIS. В августе 1992 г. приемная аппаратура DORIS была установлена на КА TOPEX/Poseidon (рис. 18).

Определение орбит спутников (на уровне нескольких сантиметров) позволило успешно использовать систему DORIS при решении следующих задач: определение параметров вращения Земли; точное определение координат пунктов земной поверхности; уточнение геоида с использованием альтиметрических данных. Основное преимущество системы DORIS при решении геодезических задач заключается в том, что работа пунктов-маяков полностью автоматизированы и передача и экспресс-обработка измерений выполняется в режиме реального времени.

Значительный прогресс в решении не только геодезических задач, но и в других областях был достигнут с использованием глобальных навигационных спутниковых систем.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ГЕОДИНАМИКЕ

Годом рождения глобальной спутниковой навигации в виде Глобальной системы позиционирования (Navstar Global Positioning System, GPS) можно считать 1973 г., когда Министерство обороны США инициировало процесс унификации навигационных систем (разные ведомства работали над разными системами, которые были несовместимы). Название GPS программа получила в том же 1973 г. Первый тестовый спутник выведен США на орбиту 14 июля 1974 г., а последний из всех 24 спутников, необходимых для полного покрытия земной поверхности, был выведен на орбиту в 1993 г. (рис. 19). Таким образом, начиная с 1993 г. стало возможным полноценно использовать возможности глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) GPS.

Первоначально ГНСС GPS разрабатывалась как чисто военный проект, но в настоящее время ГНСС GPS используется не столько в военной области, сколько в гражданских целях: мобильная связь; определение параметров движения тектонических плит; мониторинг сейсмической активности; мониторинг положения, скорости и движения транспорта; геодезия; определение точных границ земельных участков; картография; навигация и др. В настоящее время в мире помимо GPS

развернуты другие ГНСС: ГЛОНАСС (Россия), Galileo (Евросоюз), BEIDOU (Китай).

Кроме глобальных навигационных спутниковых систем, действуют региональные навигационные спутниковые системы: QZSS (Япония) и NavIC (Индия).

Использование GPS-технологии при решении геодезических задач позволило определять положение пунктов на сантиметровом уровне точности и осуществлять мониторинг их изменений. Это приводит к повышению точности расчета орбит ИСЗ и в итоге к повышению точности решения целевых задач с использованием методов космической геодезии. За всю историю космической геодезии были накоплены миллионы спутниковых наблюдений, из математической обработки которых были получены высокоточные системы координат и модели гравитационного поля Земли. Точность последних версий систем координат оценивается сантиметровым уровнем точности (ITRF 2014), а моделей ГПЗ, полученных до 2000 г. (EGM96), в пересчете на высоты квазигеоида — на субдециметровом уровне.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ СРЕДСТВАМИ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ

Для исследования процессов, происходящих в системе Земля, необходимо иметь параметры



Рис. 19. КА ГНСС GPS (слева) [https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/missions/satellite_missions/past_missions/gp35_general.html] и конверт, посвященный областям ее использования [11]

ГПЗ, точность которых в пересчете на высоты квазигеоида имеет миллиметровый уровень. Для получения параметров ГПЗ такой точности необходимо иметь охват измерениями всей поверхности Земли. Использование для этой цели только наблюдений ИСЗ, выполненных с наземных пунктов, по ряду причин затруднено. Во-первых, при математической обработке информации спутников, находящихся на высоте до 800 км, возникают сложности учета влияния атмосферного торможения на параметры их орбит. Во-вторых, неравномерное распределение наземных станций значительно влияет на точность определения орбит спутников. Следует также принять во внимание, что значения параметров модели ГПЗ, в качестве которых выступают коэффициенты разложения гравитационного потенциала в ряд по сферическим функциям, быстро убывают с увеличением высоты полета спутника. Поэтому для получения высокоточной высокостепенной модели гравитационного поля необходимо анализировать изменения орбит спутников, работающих на высотах 250...400 км, что практически неосуществимо с помощью траекторных измерений с наземных пунктов наблюдений. Актуальной стала задача разработки методов получения с высокой точностью высокостепенных моделей гравитационного поля Земли.

