

С КАФЕДРЫ
ПРЕЗИДИУМА РАН

О РОЛИ НАУКИ В ИЗУЧЕНИИ И ПАРИРОВАНИИ
КОСМИЧЕСКИХ УГРОЗ

© 2019 г. Б.М. Шустов

Гинститут астрономии РАН, Москва, Россия

E-mail: bshustov@mail.ru

Поступила в редакцию 04.03.2019 г.

Поступила после доработки 20.03.2019 г.

Принята к публикации 16.04.2019 г.

Во второй половине XX и начале XXI столетия человечество столкнулось с серьёзными проявлениями космических опасностей, из них самой актуальной является проблема космического мусора. Специалисты, занимающиеся космической деятельностью, сталкиваются с ней ежедневно и осознают её в полной мере. Всё возрастающее внимание привлекает также фактор непредсказуемого поведения нашей главной звезды — Солнца, так называемая космическая погода. По масштабам последствий наиболее катастрофической считается астероидно-кометная опасность. Реальных проявлений биологической опасности пока не наблюдалось, хотя с развитием космической деятельности она приобретает всё большее значение. Временная шкала астрофизических опасностей — многие миллионы лет, поэтому с практической точки зрения она не представляет интереса. В статье кратко описаны основные виды космических опасностей. Автор анализирует опыт организации исследований и работ в этой области в мире и в России. Сравнительный анализ приводит к однозначному выводу о необходимости осуществления национальной программы изучения космических опасностей и парирования космических угроз. В основу статьи положен доклад, с которым автор выступил на заседании президиума РАН 15 января 2019 г.

Ключевые слова: космические угрозы, космический мусор, космическая погода, астероидно-кометная опасность, парирование космических угроз.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5873898777-000>

Развитие человеческой цивилизации сопровождается углублением понимания и мира, в котором мы живём, и самого человека. При этом выявляются новые, ранее неизвестные опасности (угрозы). К ним можно отнести и космические угрозы. Наиболее серьёзными из них считаются [1]:

- *космический мусор (КМ)* — техногенное загрязнение околоземного космического пространства (ОКП), которое может повлечь за собой сокращение или даже прекращение космической

деятельности человечества; дополнительную, но меньшую по масштабам опасность представляет и метеорное вещество в ОКП;

- *космическая погода* — плохо прогнозируемые вариации активности Солнца, вызывающие резкие изменения обстановки в ОКП и представляющие опасность серьёзных потерь, прежде всего в сфере производственной деятельности (в энергетике, связи и др.);

- *астероидно-кометная опасность (АКО)* — опасность, обусловленная возможными столкновениями Земли с малыми телами Солнечной системы (астероидами и кометами) с причинением крупного ущерба населению планеты вплоть до уничтожения цивилизации;

- *биологическая угроза* обусловлена как опасностью занесения на Землю внеземных (или земных, но изменившихся вследствие пребывания в космосе) форм жизни, так и выносом человеком различных организмов в космос с возможным «заражением» нашими формами жизни других тел Солнечной системы;



ШУСТОВ Борис Михайлович — член-корреспондент РАН, научный руководитель ИНАСАН.

- *астрофизические опасности* — наиболее экзотический, но тем не менее реальный вид космических угроз. Его связывают с возможностью различных катаклизмов: прохождением Солнечной системы через межзвёздные облака, что может привести к «смятию» солнечной магнитосферы и усиленной бомбардировке Земли космическими лучами, а также существенно повлиять на химические процессы в верхней атмосфере, с вспышками близких сверхновых и т. д.;

- *военные угрозы* — очень важная (даже важнейшая в наше беспокойное время) тема, но она требует отдельного рассмотрения.

КОСМИЧЕСКИЕ ОПАСНОСТИ И УГРОЗЫ КАК ПРЕДМЕТ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ НАУКИ

В соответствии с принятой в МЧС классификацией, чрезвычайные ситуации, связанные с космическим мусором (и отчасти с биологическим заражением), рассматриваются как угрозы техногенного характера, остальные — природного.

Во второй половине XX и начале XXI столетия человечество столкнулось с серьёзными проявлениями космических опасностей первых трёх типов. По актуальности проблема номер один — проблема космического мусора. Специалисты, занимающиеся космической деятельностью, сталкиваются с ней ежедневно и осознают её в полной мере. Всё возрастающее внимание привлекает также фактор непредсказуемого поведения нашей главной звезды — Солнца, так называемая космическая погода. По масштабам последствий наиболее катастрофической считается астероидно-кометная опасность. Реальных проявлений биологической опасности пока не наблюдалось, хотя с развитием космической деятельности она приобретает всё большее значение. Временная шкала астрофизических опасностей — (многие) миллионы лет, поэтому с практической точки зрения она не представляет интереса, но зато привлекает внимание учёных и отчасти любителей науки.

Мы используем два термина — «угроза» и «опасность». По сути, это близкие, но не тождественные понятия. Опасность представляет собой неблагоприятный фактор природного, техногенного или социального происхождения. Она имеет потенциальный (возможный) характер, в то время как угроза — это опасность, связанная с конкретным временем и местом. Скажем, существует потенциальная опасность для космической деятельности, связанная с космическим мусором, и время от времени появляются определённые угрозы столкновения международной космической станции (МКС) с конкретными объектами КМ. В кон-

тексте дальнейшего изложения нужно также определить понятие риска. Риск — это количественная оценка, определяемая как сочетание вероятности реализации той или иной угрозы и тяжести её последствий. Такая количественная оценка лежит в основе механизма принятия решений. Например, при вероятности столкновения МКС с опасным объектом более 0,0001 принимается решение о манёвре уклонения.

Пока ещё немало учёных, управленцев, государственных деятелей высокого уровня относятся к проблемам космических опасностей (по крайней мере, к некоторым из них) со скептицизмом. Не то чтобы сомневаются в их реальности, но не воспринимают их как значимую проблему. В России подобное отношение встречается довольно часто. Однако во всём мире растёт понимание того, что космические опасности как минимум следует изучать, что это предмет науки.

Общеизвестно, что науку как сферу человеческой деятельности, которая направлена на добывание и осмысление знания, принято делить на фундаментальную и прикладную. Если с представлениями о том, что называть прикладной наукой, особых разночтений нет, то образ фундаментальной науки довольно расплывчат. Характерны определения типа «фундаментальная наука — это наука, имеющая своей целью создание теоретических концепций и моделей, практическая применимость, которых неочевидна»¹.

Вопрос о прикладном или фундаментальном характере исследований — не просто дань систематике. В зависимости от того, как классифицируются научные исследования, во многих странах определяются источники их поддержки. Обычно фундаментальные исследования поддерживаются за государственный счёт, в то время как в финансировании прикладных исследований (гражданского назначения) главная роль отводится будущим потребителям научных результатов (как государственным органам, так и частным компаниям). Поэтому важно определиться, какая это наука — изучение космических опасностей — прикладная или фундаментальная?

Прежде чем ответить на этот вопрос, изложу своё мнение по поводу общего назначения науки. Человек — часть природы, но он уже давно не подчиняется её законам и даже нарушает многие из них. Для всех остальных живых существ такое нарушение грозило бы вымиранием. Но люди — особенные существа, мы изобрели такой мощный инструмент воздействия на природу, как наука, основное предназначение которой — поиск путей устойчивого существования (даже процветания)

¹ https://studwood.ru/1573722/ekonomika/fundamentalnye_prikladnye_issledovaniya

Таблица 1. Классификация объектов космического мусора

Класс объектов КМ по размеру	I 0,1–1 см	II 1–10 см	III > 10 см
Количество объектов на всех высотах	130 млн	900 тыс.	34 тыс.
Количество объектов на низких орбитах	20 млн	500 тыс.	23 тыс.
Последствия столкновения с космическим аппаратом	Серьёзное повреждение КА	Серьёзное повреждение или уничтожение КА	Гарантированное уничтожение КА
Существующие методы защиты	Применение защитных экранов	Манёвр уклонения	Манёвр уклонения

вида *homo sapiens* в сложном и непрерывно меняющемся мире. В этом смысле вся наука, включая её фундаментальные аспекты, носит прикладной характер.

