

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2018.04.071>

УДК52-85; 52-34

Л. В. Рыхлова

Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия

ЗЕМЛЯ И ОКОЛОЗЕМНОЕ ПРОСТРАНСТВО: ИССЛЕДОВАНИЯ, ОТКРЫТИЯ, ПРОБЛЕМЫ

За 60 лет, прошедших с момента запуска первого искусственного спутника Земли, исследование космоса превратилось в одну из самых динамичных и плодотворных областей науки, развивающуюся во многих направлениях — от космической геодезии и зондирования Земли из космоса до изучения Вселенной по всему спектру электромагнитных волн. Космическая промышленность стала неотъемлемой частью мировой экономики. Однако одновременно появилась и стала быстро нарастать популяция техногенных объектов — космического мусора, появляющегося на всех этапах полета. Наблюдения, изучение и прогнозирование космического мусора стали новым направлением астрономии.

Ключевые слова: околоземная астрономия, околоземное пространство, космический мусор, оптические наблюдения.

ЗЕМЛЯ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Земля, с ее атмо-, гидро-, лито- и биосферой представляет собой единую экосистему, сосуществующую с окружающей средой. Для Земли окружающая среда — это околоземное космическое пространство (ОКП) — внешняя газовая оболочка, окружающая Землю и предохраняющая ее от воздействия процессов, непрерывно происходящих в сложной системе «Солнце — межпланетная среда — Земля».

Что такое «околоземное пространство»? Где оно начинается и где его граница? Международная федерация астронавтики установила условную границу между атмосферой и космосом на высоте 100 км над уровнем моря. На этой высоте авиация становится уже невозможной, а спутники начинают входить в атмосферу и разрушаться.

Высота 80...100 км считается максимальной высотой начала сгорания метеоров и болидов. На высоте 400 км работает МКС. Атмосфера за-

щищает поверхность Земли и все живое на ней от негативного воздействия окружающей среды, рассеивает и поглощает инфракрасное и коротковолновое излучение Солнца, не пропускает значительную часть космического радиоизлучения, ослабляет поток высокоэнергичных частиц, идущих к Земле из космоса. Внешняя часть атмосферы — ионосфера — взаимодействует с магнитосферой — самой внешней защитной оболочкой Земли, образующейся при взаимодействии солнечного ветра с магнитным полем Земли. Граница магнитосферы на обращенной к Солнцу стороне Земли располагается примерно на расстоянии 10 радиусов Земли (примерно 60000 км), а с ночной стороны Земли магнитосфера вытянута на миллионы километров, т. е. выходит далеко за орбиту Луны. При возмущенном состоянии магнитосферы на Земле отмечаются магнитные бури.

Сложнейшие солнечно-земные связи определяют условия жизни на Земле, что вызывает опасения из-за антропогенного воздействия на

© Л. В. РЫХЛОВА, 2018

ОКП — выбросов химических веществ при работе двигателей ракет, создание энергетических и динамических возмущений в результате полетов ракет, загрязнение почвы твердыми фрагментами, радиоактивное загрязнение от ядерных взрывов и др. [1].

Начало космической эры и последовавшее за ним интенсивное освоение космического пространства позволяет считать, что проблема определения границ ОКП обусловлена расширением сферы человеческой деятельности, отодвигая эти границы все дальше от Земли. Высота 35786 км — это высоты навигационных спутников и геостационарной орбиты. Высокоэллиптические орбиты простираются до 47000 км. А это уже 8 земных радиусов, если считать от поверхности Земли.

Поэтому в настоящее время четкого определения границ ОКП — нет.

В США принято делить ОКП на долунное и залунное. Долунное — это около 384400 км, или примерно 60 радиусов Земли. Залунное определяется одной астрономической единицей АЕ (это 23481 радиус Земли).

Область пространства, где притяжение Земли все еще превосходит притяжение Солнца, это 260 000 км — радиус сферы тяготения Земли. Радиус сферы Хилла — 1497000 км — ограничивает ОКП той частью пространства, в которой могут двигаться тела, оставаясь спутниками Земли, и максимальная высота ее орбитальных спутников с периодами обращения 1 год.

Основные факторы, которые принимаются при этом в расчет, это физические свойства и природные особенности ОКП: гравитационное, магнитное и электронное поля Земли, процессы в ионосфере Земли, глубокий космический вакуум, тепловое излучение, космические лучи и солнечное излучение, радиационные пояса Земли.