Методы определения гравитационного поля Земли с наземных пунктов основаны на наблюдениях движения полностью свободной тест-массы в гравитационном поле, роль которой выполняет космический аппарат. Альтернативная идея состоит в том, чтобы наблюдать движение тест-массы не с пунктов земной системы координат, а в системе координат, которая сама находится в свободном падении. Это может быть реализовано следующим образом: внутри КА размещается одна тест-масса или группа тест-масс, которая наблюдается относительно свободно падающего центра масс КА. В соответствии с этой идеей были разработаны две концепции методов наблюдений:

- межспутниковое слежение (Satellite-Satellite Tracking, SST),
- спутниковая гравитационная градиентометрия (Satellite Gravity Gradiometry, SGG).

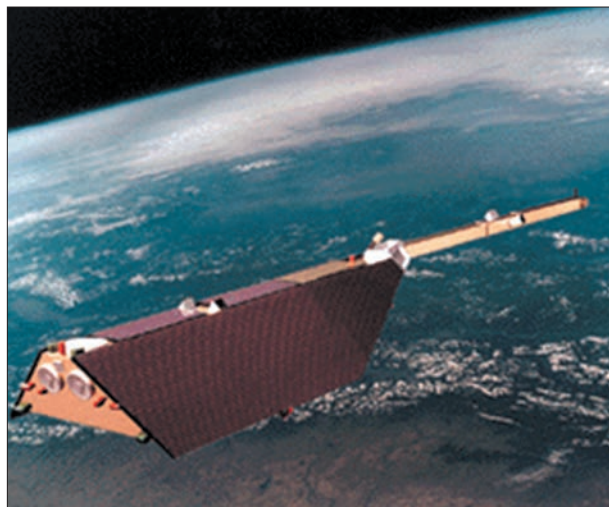


Рис. 20. Спутник проекта CHAMP [https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/missions/satellite_missions/past_missions/cham_general.html]

Изучение гравитационного поля Земли из космоса с помощью спутниковых систем основаны на комбинации этих двух концепций методов наблюдений. Практическая реализация данных концепций методов наблюдений была осуществлена в три проекта: германском **CHAMP**; американо-германском **GRACE**; европейском **GOCE** [5, 6]. Началась новая эра в изучении гравитационного поля Земли.

Проект CHAMP (CHAllenging Mini-satellite Payload) (рис. 20).

Начало практической реализации проекта — 15 июля 2000 г. Основные цели проекта — высокоточное глобальное определение длинноволновой структуры ГПЗ и его временных вариаций; высокоточное оценивание глобального магнитного поля Земли и характеристик его пространственно-временной изменчивости; получение глобально распределенных данных о рефракции, вызванной атмосферой и ионосферой. Состав бортовой аппаратуры — приемник навигационных сигналов ГНСС GPS, акселерометр, предназначенный для измерения негравитационных ускорений, звездная камера, по измерениям которой определялась ориентация КА относительно инерциального пространства. Основные результаты проекта: впервые глобальные модели гравитационного поля Земли были

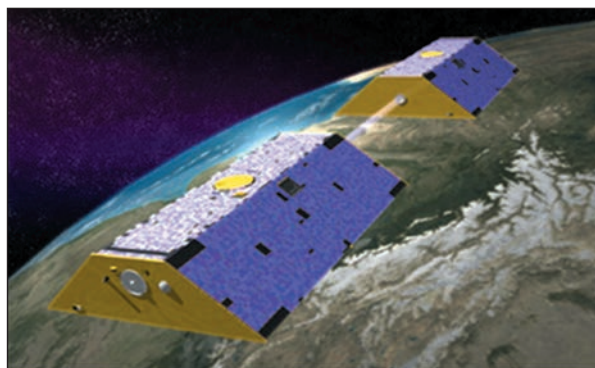


Рис. 21. КА проекта GRACE (слева) [https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/missions/satellite_missions/past_missions/graa_general.html] и конверт, посвященный их запуску (справа) [11]



Рис. 22. КА проекта GOCE (слева) [https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/missions/satellite_missions/past_missions/goce_general.html] и конверт, посвященный его запуску (справа) [11]

определены по наблюдениям только одного спутника. Однако пространственное разрешение модели гравитационного поля, полученной только по наблюдениям спутниковой гравитационной миссии CHAMP, ограничено максимальной степенью разложения $n = 80$, что обусловлено свойством метода межспутникового слежения в варианте «высокий — низкий». Анализ результатов, полученных в результате функционирования спутниковой гравитационной миссии CHAMP, позволил выявить временные вариации в сферических гармониках низкой степени (6...10).