Что касается исследований по тематике космических опасностей, то важнейшая фундаментальная задача — это глубокое изучение факторов и процессов, составляющих суть космических опасностей, их значения для устойчивого развития человечества, а важнейшая практическая задача — своевременное выявление космических угроз, надёжная оценка рисков, связанных с этими угрозами, и разработка методов противодействия им.

КОСМИЧЕСКИЙ МУСОР

Этому виду космических опасностей уделяется наибольшее внимание [2–4]. Под космическим мусором² обычно подразумевают все неиспользуемые искусственные объекты, в основном в околоземном пространстве. К ним относятся вышедшие из строя спутники, отработавшие ступени ракет, а также фрагменты от их распада и столкновений. Все эти объекты являются опасным фактором воздействия на функционирующие космические аппараты (КА). Техногенный космический мусор образовался, образуется и будет образовываться в результате космической деятельности. Это своеобразное проявление принципа Ле Шателье, применимого к равновесию любой природы — механическому, тепловому, химическому, электрическому и даже, как мы видим на примере проблемы космического мусора, к социально-технологическому.

Понятно, что главная опасность космического мусора — это угроза столкновений с рабочими КА, которые могут вывести аппараты из строя. На заседании «круглого стола» в Совете Федерации РФ 12 марта 2013 г., посвящённом проблемам космических угроз, В.А. Поповкин, руководивший в то

время Роскосмосом, сообщил, что частота фатальных столкновений КА с объектами космического мусора быстро увеличивается и на начало 2013 г. составляла одно столкновение в полтора года. Современные оценки дают уже одно столкновение в год. Следует учитывать, что столкновения в космосе способны не только вывести из строя рабочий аппарат, но и резко увеличить число новых опасных объектов вследствие фрагментации.

В таблице 1 приведена широко принятая классификация объектов КМ по размеру, отмечены возможные последствия столкновений и существующие методы защиты рабочих КА. Данные взяты из актуальных на январь 2019 г. материалов NASA.

Приведённое в начале статьи определение космического мусора вполне рабочее и устоявшееся, но здесь правильнее было бы использовать более точный термин — «техногенный космический мусор». Ведь в ОКП постоянно присутствует также и естественный мусор, который также представляет определённую опасность для работающих КА. Собственно, обозначающий космический мусор английский термин *debris* был введён и до сих пор используется в исследованиях структуры и эволюции населения малых тел Солнечной системы, в которых термин *debris disk* означает околозвёздный диск, состоящий из пыли и каменных обломков — «строительного мусора», оставшегося от стадии формирования планетной системы. Эту естественную составляющую (природный космический мусор) всегда нужно учитывать. На низких орбитах, а также в областях концентрации КА (например, в области геосинхронных орбит) количество техногенного космического мусора превышает природную составляющую. Но во всех областях ОКП в микронном диапазоне размеров частиц превалирует естественный компонент космического мусора. Возникает вопрос, опасен ли этот компонент, ведь столкновения с такими объектами не могут уничтожить космический аппарат. Ответ однозначен: да, опасен! Такие столкновения наносят ущерб, подобный пескоструйной

²https://ru.wikipedia.org/wiki/Космический_мусор

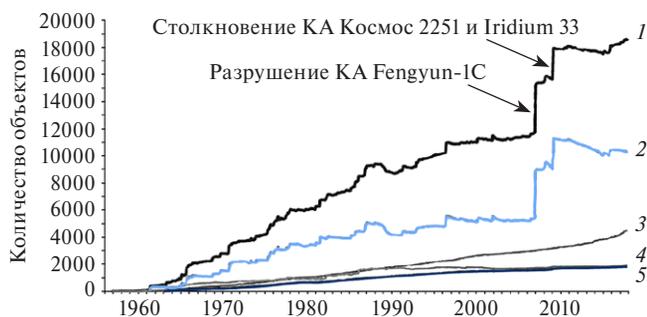


Рис. 1. Динамика увеличения числа крупных объектов космического мусора

1 — всего объектов, 2 — фрагменты, 3 — КА, 4 — ступени ракет, 5 — технологические детали

обработке поверхности, особенно солнечным панелям и оптике звёздных датчиков и научных приборов, которые не могут быть покрыты защитными материалами.

Масса накапливающегося в ОКП мусора постоянно увеличивается, на начало 2019 г. она уже превысила 8 тыс. т. Но главную опасность представляет количественный фактор. Как видно из таблицы 1, количество объектов, потенциально способных вывести из строя работающий КА или пилотируемый корабль, достигает многих сотен тысяч, а объектов, могущих нанести космическому аппарату заметный ущерб, в тысячи раз больше.

Количество объектов КМ постоянно увеличивается. Основной вклад в этот процесс вносят, конечно же, США, Китай и Россия. Рисунок 1 иллюстрирует динамику роста числа крупных объектов космического мусора, которые отслеживаются в системе постоянного мониторинга. Приведены сводные данные из доклада представителя NASA на 55-й сессии Научно-технического подкомитета Комитета ООН по мирному использованию космоса (февраль 2018 г.). На этом рисунке хорошо видны последствия крупных столкновений (разрушений), приведших к скачкообразному росту количества объектов КМ. Помечены два конкретных события — намеренное разрушение Китая китайского же КА Fengyun-1C и столкновение спутников Космос-2251 и Iridium-33. Можно отметить также незначительные спады численности КМ. Они обусловлены тем, что на низких орбитах работает механизм самоочистки, то есть объекты сходят с таких орбит в нижние слои атмосферы, где разрушаются (сгорают). На орбитах ниже 400 км время торможения (схода с орбиты) крупных объектов составляет несколько лет, на высотах 800 и более километров КА может находиться десятки-сотни лет. На самых низких орбитах высотой 200 км время схода измеряется днями или неделями. В связи с ожидаемым в ближайшем будущем резким ростом количества запусков

коммуникационных «созвездий» КА (OneWeb, Samsung, Boeing, SpaceX, СФЕРА и т.д.) ситуация с нарастанием количества опасных объектов КМ станет ещё более серьёзной.

Рисунок 1 отражает лишь часть общей картины, ведь уверенно отслеживаются только самые крупные объекты космического мусора размером более 10 см на низких и более 30–50 см на высоких орбитах. При этом проводится мониторинг не всего ОКП, основное внимание уделяется наиболее засорённым орбитам, которые чаще всего используются для работы космических аппаратов. Это область низких орбит, особенно солнечно-синхронных орбит (ССО), геостационарные орбиты (ГСО) и область орбит навигационных искусственных спутников Земли (ИСЗ).

Невозможно обнаружить и проводить постоянный мониторинг всех малоразмерных (но всё же опасных) объектов КМ. Для анализа их поведения — а количество их огромно — применяют модели, описывающие структуру и динамику их численности [2, 3, 5]. Особенно важный элемент таких моделей — описание процесса «саморазмножения» КМ вследствие столкновений. Наиболее обсуждаемый сценарий этого процесса описал в конце прошлого века эксперт NASA Д. Кесслер [6]. Согласно самому печальному варианту этого сценария, при превышении некоторой критической концентрации объектов космического мусора процесс его саморазмножения (даже при прекращении дальнейших запусков) начинает нарастать, что грозит полным прекращением космической деятельности.

Ещё одна опасность, обусловленная КМ, связана с падением на нашу планету сошедших с орбиты крупных техногенных объектов. Особенно резонансными являются падения, сопровождающиеся угрозой химического поражения значительных территорий высокотоксичным топливом ракетных ступеней, а также падения с источниками ядерной энергии на борту.

Проблема космического мусора пока ещё далека от решения. Мы находимся на стадии интенсивного её изучения, и роль науки здесь особенно значима. Можно выделить три основные направления исследований и работ по проблеме КМ: обнаружение и мониторинг объектов КМ; оценка рисков; разработка методов предотвращения засорения и очистки ОКП. Эти направления формулируются как типичные прикладные, но в каждом из них роль фундаментальных исследований весьма существенна, хотя и не всегда очевидна. Рассмотрим эти направления чуть подробнее.