Метеороиды, астероиды и другие небесные тела пересекают ОКП и покидают его, за исключением редких случаев падения на Землю.

ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

Первый искусственный спутник Земли (ИСЗ) открыл огромные возможности для изучения Земли как планеты: ее фигуры и гравитационно-

го поля, структуры ее атмосферы, уточнения значений фундаментальных астрометрических и геодезических постоянных, определения и изучения параметров вращения Земли, исследования Мирового океана. Возникла необходимость пересмотра принципов и методов установления опорных систем координат, связанных как с телом Земли, так и с небесными светилами.

Специфика исследований Земли с помощью ИСЗ требует долговременного накопления массива данных со станций наблюдений, распределенных по всему земному шару, с привлечением разных современных, быстро модернизирующихся средств и методов. Со времени запуска первого ИСЗ было организовано множество международных программ и проектов наблюдений и исследований с использованием фотографических, радиотехнических, лазерных, других методов наблюдений специальных спутников. Выполнение таких программ и непрерывное совершенствование теории движения спутников, возможностей вычислительной техники и аппаратуры для наблюдений позволили подойти к точностям, достаточным для изучения геодинимических величин, имеющих порядок нескольких миллиметров, нескольких микрогал, нескольких тысячных долей секунды.

Определение параметров верхней атмосферы на основе анализа возмущений орбит ИСЗ было первой и достаточно очевидной научной задачей: анализ кратковременных вариаций плотности атмосферы и создание на этой основе моделей атмосферы для их использования затем в задачах улучшения орбит ИСЗ, изучение быстрых вариаций плотности атмосферы для высот от 200 до 800 км, связанных с активностью Солнца, выявление причинно-следственных связей между физико-химическими процессами, ответственными за динамику верхней атмосферы.

Уже самые первые наблюдения позволили поновому подойти к задаче определения фигуры Земли и параметров ее гравитационного поля. Первым научным направлением оказалась космическая геодезия, точнее метод космической триангуляции. ИСЗ — это высокая, т. е. видимая с очень больших расстояний визирная цель, правда перемещающаяся с большой скоростью.

Геодезические сети, образованные системой расстояний до ИСЗ, появились быстро.

Международные научные симпозиумы отражали постепенные изменения основных исследований в соответствии с прогрессом возможностей космической геодезии. Если на первом симпозиуме (Вашингтон, 1962 г.) обсуждались теоретические проблемы небесной механики и техники наблюдений на станциях оптического слежения за ИСЗ, то первые результаты определения положений станций и высот геоида (с точностью 10...20 см) были объявлены уже на втором симпозиуме (Афины, 1965 г.). При этом, кроме оптических наблюдений, использовались в обработке и доплеровские.

Новые типы инструментов в космической геодезии появлялись быстро, в их числе спутниковый альтиметр, спутниковый градиометр. Соответственно развивались и методы измерений градиентов геопотенциала с помощью нового оборудования на спутниках. Уже через несколько месяцев после запуска первого ИСЗ было определено значение сжатия Земли как $1/298.3$.

Из анализа возмущений орбит ИСЗ были получены так называемые Модели Стандартной Земли, включающие в качестве определяемых величин параметры гравитационного поля Земли и геоцентрические координаты станций слежения. Модели различаются объемом использованных данных, методом их отбора, способами обработки. Известны модели Годдардовского центра полетов США — GEM 1-10, несколько французских моделей под общим шифром GRIM, а в Смитсоновской астрофизической обсерватории США — серия моделей SE (Стандартная Земля). В этих моделях использовались комбинации наземных гравиметрических и спутниковых данных.

При высокоточных определениях гравитационного поля и геоида неизбежным становится заметное влияние на орбиты ИСЗ небольших отклонений Земли от твердого, равномерно вращающегося тела. Изменения скорости вращения Земли были обнаружены позднее, но изменение ориентировки оси вращения в теле Земли, проявляющееся как функция времени, было замечено уже в конце XIX века. Движение полюса враще-

ния Земли относительно среднего полюса имеет радиус около 10...15 м. Поскольку положения ИСЗ определялись в это время с точностью 1—2 м, чандлеровское движение полюса оказалось вполне ощутимым, и оно фактически наблюдалось, например, из анализа данных наблюдений со станций спутников серии «Транзит» [4].