Проект GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*) (рис. 21).

17 марта 2002 г. началась практическая реализация американо-германской спутниковой гравитационной миссии GRACE. На околополярную орбиту были запущены два КА, высота полета которых составляла 500 км, а расстояние между ними — 220 км. Состав бортовой аппаратуры на каждом КА миссии GRACE был аналогичен составу аппаратуры на КА миссии CHAMP. Ключевыми элементами миссии, на основе которых осуществлялось определение параметров гравитационного поля Земли, являлись межспутниковые измерения в варианте «низкий — низкий». Они выполнялись посредством дальномерной системы в К-диапазоне радиоволн с микронной точностью. По данным миссии

GRACE были получены модели гравитационного поля Земли, учитывающие его временные вариации с пространственным разрешением 200...500 км порядка 180...200.

Анализ результатов определений параметров гравитационного поля на месячном временном интервале позволяет осуществить также мониторинг вариаций в континентальных водохранилищах и оценить баланс масс в ледовых шапках.

Анализ результатов, полученных по данным спутниковой гравитационной миссии GRACE, впервые позволили: осуществить глобальное наблюдение сезонных, межгодовых и долгопериодических вариаций водных масс в больших и среднемасштабных водохранилищах; исследовать пространственную эволюцию и осуществлять мониторинг экстремальных гидрологических явлений, таких как засуха и наводнения; оценить смещение масс в связи с крупными землетрясениями, такими, как на Суматре (2004 г.), в Чили (2010 г.) и Японии (2011 г.), что способствовало разработке моделей физических механизмов землетрясений.

Проект GOCE (*Gravity field and steady state Circulation Ocean Explorer*) (рис. 22).

Проект GOCE является первым проектом для исследования Земли в рамках программы «Живая планета», разработанной Европейским космическим агентством (ESA) [<https://ru.wikipedia.org/wiki/Transit>]. Главными целями проекта GOCE являются: картографирование статического гравитационного поля Земли с высокой точностью и пространственным разрешением; изучение циркуляции Мирового океана. Начало спутниковой гравитационной миссии GOCE было положено 17 марта 2009 г. успешным запуском КА GOCE на солнечно-синхронную орбиту с высотой 255 км. Закончилась миссия 11 ноября 2013 г. Для определения параметров высокостепенной модели гравитационного поля Земли использовались измерения, полученные с помощью бортового гравитационного градиентометра. Поддержание постоянной высоты полета КА осуществлялось посредством ионной двигательной установки, работа которой компенсировала действие на КА негравитационных сил.

Точность моделей гравитационного поля Земли, полученных по измерительной информации спутниковой гравитационной миссии GOCE, в пересчете на точность высот геоида и гравитационных аномалий, составляет 1...2 см и 1.0 мГал соответственно с пространственным разрешением 100 км (степень разложения 200), что хорошо согласуется с требованиями миссии GOCE. Полученные по данным миссии GOCE новые версии моделей статического гравитационного поля Земли могут быть использованы для унификации высотных систем и передачи высот между континентами.

Спутниковые гравитационные миссии CHAMP, GRACE и GOCE были разработаны с целью осуществления прорыва в области картографирования статического гравитационного поля Земли и его временных изменений. Одним из главных достоинств моделей гравитационного поля Земли, полученных при помощи спутниковых гравитационных миссий CHAMP, GRACE и GOCE, является их однородность по точности и пространственному разрешению.

Имеющиеся ограничения гравитационных миссий первого поколения, касающиеся инструментальной точности и достигнутых пространственного и временного разрешения, являются поводом для разработки и исследований концепций будущих гравитационных миссий.