Обнаружение и мониторинг объектов КМ. В настоящее время в качестве основных средств обнаружения и мониторинга объектов КМ используются радары (только для низкоорбитальной

Таблица 2. Вклад в наблюдения объектов в ОКП, 2016–2018 гг., %

Год	Роскосмос	АНЦ	МАК Вымпел	ИПМ РАН	ИСЗФ СО РАН	ИНАСАН
2016	53,2	18,4	5,7	13,2	4,7	1,6
2017	48,2	29,5	3,4	12,8	4,8	1,3
2018	41,7	32,0	12,8	9,6	3,5	0,4

области ОКП) и оптические средства – оптические камеры и лидары. На низких орбитах можно отслеживать объекты КМ размером до 1 см, однако они очень легко теряются из-за сложности точного прогнозирования их движения. Большинство обломков остаются незамеченными, хотя уже созданы мощные средства обнаружения и мониторинга КМ, и они постоянно совершенствуются.

В США основную программу по наблюдениям космического мусора осуществляет специальное управление NASA (NASA Orbital Debris Program Office)³, действует большое число специализированных наблюдательных пунктов и инструментов. В их числе обсерватория NASA Orbital Debris Observatory⁴, главный инструмент которой – ртутный телескоп апертурой 3 м (NASA-LMT). Стратегическое командование США (USSTRATCOM) совместно с наблюдательными центрами Европейского союза ведут каталог известных орбитальных объектов, используя наземные радары и телескопы, а также телескопы космического базирования. Широко применяются радары TIRA, EISCAT (Европа), Goldstone, Haystack и радиолокатор с фазированной антенной решёткой Cobra Dane (США). Создана значительная система космического базирования для контроля ОКП на базе спутников SBV, BLOCK 10, ORS5, GSSAP (США), NEOSAT, SAPHIRE (Канада).

В Советском Союзе была создана система контроля космического пространства (СККП), которая ведёт каталог орбитальных объектов на основании данных системы предупреждения о ракетном нападении (СПРН) и специализированных станций наблюдения за околоземным пространством. В России поиском и идентификацией орбитальных объектов, помимо СПРН, занимается специализированный радиооптический комплекс распознавания космических объектов «Крона», а также станция оптических наблюдений «Архыз», Алтайский оптико-лазерный центр имени Г.С. Титова, оптико-электронный комплекс «Окно». И всё же наибольший вклад в наблюдения космического мусора дают средства, созданные и поддерживаемые Роскосмо-

сом, в частности, в рамках программы АСПОС (Автоматизированная система предупреждения об опасных ситуациях). Наблюдения здесь организованы на неплохом уровне, однако, к сожалению, в России пока нет радаров гражданского назначения, предназначенных для контроля космического мусора. Отечественная система наблюдений КМ на аппаратах космического базирования также пока не развёрнута.

В наблюдениях объектов КМ, находящихся на высоких орбитах, главную роль играют оптические инструменты, и здесь вклад российской аппаратуры значителен. В настоящее время в основном используются оптико-электронные средства ГК «Роскосмос», АО «Астрономический научный центр», ПАО «МАК «Вымпел»», привлекаемые средства РАН – Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Института солнечно-земной физики СО РАН, Института астрономии РАН (табл. 2).

Роль исследовательских учреждений РАН выглядит относительно незначительной, но нужно отметить, что это, как правило, наблюдение самых сложных для обнаружения и мониторинга объектов. Так, в Институте астрономии РАН занимаются в основном наблюдениями мало-размерных объектов в зоне геосинхронных орбит с помощью довольно крупного телескопа Цейсс-2000. Стандартные средства Роскосмоса проводить такие наблюдения не позволяют.

Следует отметить существенный, причём на протяжении многих лет, вклад в наблюдения большой академической сети ISON (International Scientific Optical Network), поддерживаемой ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, которая предназначена в основном для регистрации космического мусора с помощью телескопов класса 50–70 см. Значительная часть базы данных космического мусора ИПМ РАН основана на наблюдениях сети ISON, особенно наблюдений объектов в зоне геостационарной орбиты. Иллюстрацией может служить мгновенный снимок распределения КМ в ОКП (рис. 2). Хорошо выделяются сгущения КМ на низких орбитах и в области геосинхронных орбит. Важной особенностью сети ISON является её широкое распространение по планете. В последнее время появились также станции Роскосмоса в Бразилии и Астрономического научного

³ https://en.wikipedia.org/wiki/NASA_Orbital_Debris_Program_Office

⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/NASA_Orbital_Debris_Observatory

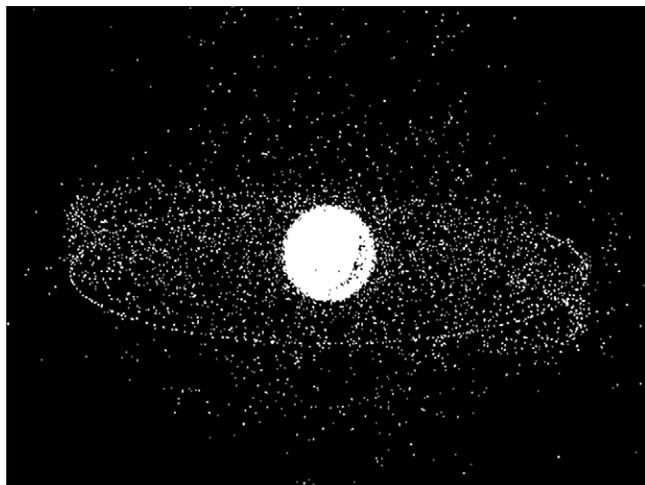


Рис. 2. Распределение объектов космического мусора в ОКП, построенное по данным базы данных ИПМ РАН на момент 24.06.2016 12:13:19 UTC

центра в Чили. Кроме того, следует отметить, что в конце 1990-х — начале 2000-х годов именно средства РАН были основными для поддержания российской системы оптических наблюдений объектов в ОКП.

Изучение и мониторинг космического мусора естественного происхождения ведётся в основном методом регистрации ударов метеорных тел с помощью датчиков, установленных на космических аппаратах. Датчики позволяют изучать плотность потока очень малых частиц с массами 10^{-5} – 10^{-15} г. В нашей стране и в мире накоплен большой опыт по регистрации таких частиц [7, 8], разрабатываются новые, всё более точные методы, основанные на изучении физики высокоскоростного удара.

Оценка риска. Риск, связанный с угрозой столкновения того или иного объекта с КМ, определяется вероятностью столкновения и его последствиями для космического аппарата. Расчёт вероятности конкретного столкновения требует хорошего знания элементов орбиты обоих объектов. Как правило, для большинства КА и тем более для объектов КМ точность определения положения на орбите в геоцентрической системе координат составляет несколько сотен метров. Понятно, что расчёт вероятности столкновений объектов гораздо меньших масштабов представляет собой непростую задачу. Особенно трудно прогнозировать с высокой точностью движение объектов сложной формы, например, объектов с большим отношением площади к массе.

Изучение последствий столкновений — серьёзная научная проблема, относящаяся к физике высокоскоростного удара. Несмотря на огромное количество выполненных в разных странах лабораторных экспериментов (см. обзор работ российских исследователей в [8]), позволивших

выработать вполне применимые рекомендации по снижению вредных последствий ударов, нельзя сказать, что здесь уже сделано всё возможное.