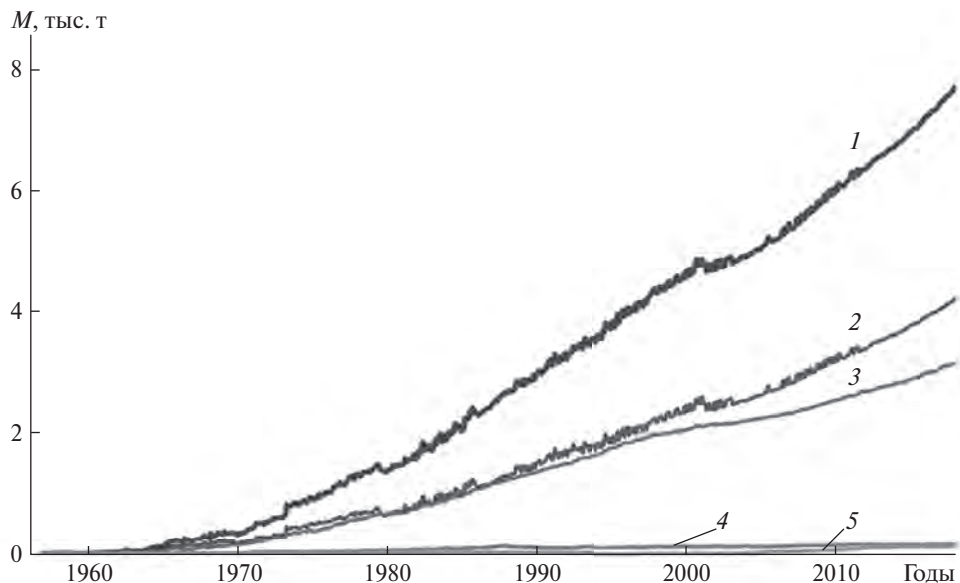
В настоящее время проблема изучения вращения Земли подразумевает решение трех задач:

- определение положений точек земной поверхности, скоростей их изменения и положения центра масс Земли;
- определение изменений ориентации оси вращения в теле Земли (движение полюсов) и в пространстве (прецессия и нутация), а также определение и изучение вариаций скорости вращения Земли;
- определение временных вариаций гравитационного поля Земли.

Эти исследования выполняются в основном с использованием радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ); глобальных навигационных спутниковых систем: российской ГЛОНАСС, американской GPS, китайской COMPASS, европейской GALILEO; метода радиотехнических (доплеровских) наблюдений ИСЗ (система DORIS) и лазерных наблюдений спутников (SLR) и Луны (LLR). Каждый из этих методов решает свои задачи.

Новая эра в изучении гравитационного поля Земли началась в 2000 году. Европейское космическое агентство открыло программу изучения гравитационного поля Земли с запуска научного спутника Земли CHAMP (Challenging Minisatellite Payload), двух идентичных спутников проекта GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) в 2002 г., и спутника GOCE (Gravity Field and Steady Ocean Circulation Explorer) в 2009 году. На составленной карте гравитационного поля и гравитационных аномалий с точностью 1—2 см Земля выглядит как гигантская картофелина в космосе, точность определения геоида улучшена до 1—2 см на масштабах порядка 100 км [7]. Результаты этих проектов внесли огромный вклад в геофизику, геодинамику, гидрологию, океанологию, сейсмологию, теорию фигуры Земли.

Под эгидой Международной геодезической ассоциации создана Глобальная геодезическая



Техногенная масса на околоземных орбитах, данные на начало 2018 г.: кривая 1 — всего, 2 — КА, 3 — корпуса ракет, 4 — осколки, 5 — отходы миссий

система наблюдений (Global Geodetic Observing System — GGOS) — сбор, обработка и анализ данных, поступающих от глобальных навигационных спутниковых систем DORIS, РСДБ (VLBI) и LLR, принятых с пунктов наземных геодезических сетей GGOS. Составной частью GGOS являются также наземные гравиметрические обсерватории, использующие спутники при составлении карт гравитационного поля Земли. В качестве главных проблем на ближайшие 10—15 лет в изучении Земли с целью регистрации глобальных планетарных изменений поставлены: мониторинг водного цикла в мировом и региональных масштабах, исследования уровня мирового океана и ледниковых масс. Амплитуды этих изменений — несколько мм в год.

ИССЛЕДОВАНИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА С ЗЕМЛИ. ПРОБЛЕМЫ

За 60 лет космическая деятельность стала неотъемлемой частью мировой экономики: если до 1990-х гг. в освоении космоса участвовали только СССР и США, то теперь — более 50 стран.