ВЫВОДЫ

К 2018 г. благодаря использованию методов и средств космической геодезии были получены следующие важные результаты в области современной геодезии:

- практическая реализация глобальной земной системы координат на сантиметровом уровне точности (ITRF-2014),
- в России и в США получены очередные версии систем геодезических параметров «ПЗ-90» (ПЗ-90.11) и «WGS-84» (G1762) соответственно, которые включают в себя координатную систему и модель гравитационного поля Земли,
- по отдельным видам измерений и из их комбинирования получены модели гравитационного поля Земли (NWL, GEM, GRIM, EGM и т. д.),

- высокоточное определение параметров вращения Земли (ПВЗ) осуществляется на основе математической обработки измерительной информации следующих систем: РСДБ, ГНСС, лазерной дальнометрии, ДОРИС,

- успешная реализация проектов CHAMP, GRACE и GOCE позволила создать модели гравитационного поля Земли с высокой точностью и высоким пространственным разрешением в длинноволновой, средневолновой и коротковолновой области спектра гравитационного поля Земли,

- результаты, полученные современными средствами и методами космической геодезии, используются не только при решении геодезических задач, но и других наук о Земле (геодинамика, геофизика, океанология, гляциология, гидрология и т. д.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Базлов Ю. А., Бойков В. В., Галазин В. Ф., Каплан Б. Л., Ключков А. А., Максимов В. Г., Насретдинов К. К., Новиков Е. В., Адоладов Г. П., Медведев Л. В., Жуков В. Г. Научные результаты программы космического геодезического комплекса ГЕОИК. *Космическая геодезия и современная геодинамика: Сб. науч. тр.* Москва, 1996. С. 91—121.
2. Бойко Е. Г., Кленцкий Б. М., Ландис И. М., Устинов Г. А. *Использование искусственных спутников Земли для построения геодезических сетей.* Москва: Недра, 1977. 376 с.
3. Изотов А. А., Зубинский В. И., Макаренко Н. Л. *Основы спутниковой геодезии.* Москва: Недра, 1974. 320 с.
4. Каула У. *Спутниковая геодезия. Теоретические основы.* Москва: Мир, 1970.
5. Ключков А. А. Новая эра в изучении гравитационного поля Земли. *Звезды и спутники: Сб. тр. конф., посвященной 100-летию со дня рождения А. Г. Масевич.* Москва: «Янус-К», 2018. С. 20—25.
6. Ключков А. А. Определение параметров гравитационного поля Земли по градиентометрическим измерениям. *Звезды и спутники: Сб. тр. конф., посвященной 100-летию со дня рождения А. Г. Масевич.* Москва: Янус-К, 2018. С. 26—31.
7. Кузин С. П., Эбауэр К. В., Ключков А. А. Использование методов космической геодезии в геодинамике. *Земля и Вселенная.* 2016. № 6. С. 79—89.
8. Масевич А. Г., Касименко Т. В. Международное сотрудничество по проблеме «Использование наблюдений ИСЗ для геодезии и геофизики». *Науч. информ.* 1986. Вып. 60. С. 37—46.
9. Оляндер Л. К. *Становление контроля космического пространства.* URL: <http://cosmosinter.ru/articles/60-years/detail.php?ID=3419> (дата звернення 17.04.2019).
10. Рылова Л. В., Шустов Б. М. Космическая геодезия и космическая геодинамика: 60 лет развития. *История науки и техники.* 2016. № 12. С. 32—47.
11. Dicati R. *Stamping the Earth from Space.* Springer, 2017. 429 p.
12. Gaposchkin E. M. *Improved values for tesseral harmonics of the geopotential and station coordinates.* Paper presented at the 12th Meeting of COSPAR. Prague, May, 1969.
13. Geodetic parameters for 1966 Smithsonian institution Standard Earth. *Special Report Smithsonian Astrophys. Observatory.* 1966. № 200.
14. Schmidt H. H. Analyse der Resultate des geometrischen Satelliten Weltnetzes. *Bildmess. und Luftbildw.* 1973. 41, № 5. P. 170—185.