Разработка методов предотвращения засорения и очистки ОКП. Ещё более широкое поле для применения научных методов — необходимость решения важнейшей задачи по уменьшению засорённости ОКП [4]. Выделяют пассивные и активные методы улучшения экологии ближнего космоса. Пассивные методы включают постоянный контроль объектов КМ и, что самое важное, реализацию мер и решений, позволяющих минимизировать количество КМ при запусках и технологических экспериментах. Активные методы, предполагающие изменение орбит или, намного реже, разрушение опасных объектов КМ, весьма разнообразны. Для объектов на высотах до 600–800 км разрабатываются методы, которые позволяют перевести опасный объект на более низкую орбиту, с тем чтобы он вошёл в атмосферу Земли и сгорел. Для КМ на более высоких орбитах энергетически более выгодными оказываются методы отвода объектов на орбиты захоронения.

В ряде стран, в том числе и в России, разрабатывается много различных технических решений, в числе которых: сборщик КМ, буксир для крупных объектов, средства увеличения миделевого сечения объектов КМ на низких орбитах (баллоны, «плавающие якоря» и т. д.), электродинамические тросовые системы, лазерные средства изменения орбиты КМ, пучковые средства и др. Некоторые из этих методов уже хорошо проработаны (например, буксир), другие, весьма перспективные, находятся на стадии исследований. В качестве примера из российской практики можно назвать лазерные методы отвода объектов с помощью наземных лазеров и лазеров космического базирования, разрабатываемые, в частности, в Институте прикладной физики РАН, и пучковые методы, разрабатываемые в МАИ и в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Особый интерес представляет изучение возможностей использования материалов, из которых состоят объекты космического мусора, например, в двигательных установках КА, которые сами и занимаются сбором КМ⁵. В Федеральную космическую программу России на 2016–2025 гг. включено создание к 2025 г. «уборщика» мусора с геостационарных орбит «Ликвидатор». Однако сейчас судьба проекта неясна.

Натурные эксперименты по очистке ОКП уже начались. В сентябре 2018 г. были проведены первые испытания «космического уборщика» RemoveDebris (Великобритания), который вышел на орбиту в июне 2018 г. 17 сентября 2018 г. был

⁵ <https://www.bnkomi.ru/data/news/93089/>

выполнен первый этап: из основного КА массой 100 кг выпущена 3-киллограммовая модель объекта КМ – пикоспутник (cubesat), который раздулся в сферу диаметром 1 м, затем из основного КА на него была накинута транспортировочная сеть. В 2019 г. на КА RemoveDebris протестирована система, которая использует камеры и лазеры для наблюдения за частицами мусора, и механизм гарпуна для фиксации (протыкания) космического мусора. В конце концов основной КА выпустит специальный «якорь», который замедлит ИСЗ и отнесёт его в атмосферу Земли, где он и сгорит.

Можно заключить, что проблема космического мусора является многоплановой. Её решение предполагает совместную работу ведущих российских исследователей как прикладного, так и фундаментально профиля. Перечислю некоторые вопросы, привлекающие внимание учёных и требующие междисциплинарного подхода с участием геофизиков, физиков, механиков, баллистиков, специалистов по материалам, по методам работы с Большими данными и т. д. Особенно важна роль экспертов по космическому праву, но к сожалению, в России их крайне мало.

1. Распределение естественного и техногенного КМ в ОКП и зависимость этого распределения от различных условий и факторов (вхождение в метеороидные потоки, солнечная активность и т. д.).
2. Модели населённости КМ и анализ условий реализации синдрома Кесслера.
3. Привлечение технологий и средств наблюдения, применяемых в фундаментальных науках (астрономии, математике): методы наблюдения очень слабых объектов (например, малоразмерных КА), методы точного прогноза движения объектов сложной формы, методы восстановления изображений космических объектов и т. д.
4. Развитие динамических моделей атмосферы.
5. Уточнение физики высокоскоростных ударов.
6. Физика и химия разрушений под действием космических факторов.
7. Новые принципы увода отработавших КА и КМ.
8. Уточнение физики атмосферных входов.
9. Новые подходы к утилизации КМ (например, перспективные принципы использования вещества КМ в двигателях КА).
10. Развитие технологии Больших данных для решения задач КМ.
11. Изучение проблем мусора на других телах Солнечной системы (мусор в окололунном пространстве и на Луне, мусор, возникающий при разработке космических ресурсов и при отражении астероидной опасности и т. д.).
12. Роль фактора КМ в моделях устойчивого развития космической деятельности.

КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА

Под «космической погодой» понимают состояние среды в околоземном пространстве, определяемое сложным взаимодействием различных факторов: активностью Солнца, включая солнечный ветер, геомагнитной активностью, галактическими космическими лучами и т. д. [9, 10]. Космическая погода как наука – это направление на стыке геофизики и гелиофизики.

Основные факторы риска космической погоды – нарушения функционирования электронных устройств и радиосвязи, изменение орбит спутников, вредные биологические воздействия, нарушения в электросетях вследствие геоиндуцированных токов (ГИТ).

Катастрофические проявления космической погоды происходят на шкале несколько десятков лет. Чаще всего вспоминают энергетическую катастрофу 13–14 марта 1989 г. в штате Квебек (Канада), когда на 9 часов была отключена электроэнергия из-за наводки мощных (сотни ампер) геоиндуцированных токов, вызванных магнитной бурей. Самое опасное событие – выход из строя повышающего трансформатора на ядерном заводе в Нью-Джерси. Из глобальных последствий было отмечено нарушение связи с космическими аппаратами.

Согласно оценкам В.Д. Кузнецова (ИЗМИРАН), при прогнозировании рисков, связанных с катастрофическими событиями космической погоды, возможный экономический ущерб может достигать следующих значений:

- космос – потеря спутника – \$ 500 млн, нарушения связи в связи с последствиями сильной магнитной бури – до \$ 100 млрд;
- энергетика – последствия сильной магнитной бури – \$ 400 млн, потери от отключения электроэнергии до \$ 3–6 млрд;
- авиация – отложенный авиарейс – \$ 100 тыс., изменение маршрута через полярные зоны – \$ 10–50 тыс.; ущерб отдельных компаний – \$ 50 тыс. – \$ 1 млн ежедневно.

Понятно, что противодействие такой опасности, как космическая погода, можно организовать лишь на уровне своевременного предупреждения о предстоящем событии и принятия мер по уменьшению ущерба. Для этого необходимо иметь в России эффективную службу Солнца (космической погоды). В США мощная служба такого рода действует с 2002 г. – US National Space Weather Program. К данным этой службы предоставляется международный доступ, но в случае сбоев наши центры мониторинга космической погоды, организованные в Институте прикладной геофизики им. ак. Е.К. Фёдорова и в ИЗМИРАНе, оказываются неспособными в полной мере

выполнять свои обязанности. Перспективная задача — создание, помимо наземных, средств космического сегмента.

АСТЕРОИДНО-КОМЕТНАЯ ОПАСНОСТЬ

В геологической истории Земли сохранилось много свидетельств катастроф, вызванных падением на Землю крупных и очень крупных (размером более 1 км в диаметре) тел. Падение таких космических объектов приводит к выделению колоссальной энергии. В результате на поверхности планеты образуются кратеры, диаметр которых в 15–20 раз превышает размеры упавшего тела. На Земле, на суше и на дне океана обнаружено около 200 крупных кратеров — следов подобных катастроф. Некоторые из них превышают 200 км в диаметре. Крупнейший изученный ударный кратер на Земле — Вредефорт — расположен в 120 км от Йоханнесбурга (ЮАР). Его диаметр составляет 250–300 км, возраст — около 2 млрд лет⁶. Знаменитый кратер Чиксулуб в Мексике (диаметр 180 км) образовался при падении 10-километрового астероида (или кометы) примерно 65 млн лет тому назад. Считается (хотя это мнение разделяют не все специалисты), что это событие послужило причиной массового вымирания живых существ на Земле, в том числе исчезновения динозавров, и ознаменовало переход от мелового периода мезозойской эры к третичному периоду кайнозоя.