Количество запусков ракетно-космической техники в ОКП за эти 60 лет приближается к 6000. О факторах воздействия этой техники на наземную космическую инфраструктуру (падение первых, а иногда и вторых ступеней ракет на Землю, пролив остатков топлива по поверхности, загрязнение почв и грунтовых вод, химическое загрязнение приземных слоев атмосферы, тропосферы и нижней стратосферы, воздействие запусков на озоновый слой Земли, образование «дыр» в ионосфере при полете ракеты с работающим двигателем и др.) написано много [1].

В настоящее время более или менее регулярно наблюдаются и устойчиво сопровождаются более 23 000 космических объектов (КО), из которых около 17 000 занесены в каталоги [1]. При этом действующих аппаратов в каталогах только 5 %, т. е. всего около 1200. Остальные 95 % — это крупный мусор с массой объектов от 20 до 300 г, суммарная масса которых превышает 10000 тонн (см. рисунок) [6].

В отличие от метеоров, астероидов и комет, длительность пребывания КМ в ОКП зависит от высоты его орбиты и может достигать десятков,

сотен тысяч и миллионов лет. Другие его особенности состоят в высокой скорости движения, в том, что он может оказаться на пути действующих КА, и, наконец, в невозможности экологически чисто утилизировать его [1]. Следует отметить еще, что КМ при его динамике занимает огромное пространство, что затрудняет его отслеживание. Большинство фрагментов космического мусора имеют большое значение парусности (отношения площади миделева сечения к массе). Орбиты таких фрагментов трудно прогнозируемы в силу неизвестного характера вращения и переменности значения парусности. В Институте астрономии РАН ведутся исследования особенностей изменения величины отношения площади к массе [5].

С расширением процесса освоения ОКП усиливается его загрязнение, вступая в противоречие с его освоением. В 1993 г. был создан комитет IADC — Межагентский координационный комитет по проблеме техногенного загрязнения околоземного космического пространства. Задачей Комитета является всестороннее изучение проблемы техногенного мусора и выработка мер противодействия этому процессу.

Космический мусор образуется на всех этапах полета КА. Это — все выполнившие вспомогательную функцию элементы, верхние ступени ракет-носителей, последствия намеренных или самопроизвольных взрывов КА и РН, столкновений с КО и др. Самый опасный источник образования КО — столкновения. Средняя относительная скорость столкновений в космосе — 10 км/с, что приводит к образованию огромного количества мелкого КМ. С 1961 г. взрывы и столкновения в космосе случались примерно четыре раза в год [2]. В 2006 и 2007 гг. наблюдался всплеск взрывов, многие из которых можно объяснить только столкновением уже с фрагментами КМ.

Разрабатывается много вариантов утилизации космического мусора, но радикальных решений пока нет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует констатировать, что появление нового типа небесных объектов искусственного происхождения создало специфическую область астро-

номии, которая является промежуточной между метеорной и планетной астрономией [3]. Космические объекты постоянно минимизируются: микроспутники (кубсаты) имеют слабую яркость, что значительно усложняет проблему поиска малоразмерных объектов. Астрономы обнаруживают, наблюдают, определяют природу новых небесных объектов, каталогизируют их, т. е. выполняют полный цикл астрономических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адушкин В. В., Козлов С. И., Сильников М. В. Воздействие космической техники на окружающую среду // ГЕОС. — 2016. — С. 521—575.
2. Вениаминов С. С. Космический мусор — угроза человечеству // Ин-т космич. исследований РАН. Сер. Механика, управление, информатика. — Москва, 2013. — С. 70—97.
3. Микиша А. М., Рыклова Л. В., Смирнов М. А. Загрязнение космоса // Вестн. Российской акад. наук. — 2001. — 71, № 1. — С. 26—31.
4. Смит Д. Е., Коленкевич Р., Дан П. Дж. Геодезические исследования и лазерная локация спутников // Использование искусственных спутников для геодезии. — М.: Мир, 1976. — С. 265—281.
5. Bakhtigaraev N., Levkina P., Rykhlova L., Sergeev A., Kokhirova G., Chazov V., et al. Features of geosynchronous space objects motion near 75°E // Open Astron. — 2018. — 27, N 1. — P. 139—143.
6. Orbital Debris Quarterly News // Publ. NASA Orbital Debris Program Office. — 2018. — 22, N 1. — P. 11. — URL: <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv22i1.pdf>
7. Pail R., Bruinsma S., Migliaccio F., et al. First GOCE gravity field models derived by three different approaches // J. Geod. — 2011. — N 85. — P. 819—843.