Стаття надійшла до редакції 08.02.2019

REFERENCES

1. Bazlov Yu. A., Bojkov V. V., Galazin V. F., Kaplan B. L., Kljukov A. A., Maksimov V. G., Nasretidinov K. K., Novikov E. V., Adoladov G. P., Medvedev L. V., Zhukov V. G. (1996). Scientific results of the program of the GEOIK space geodesic complex. *Kosmicheskaja geodezija i sovremennaja geodinamika: Sb. nauch. tr.* Moscow, 91—121.
2. Bojko E. G., Klenickij B. M., Landis I. M., Ustinov G. A. (1977). *Using artificial earth satellites to build geodetic networks.* Moscow: Nedra.
3. Izotov A. A., Zubinskij V. I., Makarenko N. L. (1974). *Basics of satellite geodesy.* Moscow: Nedra.
4. Kaula U. (1970). *Satellite geodesy. Theoretical basis.* Moscow: Mir.
5. Kljukov A. A. (2018). New era in the study of the gravitational field of the Earth. *Stars and satellites, dedicated to the 100th anniversary of A. G. Masevich.* Moscow: Janus-K, 20—25.
6. Kljukov A. A. (2018). Determination of the parameters of the gravitational field of the Earth from gradient measurements. *Stars and satellites, dedicated to the 100th anniversary of A. G. Masevich.* Moscow: Janus-K, 26—31.
7. Kuzin S. P., Ebauer K. V., Kljukov A. A. (2016). Use of methods of space geodesy in geodynamics. *Zemlja i Vselennaja*, No. 6, 79—89.
8. Masevich A. G., Kasimenko T. V. (1986). International cooperation “The use of satellite observations for geodesy and geophysics”. *Nauch. inform.*, Vyp. 60, 37—46.
9. Oljander L. K. The formation of control of outer space. URL: <http://cosmosinter.ru/articles/60-years/detail.php?ID=3419> (Last accessed 17.04.2019).
10. Rykhlova L. V., Shustov B. M. (2016). Space geodesy and cosmic geodynamics: 60 years of development. *Istorija nauki i tehniki*, No. 12, 32—47.

11. Dicati R. (2017). *Stamping the Earth from Space*. Springer.
12. Gaposchkin E. M. (1969 May). Improved values for tesseral harmonics of the geopotential and station coordinates. *Paper presented at the 12th Meeting of COSPAR*. Prague.
13. Geodetic parameters for 1966 Smithsonian institution Standard Earth (1966). *Special Report Smithsonian Astrophysical Observatory*, No. 200.
14. Schmidt H. H. (1973). Analyse der Resultate des geometrischen Satelliten Weltnetzes. *Bildmess. Und Luftbildw*, 41, No. 5, 170—185.

Received 08.02.2019

Л. В. Рышлова, А. А. Ключков

Институт астрономии РАН

ШТУЧНІ СУПУТНИКИ ЗЕМЛІ: КОСМІЧНА ГЕОДЕЗІЯ І ГЕОДИНАМІКА

З вивчення польоту першого ШСЗ і визначення орбіт наступних ШСЗ розпочалася принципово нова ера у вивченні фігури і гравітаційного поля Землі. Методи вирішення геодезичних завдань за спостереженнями ШСЗ можна умовно розділити на геометричні і динамічні. Для вирішення геодезичних завдань першими стали застосовуватися геометричні методи космічної геодезії. У цих методах ШСЗ розглядається тільки як висока візирна ціль. Розв'язування геодезичних задач геометричними методами космічної геодезії здійснювалося на основі синхронних спостережень супутника з декількох пунктів. Спостереження ШСЗ виконувалися за допомогою фотографічних, радіотехнічних або лазерних вимірювальних систем. Одними з перших об'єктів спостереження геометричними методами космічної геодезії були супутники-балони «Ехо-1», «Ехо-2», ПАГЕОС, а також геодезичні супутники серії ГЕОС, на борту яких були розміщені лампи-спалахи для здійснення синхронності фотоспостережень. Ці методи використовувалися при практичній реалізації перших геодезичних програм супутникової (космічної) триангуляції, що дозволило з високою точністю визначати геоцентричні координати станцій стеження. Бурхливий розвиток теорії руху ШСЗ, створення спеціальних геодезичних супутників і розробка нових засобів для їхніх спостережень (доплерівські приймачі, лазерні далекоміри, радіодалекомірні системи) призвели до того, що для рішення геодезичних задач все ширше стали застосовуватися динамічні методи космічної геодезії, основані на обчисленні точної орбіти ШСЗ за результатами траєкторних вимірювань з урахуванням усіх діючих на нього сил. При цьому заданими параметрами були координати пунктів, параметри гравітаційного поля Землі, параметри моделі руху ШСЗ, а також деякі геодинамічні параметри (наприклад параметри обертання Землі). Крім того, на відміну від геометричних методів космічної геодезії, динамічні ме-