Конечно, большая часть космических тел, сталкивающихся с Землёй, падает в моря и океаны. К настоящему времени обнаружено около 20 кратеров, возникших в результате таких событий. Причина малочисленности известных подводных кратеров связана как с относительной молодостью морского дна, так и с его малой исследованностью. Значительная часть некогда образовавшихся ударных кратеров и на суше и на морском дне исчезла вследствие эрозийных процессов. На поверхности Луны и других планет, спутников планет и астероидов, где интенсивность эрозии мала, наблюдается огромное количество ударных кратеров, которые представляют собой исторические записи о последствиях столкновений в далёком и не очень далёком прошлом. Эти записи позволили сделать принципиально важный вывод: в последние 2 млрд лет темп бомбардировки Луны (а значит, и Земли) существенно не менялся, то есть удары космических тел продолжатся.

Яркими примерами того, что падение относительно крупных тел на планеты Солнечной системы — процесс далеко не закончившийся, стало падение в 1994 г. кометы Шумейкера-Леви 9

на Юпитер и, конечно, Тунгусская катастрофа, случившаяся 30 июня 1908 г. в труднодоступном и весьма малонаселённом районе Сибири. Мощный взрыв на высоте примерно 6–8 км привёл к вывалу леса (примерно 80 млн деревьев) на территории более 2 тыс. км². Энергия взрыва была равна примерно 15 мт ТНТ. Изучение этого феномена привело большинство исследователей к убеждению, что Земля столкнулась с небольшой (размером 40–50 м в диаметре) кометой, состоящей в основном из льда. Именно поэтому пока не удалось отыскать остатки Тунгусского тела. Но Тунгусский метеороид мог быть и каменным. На нашей недавней памяти 15 февраля 2013 г. произошло известное Челябинское событие [11], также свидетельствующее о реальности угроз, связанных с астероидно-кометной опасностью. Пострадало более 1600 человек, материальный ущерб превысил 1 млрд руб. И это ещё очень благоприятный исход: если бы это небесное тело вошло в атмосферу ближе к вертикали, последствия были бы чудовищными. Правда, всё равно найдутся скептикам, считающие астероидную опасность, скорее, мифом.

Частота и последствия столкновений сильно зависят от размеров падающего на Землю тела. В таблице 3 приведены современные данные о средней частоте и результатах столкновений тел различных размеров с Землёй. Подобная таблица была опубликована в работе [12], но с тех пор с учётом новых полученных данных оценки несколько изменились.

Ответ на вопрос, какие столкновения надо считать наиболее опасными, в общем плане очевиден. Понятно, что столкновения с частотой раз в миллионы или миллиарды лет практического интереса не представляют, но являются очень интересным объектом фундаментальных исследований. А вот падения достаточно крупных (размером от 10 до 500 м) тел, которые могут нанести значительный ущерб и происходят довольно часто на шкале времени 100 тыс. лет (примерное время существования вида *homo sapiens*), находятся в зоне внимания науки, занимающейся астероидно-кометной опасностью [13].

Отметим следующие общие характеристики проблемы АКО:

- практически нет верхнего предела опасного воздействия;
- как показывают оценки, усреднённый уровень угрозы мал, но при возникновении конкретного события (столкновения) оно может оказаться главным не только для отдельной страны, но и для всего человечества (например, скромное по астрономическим меркам Челябинское событие 15 февраля 2013 г. стало главным на тот момент событием мирового масштаба);

⁶ <http://www.hartrao.ac.za/other/vredefort/vredefort.html>

Таблица 3. Средняя частота и результаты столкновений малых тел различных размеров с Землёй

Объект	Размеры	Интервал между падениями (лет)	Размер	ИНАСАН
Пылинка	$D < 0,1$ см	Непрерывно		Сгорают, оседают
Метеороид Астероид Комета	$0,1 \text{ см} < D < 0,5$ м	0,05 (0,1 м)		Сгорают
	$0,5 \text{ м} < D < 20\text{--}30$ м	~1 (5 м) ~30 (15 м)		Сгорают, малая доля долетает до поверхности
	30 м	~ 250	Нет > 0,5	Типа Тунгусского события Аризонский кратер
	100 м	~ 3 тыс.	2	Региональная катастрофа
	1 км	1 млн	20	Глобальная катастрофа
	>10 км	100 млн	> 200	Конец цивилизации

- опасность имеет глобальный характер;
- в отличие от всех остальных естественных космических угроз, угроза столкновений с крупными небесными телами может быть достаточно уверенно прогнозируема, при условии, что будут решены задачи своевременного обнаружения и оценки риска.

По своей структуре проблема АКО – комплексная. Выделяют три её основные составляющие (аналогично с проблемой космического мусора):

- задача обнаружения (выявления) всех опасных небесных тел (ОНТ) и определения их свойств;
- оценка риска;
- противодействие и уменьшение ущерба.

Проблема обнаружения ОНТ. В современной трактовке проблемы АКО вопрос об обнаружении крупных ОНТ должен рассматриваться как задача оперативного и массового (то есть не ниже некоторого порога полноты, обычно 90%) выявления опасных тел размером более 50 м на дальних подступах к планете (не менее чем за 3–4 недели до возможного столкновения). Для обнаружения таких тел необходимы довольно крупные широкоугольные телескопы. Пока что количество обнаруженных опасных небесных тел размером более 50 м не превышает 1% от общей оценки числа таких тел. Так что проблема обнаружения ОНТ стоит по-прежнему остро. Рисунок 3 отражает полноту наших сведений об ОНТ. Конкретно информация приведена для так называемых астероидов, сближающихся с Землёй (АСЗ), то есть для астероидов с перигелийным расстоянием, не превышающим 1,3 а.е. Их намного больше, чем сближающихся с Землёй комет. Более 98% открытий ОНТ производится средствами США. Российские учёные и специалисты участвуют в международной кооперации по обнаружению ОНТ, но, к сожалению, вклад наших наземных

средств – обсерваторий и сетей ISON и МАСТЕР (МГУ им. М.В. Ломоносова) – пока весьма скромны и не превышает 0,1% от общего числа открытий АСЗ.

Ведущие страны уделяют проблеме обнаружения и определения свойств опасных ОНТ (да и в целом проблеме АКО) гораздо больше внимания, чем Россия. На разработку и реализацию методов противодействия этой угрозе в мире выделяются всё увеличивающиеся средства. После Челябинского события в США, например, на выполнение программ обнаружения опасных небесных тел отводится более 40 млн долл. в год. На отдельные проекты целевым образом предоставляются ещё более значительные суммы. Важно, что проблема АКО отражена в законодательстве США. Координирующую роль с точки зрения обнаружения опасных небесных тел и оповещения о возможном столкновении государство поручило NASA. Согласно закону (NASA Authorization Acts of 2008, 2010), это агентство в числе прочих задач уполномочивается:

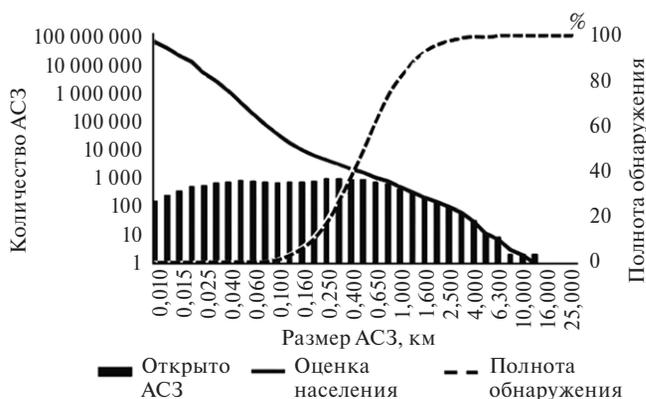


Рис. 3. Полнота обнаружения АСЗ (штриховая линия) и прогнозируемое распределение популяции АСЗ по размерам (сплошная линия); темные столбцы – количество известных АСЗ в интервале размеров (данные NASA)

- координировать работу сетей по обнаружению опасных небесных тел;
- обеспечить подготовку космической миссии с целью изучения потенциально опасного астероида и космической миссии среднего класса с целью выявления объектов размером более 140 м, сближающихся с Землёй;
- разработать политику для уведомления федеральных органов агентства и соответствующих учреждений в случае чрезвычайных ситуаций, обусловленных угрозой столкновения, рекомендовать федеральное агентство или агентства, которые будут отвечать за защиту Соединённых Штатов от околоземных объектов;
- развивать сотрудничество с другими странами, располагающими значительными ресурсами, с целью осуществления совместных программ обнаружения и каталогизации опасных небесных тел.