Статья поступила в редакцию 15.06.18

REFERENCES

1. Adushkin V. V., Kozlov S. I., Sil'nikov M. V. Vozdeystviye kosmicheskoy tekhniki na okruzhayushchuyu sredyu. *GEOS*, 521—575 (Moscow, 2016) [in Russian].
2. Veniaminov S. S. Kosmicheskiy musor — ugroza chelovechestvu. *IKI RAS, Ser. Mekhanika, upravleniye, informatika*, 70—97 (Moscow, 2013) [in Russian].
3. Mikisha A. M., Rykhlova L. V., Smirnov M. A. Zagryazneniye kosmosa. *Vestnik Rossiyskoy Akademii Nauk*, 71 (1), 26—31 (2001) [in Russian].
4. Smith D. E., Kolenkiewicz R., Dunn P. J. Geodetic Studies by Laser Ranging to Satellites. *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*, 265—281 (Moscow, 1976).
5. Bakhtigaraev N., Levkina P., Rykhlova L., Sergeev A., Kokhirova G., Chazov V., et al. Features of geosynchro-

- nousspace objects motion near 75E. *Open Astronomy*, **27**(1), 139—143 (2018).
6. Orbital Debris Quarterly News. *A publication of the NASA Orbital Debris Program Office*, **22**(1), P. 11 (2018). <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv22i1.pdf>
 7. Pail R., Bruinsma S., Migliaccio F., et al. First GOCE gravity field models derived by three different approaches. *J. Geod.*, N 85, 819—843 (2011).

Received 15.06.18

Л. В. Рыхлова

Інститут астрономії Російської академії наук,
Москва, Росія

ЗЕМЛЯ ТА НАВКОЛОЗЕМНИЙ ПРОСТІР: ДОСЛІДЖЕННЯ, ВІДКРИТТЯ, ПРОБЛЕМИ

За 60 років, що пройшли з моменту запуску першого штучного супутника Землі, дослідження космосу перетворилося в одну з найдинамічніших і плідних областей науки, що розвивається в багатьох напрямках — від космічної геодезії та зондування Землі з космосу, до вивчення Всесвіту по всьому спектру електромагнітних хвиль. Космічна промисловість стала невід'ємною частиною світової економіки. Однак одночасно з'явилася і стала швидко наростати популяція техногенних об'єктів — космічного сміття, що з'являється на всіх етапах польоту. Спостереження, вивчення і прогнозування космічного сміття стали новим напрямком астрономії.

Ключові слова: навколоземна астрономія, навколоземний простір, космічне сміття, оптичні спостереження.

L. V. Rykhlova

Institute of Astronomy of the Russian
Academy of Sciences, Moscow, Russia

EARTH AND THE NEAR SPACE: RESEARCH, DISCOVERIES AND PROBLEMS

60 years have passed since the launch of the first artificial Earth satellite. During this time the space research has

turned into one of the most dynamic and fruitful areas of science, developing in numerous fields — from the study of the atmosphere, space geodesy and Earth remote sensing to the study of the Universe in the whole spectrum of electromagnetic waves. In the article, the attention is paid to the emerging possibility of using the observations of satellites as targets for the studies of the Earth: its shape and gravitational field, the definition of fundamental astrometric and geodesic constants, determination and study of parameters of the Earth's rotation. The necessity of reviewing the principles and methods of construction of basic reference frames has emerged. We briefly summed up the main stages of high-precision determinations of parameters of the Earth's gravitational field with the help of the specialized satellites, as well as an effect of deviations of the Earth from the uniformly rotating solid body on the satellite orbits, changes in the speed of the Earth's rotation. Satellites provide direct and accurate measurements of the Earth's flattening, data of its internal structure, terrestrial tides, and plate tectonics. The new problem has arisen, which is related to the intensive exploration of the near-Earth space. More than 50 countries participate in its exploration. The space industry has become an integral part of the world economy. The number of satellite launches for various purposes is now approaching 6000. Parts of launch vehicles, defunct satellites and their disintegration create the growing amount of space debris in the near-Earth space, which already poses a threat to space exploration. In this connection, the new research field arises in astronomy — the observation of the technogenic space debris, studying its distribution over the altitudes of orbits, its density at various altitudes, determination of its sizes, velocity and direction of its movement. All this leads to the development of methods and means of space debris removal from the near-Earth space to continue the space exploration.

Keywords: near-Earth astronomy, near-Earth space, space debris, optical observations.