тоди не вимагали виконання синхронних спостережень ШСЗ і дозволяли визначати координати пунктів у системі координат, пов'язаній з центром мас Землі. Значний внесок у вирішення геодезичних і геодинамічних завдань внесло використання спостережень космічних апаратів глобальних навігаційних супутникових систем. Розв'язування геодинамічних завдань пов'язане з дослідженням динамічних процесів, що виникають в системі Землі, і силових полів, що зумовлюють ці процеси. Як показали результати вирішення багатьох геодинамічних завдань, а також супутникових гравітаційних місій, методи космічної геодезії можуть успішно використовуватися для визначення багатьох параметрів, які відображають динамічні процеси в надрах Землі. При цьому ШСЗ часто бувають спільними як для розв'язування геодезичних задач, так і завдань інших наук про Землю. У статті висвітлено основні етапи розвитку методів космічної геодезії при визначенні фігури і гравітаційного поля Землі, а також використання цих методів для вирішення задач геофізики, геодинаміки, океанології та інших наук про Землю.

Ключові слова: космічна геодезія, геодинаміка, штучний супутник Землі, методи космічної геодезії, супутникова триангуляція, гравітаційне поле Землі.

L. V. Rykhlova, A. A. Klyukov

Institute of Astronomy
of the Russian Academy of Sciences

ARTIFICIAL EARTH SATELLITE: SPACE GEODESY AND GEODYNAMICS

A fundamentally new era began in the study of the figure and the gravitational field of the Earth with the study of the flight of the first satellite and determining the orbits of subsequent ones. Methods for solving geodetic problems on observations of satellite can be divided into geometric and dynamic. Geometrical methods of space geodesy were the first to apply for the solution of geodetic tasks. In these methods, satellites are considered only as a high sighting target. The solution of geodetic problems by geometric methods of space geodesy was carried out on the basis of synchronous observations of the satellite from several points. Observations of satellites were carried out using photographic, radio, or laser measurement systems. One of the first objects of observation by geometric methods of space geodesy were satellites-cylinders Echo-1, Echo-2, PAGEOS, as well as geodetic satellites of the GEOS series. They had flash lamps placed onboard for the synchronicity of photo observations. Those methods were used in the practical implementation of the first geodetic programs of the satellite (space) triangulation. That allowed determining of the geocentric coordinates of tracking stations with high accuracy. The rapid progress in the satellite motion theory, design of special geodetic satel-

lites, and the development of new tools for their observations (Doppler receivers, laser rangefinders, radio-dimensional systems) have provided the increasingly wide application of dynamic methods of space geodesy for the geodetic solutions. These methods are based on the calculation of the exact orbits of satellites obtained from trajectory measurements, taking into account all the forces affecting them. In this case, the parameters determined were the coordinates of the points, the parameters of the Earth's gravitational field, the parameters of the satellite motion model, as well as some geodynamic parameters (for example, the parameters of the Earth's rotation). Moreover, unlike the geometric methods of satellite geodesy, dynamic methods do not need simultaneous observations of the satellite and allow the determination of the position of points in the coordinate system connected with the center of mass of the Earth. A significant contribution to the solution of geodesic and geodynamic problems was made by the use of observations of spacecraft

of global navigation satellite systems. The solution of geodynamic problems is associated with the study of dynamic processes occurring in the Earth system and the force fields causing these processes. The results of many geodynamic solutions and satellite gravity missions show that methods of space geodesy can be successfully used to determine various parameters that reflect the dynamic processes in the bowels of the Earth. At the same time, often the same satellites can be used to solve both geodetic tasks and problems of other Earth sciences. The article reflects the main stages in the progress of space geodesy methods in determining the shape and gravitational field of the Earth, as well as the use of these methods for solving problems of geophysics, geodynamics, oceanology, and other Earth sciences.

Keywords: space geodesy, geodynamics, artificial earth satellite, methods of space geodesy, satellite triangulation, gravitational field of the Earth.