Все эти задачи выполняются: финансируемая и / или контролируемая NASA сеть наземных обсерваторий, оснащённых специально созданными либо модернизированными инструментами, обнаруживает подавляющее большинство открываемых ОНТ. Реализуется и космическая программа OSIRIS-REX (КА запущен в 2016 г.) для изучения потенциально опасного астероида Bennu, аппарат уже находится близ астероида. По сообщению Л. Джонсон (NASA), в 2017 г. подписаны соглашения между NASA, ЕАС (Комиссия по атомной энергии), FEMA (Федеральное агентство по чрезвычайным ситуациям) о взаимодействии по проблеме астероидно-кометной опасности, создана национальная система противодействия этой угрозе.

В исследованиях по обсуждаемому направлению лидируют США, причём не только по обнаружению опасных небесных тел. В документах, принятых ООН, зафиксирована ведущая роль в мире трёх информационно-аналитических центров по проблеме АКО. Два из них контролируются США. Это Центр малых планет (Minor Planet Center – MPC), который работает под эги-

дой Международного астрономического союза, расположен в Кембридже (США) и финансируется NASA, а также Программный центр NASA по проблеме АКО в Лаборатории реактивного движения (NASANEOProgram Office at JPL). Третий центр – это Центр по проблеме АКО программы SSA Европейского космического агентства (ESA SSA NEO Centre).

В последнее время в области наблюдений ОНТ в России вроде бы наметился определённый прогресс. В ИСЗФ СО РАН появился свой телескоп для обнаружения ОНТ в дальнем космосе. Это проект крупного (1,6 м) широкоугольного (после зрения $2,8^\circ$) обзорного телескопа АЗТ-33ВМ. Телескоп АЗТ-33ВМ и первые снимки, выполненные на этом перспективном инструменте, показаны на рисунке 4. Телескоп по своим возможностям сравним со знаменитым американским PanSTARRS. К сожалению, не обошлось без трудностей. Телескоп введён в опытную эксплуатацию в декабре 2015 г., но до сих пор не может заработать в полную силу из-за отсутствия средств на современный широкопанорамный приёмник излучения. Цена вопроса ~200 млн руб. РАН эту проблему решить не может. Обращения в Роскосмос о поддержке этого важного проекта были встречены с пониманием, но помешали нерешённые вопросы межведомственного согласования.

Современная (с учётом опыта Челябинского события 15 февраля 2013 г.) трактовка противодействия угрозе АКО включает задачу обнаружения не только крупных (более 50–100 м в диаметре), но и относительно малых (декаметровых) тел. Для этого можно использовать телескопы небольшой апертуры (~0,5 м), но их нужно много и они должны быть равномерно распределены по земному шару. Особенно остро стоит проблема обнаружения опасных небесных тел, приходящих с дневного неба. Такая задача требует выведения телескопов в космос. В работе [14] предложен вариант создания системы обнаружения околозем-

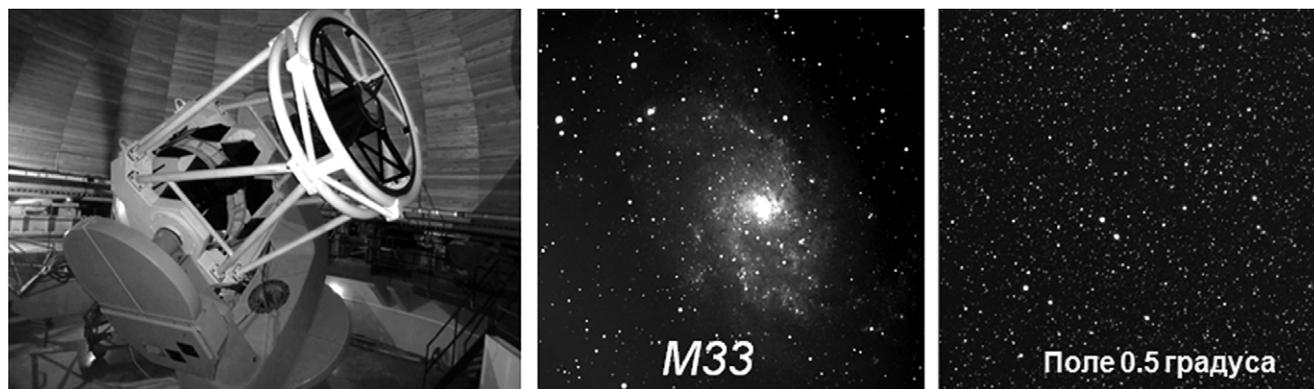


Рис. 4. Телескоп АЗТ-33ВМ и первые выполненные на нём снимки

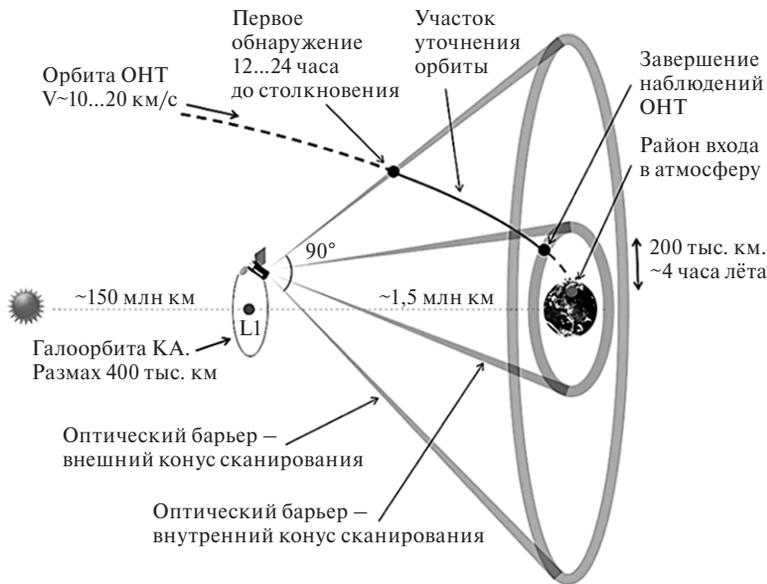


Рис. 5. Принципиальная схема работы космического аппарата СОДА

ных ОНТ. В результате проработки аван-проекта СОДА (Система обнаружения дневных астероидов) удалось разработать экономичные варианты реализации такой системы. Она состоит из одного или двух КА, помещаемых в окрестность точки L1 (в системе Земля – Солнце) на расстоянии около 1,5 млн км от Земли. Телескоп, находящийся в окрестности точки L1, будет видеть ОНТ, летящие к Земле от Солнца, при благоприятных для наблюдений значениях фазового угла. Показано, что задача обнаружения дециметровых ОНТ, летящих со стороны Солнца, может быть решена с помощью относительно небольшого телескопа апертурой около 0,3 м. На рисунке 5 приведена схема работы обсерватории СОДА. Главный режим работы – создание конусного барьера (или барьеров) с помощью одного или нескольких

телескопов. ОНТ наблюдается при пересечении барьера (барьеров), с тем чтобы за 3–4 часа до возможного входа в атмосферу Земли (при скорости сближения 20 км / с), то есть на расстоянии около 250 тыс. км от Земли, орбита ОНТ и место возможного столкновения были определены с заданной точностью. (На рисунке 5 показано два конических барьера, но их может быть больше.)

На период 2019–2025 гг. в рамках Федеральной космической программы планировалась проработка методов решения проблемы АКО, в частности по проекту СОДА, но при коррекции ФКП в конце 2018 г. соответствующие исследования были из неё исключены.

Оценка риска. Решение проблемы оценки риска и принятия решения – весьма ответственная и непростая задача. Требуется с высокой степенью надёжности определить вероятность столкновения, возможные его последствия и выработать адекватное решение.

Российские учёные принимают активное участие в разработке надёжных способов оценки рисков. В работе [15] детально рассчитаны последствия падения 300-метрового тела на Землю. Некоторые выводы на первый взгляд кажутся парадоксальными. На рисунке 6 показаны распределения максимального избыточного давления на поверхности Земли при ударах астероида диаметром 300 м под различными углами к поверхности. Как видно из рисунка, при вертикальном ударе область избыточного давления намного меньше, чем при косом ударе.

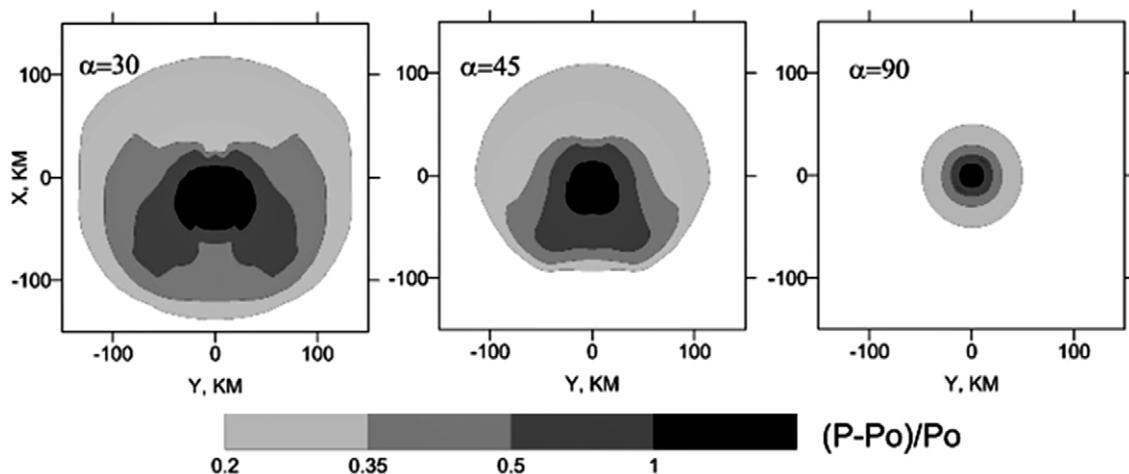


Рис. 6. Распределение максимального избыточного давления на поверхности Земли при ударах астероида диаметром 300 м под разными углами к поверхности: в случае косого удара астероид движется сверху (из области X>0) вниз и в точке X=0, Y=0 касается поверхности

Проблема противодействия астероидно-кометной опасности. В России, как и во всём мире, интенсивно изучаются методы парирования АКО. Есть два вида решения этой проблемы: отклонение угрожающего тела (то есть изменение его орбиты, с тем чтобы тело миновало нашу планету) и разрушение такого тела. Методы отклонения считаются предпочтительными. Над различными вариантами воздействия на угрожающее тело с целью изменения его орбиты работают учёные и специалисты ИПФ РАН, обоих федеральных ядерных центров, ИКИ РАН, ИНАСАН, МАИ, СПбГУ и других учреждений. Интерес и энтузиазм есть, но выполнить реальный космический тестовый эксперимент возможностей нет. Мы внимательно следим за ходом проекта AIDA (реализуется в сотрудничестве NASA и ESA), целью которого является отработка технологии кинетического импактора на двойном астероиде Дидим⁷.

Проблема прямого противодействия пока мало изучена. Главная неопределённость — плохое априорное знание свойств угрожающего тела и, соответственно, неуверенность в оценке последствий применения оружейных методов разрушения или методов изменения орбиты ОНТ.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ УГРОЗЫ (ПЛАНЕТАРНАЯ БИОЗАЩИТА)

Под планетарной биозащитой (планетарным карантинном) подразумевается комплекс мер по предотвращению заражения космических тел земными формами жизни и, наоборот, по недопущению заноса космических форм жизни на Землю.

Экспансия человечества в космос с использованием автоматических или пилотируемых космических кораблей неизбежно означает вынос в космос земной жизни, прежде всего в виде микроорганизмов. Абсолютно стерилизовать КА практически невозможно. По самым жёстким нормам стерилизации допускается наличие (вынос в космос) некоторого количества микроорганизмов на 1 м² поверхности КА. Более жёсткая стерилизация (например, в результате нагрева до очень высоких температур во многие сотни градусов или интенсивного гамма-облучения) приводит к нарушению функциональности космических аппаратов или их важных элементов. Таким образом, полностью исключить вероятность техногенной панспермии нельзя — существует опасность заражения других планет земными формами жизни. Это может привести к изменению биоценоза планеты посещения, если он есть. Помимо опасности для местной биосферы, занесение чужих организмов может исказить

общий биологический портрет планеты, а значит, будут искажены и результаты исследований по изучению проблемы происхождения жизни. Основной целью планетарной защиты в этом случае является сохранение первозданных природных процессов, предотвращение попадания на другие планеты организмов с Земли.

Опасность для жителей Земли представляет и так называемое обратное загрязнение — занос внеземных организмов, если таковые существуют, в биосферу Земли. Разновидность обратного загрязнения — возвращение на Землю земных же организмов, вынесенных ранее в космос и испытывавших воздействие космических факторов. В этом случае природа организмов может измениться и при возвращении они будут представлять опасность для биосферы Земли. Современная наука пока не способна прогнозировать, каким образом изменятся побывавшие в космосе или на другой планете земные микроорганизмы, насколько они мутировали [16]. Поэтому главная цель планетарной защиты — недопущение распространения в биосфере чужеродных организмов.

Ещё в прошлом веке было подписано международное соглашение о том, что при освоении планет Солнечной системы необходимо предотвращать их заражение, как и их спутников, земными формами жизни. Комитет по космическим исследованиям при Международном совете по науке (КОСПАР) разработал концепцию планетарного карантина. Эта концепция сводится к следующему: все космические полёты ранжируются на пять категорий в зависимости от биологического интереса к планете-мишени и типа экспедиции⁸.

Категория I: любая миссия в места, не представляющие непосредственного интереса для исследования химической эволюции и / или происхождения жизни; к таким местам относят, например, Солнце или Меркурий.

Категория II: любая миссия в места, представляющие непосредственный интерес для исследования химической эволюции и / или происхождения жизни, при этом риск того, что загрязнение с аппарата может поставить под угрозу исследование, крайне мал (Луна, Венера или кометы).

Категория III: миссия с пролётной траекторией или выход на орбиту в местах, представляющих непосредственный интерес для исследования химической эволюции и / или происхождения жизни, при этом риск того, что загрязнение с аппарата может поставить под угрозу исследование, чрезвычайно высок. К таким местам относятся Марс, Европа, Энцелад. К каждой конкретной миссии могут предъявляться дополнительные требования, такие как расчёт траектории смещения,

⁷ [https://en.wikipedia.org/wiki/AIDA_\(mission\)](https://en.wikipedia.org/wiki/AIDA_(mission))

⁸ <https://planetaryprotection.nasa.gov/about-categories/>

чистое сборочное помещение, снижение биологической нагрузки.

Категория IV: миссия с использованием зонда, спускаемого аппарата и / или планетохода в местах, представляющих непосредственный интерес для исследования химической эволюции и / или происхождения жизни. К каждой конкретной миссии выдвигаются определённые требования. Например, требование полной стерилизации, если миссия включает в себя поиск внеземной жизни, если планируется посадка либо перемещения в регионе, где наземные микроорганизмы могут выжить и развиваться, либо где могут присутствовать местные формы жизни.

Миссии категории IV дополнительно подразделяются на:

категирию IVa: зонд, спускаемый аппарат или планетоход, в цели которого не входит поиск марсианской жизни; уровень биологической нагрузки — не более 300 микроорганизмов на 1 м² (но не более 30 тыс. микроорганизмов на весь аппарат);

категирию IVb: зонд, спускаемый аппарат или планетоход, в цели которого входит поиск жизни; добавляются дополнительные требования для предотвращения загрязнения образцов;

категирию IVc: при наличии у зонда, спускаемого аппарата или планетохода целей в специальных областях Марса (выделенные КОСПАР области Марса, где могут легко выжить и распространиться земные организмы, а также велика вероятность существования марсианских форм жизни); к таким областям относятся места, в которых периодически образуется жидкая вода, и благоприятные для развития жизни территории (исходя из современных представлений о её развитии); в этом случае весь аппарат должен быть подвергнут стерилизации с остаточной биологической нагрузкой не более 30 микроорганизмов;

категирию V: отдельная категория, регулирующая поведение миссий, в ходе которых планируется возврат образцов с небесных тел на Землю.

Миссии категории V подразделяются на:

категирию V (неограниченный возврат): образцы из мест, где в соответствии с представлениями современной науки нет жизни; возможность обратного загрязнения ничтожно мала, никаких особых требований не предъявляется;

категирию V (ограниченный возврат): в случаях, когда современная наука не может гарантировать отсутствие жизни на целевом небесном теле, выдвигаются дополнительные требования, такие как помещение в карантин образцов, а также любого аппаратного обеспечения, использовавшегося в ходе миссии.

Неспециалистов в области космической биологии (в том числе и меня) удивляет живучесть

земных организмов в условиях космоса. В их выживании убеждают, в частности, результаты, полученные в Институте медико-биологических проблем РАН в рамках реализации космического эксперимента «Биориск». Цель этого эксперимента — оценка возможности выживания микроорганизмов в условиях космического пространства. В одном из экспериментов участвовал целый ряд биологических объектов: бактерии, грибы, личинки африканского комара, икра рыб, семена растений, ракообразные, эмбрионы, которые были экспонированы в условиях открытого космоса в течение 31 месяца. Согласно результатам, опубликованным в работе [17], многие виды довольно стойко перенесли пребывание в космосе. Погибла икра рыб, но выжила личинка комара, некоторые семена, бактерии и грибы, некоторые ракообразные. То есть планетарный карантин можно рассматривать не только в отношении микроорганизмов, но и других форм жизни.

Понятно, что эти и другие результаты, полученные учёными и специалистами ИМБП РАН, имеют огромное значение и для решения задачи защиты от опасности биологического заражения, и для наук о происхождении жизни. Старая гипотеза панспермии пока не опровергнута, и вполне возможно, что жизнь появилась на Земле в результате занесения на неё «космической заразы».

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В ИЗУЧЕНИИ И ПАРИРОВАНИИ КОСМИЧЕСКИХ УГРОЗ НА ПРИМЕРЕ ПРОБЛЕМЫ АСТЕРОИДНО-КОМЕТНОЙ ОПАСНОСТИ

Представляется очевидным, что решение задачи изучения и парирования космических угроз не может оставаться инициативой какого-то одного исследовательского центра или группы исследователей. Это дело общегосударственное, оно требует понимания и поддержки со стороны властных структур. В России такое понимание пока не достигнуто. Одна из задач, поставленных на проведённом 15 января 2019 г. заседании президиума РАН, посвящённом проблеме космических угроз, — разработка концепции российской программы изучения и методов парирования космических угроз, соответствующей современным реалиям. Чтобы выполнить эту задачу, нужно проанализировать состояние дел в данной области.

Как показано в предыдущих разделах, в наблюдениях космического мусора у нас сохраняются некоторые проблемы, но всё же можно отметить неплохой по сравнению с мировым уровень этих работ. Что касается опасности биологического заражения, то уровень соответствующих исследований в России вполне удовлетворительный, однако осуществляемые по этому направлению

программы требуют поддержки, особенно с использованием средств космического базирования. По проблеме мониторинга космической погоды основные заключения и рекомендации даны в конце соответствующего раздела. Кратко опишем подходы к организации работ по изучению и парированию АКО в Европейском союзе и в России. Это направление в нашей стране нужно развивать практически с самого начала, и пример Европы для нас более показателен, так как США здесь ушли уже очень далеко.

В Европейском Союзе с 2009 г. выполняется долгосрочная программа «Контроль ситуации в космосе» («Space Situational Awareness» – SSA). В документах, извещающих о запуске программы, заявляется, что она направлена на поддержку европейской независимости в сфере контроля, доступа и использования космоса. Директорат программы входит в качестве подразделения в структуру Европейского космического агентства.

Европейская система SSA включает три направления:

- контроль космического пространства (включая ИСЗ, другие КА и космический мусор);
- мониторинг космической погоды;
- исследование объектов, сближающихся с Землёй.

На первом этапе реализации программы SSA, выполненном в период 2009–2011 гг., разработаны её принципы и системы, технические требования к управлению, политике в области данных, архитектуре европейской системы SSA, созданы необходимые службы и центры данных, подготовлены новые радарные проекты. В 2012–2019 гг. осуществляется второй этап проекта, когда система должна начать полноценно функционировать. Затраты в целом на программу составляют многие сотни миллионов евро. Весьма важная особенность проекта SSA заключается в том, что для решения смежных задач наблюдения космического мусора и опасных астероидов и комет планируется максимально использовать одни и те же средства наблюдения. Часть результатов проекта была представлена на Дармштадской конференции, организованной Европейским космическим агентством в январе 2019 г. Следует отметить, что все предыдущие семь конференций были посвящены проблеме космического мусора. Восьмая же называлась «ЕКА конференция по обнаружению объектов, сближающихся с Землёй, и космическому мусору: синергия подходов» («ESA NEO and Debris Detection Conference – Exploiting Synergies») ⁹. В последнее время наметилась тенденция по созданию национальных и региональ-

ных центров по проблеме АКО в Восточно-Азиатском регионе – Китае, Японии, Южной Корее.

Что касается России, то проблеме АКО уделяют внимание не только эксперты, но и правительственные органы, однако конкретные работы по проблеме АКО ведутся только в инициативном порядке. В то же время необходимость общегосударственного подхода осознаётся и на уровне руководства страны. Отметим важное заседание «круглого стола» на тему «О разработке мер по обеспечению планетарной защиты от космических рисков и угроз» 12 марта 2013 г., организованное Комитетом Совета Федерации РФ по науке, образованию, культуре и информационной политике и Комитетом СФ РФ по обороне и безопасности. На заседании были приняты рекомендации по созданию национальной системы предупреждения и парирования космических рисков и угроз. Среди рекомендаций, адресованных, в частности, РАН, есть такая: «Предусмотреть проведение систематических междисциплинарных фундаментальных исследований, направленных на изучение и учёт космических угроз и рисков в системе стратегических рисков национальной и международной безопасности, и прикладных разработок, направленных на создание перспективных методов и средств измерений, наблюдений и контроля в рамках единой национальной и международной системы обнаружения, предупреждения и парирования космических угроз и рисков» ¹⁰.

Наиболее активную роль в продвижении идеи системного подхода к проблеме предупреждения АКО играет РАН. Для координации исследований в этой области при Совете РАН по космосу создана Экспертная рабочая группа по космическим угрозам. Её тематика включает вопросы, связанные с исследованием проблем космического мусора и АКО, которые в определённом смысле близки (по инструментальному и методическому подходам), и космической погоды. В неё вошли представители научных учреждений РАН, высших учебных заведений, Роскосмоса, МЧС, Росатома, Министерства обороны России и других заинтересованных ведомств и организаций ¹¹. Главной задачей, поставленной перед Экспертной группой совместным решением руководства РАН и Роскосмоса, была выработка проекта (концепции) программы федерального уровня «Создание российской системы противодействия космическим угрозам». Проект концепции был подготовлен [18], передан в Роскосмос и положительно оценён, но дальнейшего развития не получил, так как в агентстве сменилось руководство.

⁹ <https://conference.sdo.esoc.esa.int/>

¹⁰ http://defence.council.gov.ru/activity/activities/round_tables/29/949/

¹¹ http://www.inasan.ru/rus/asteroid_hazard/

В последнее время РАН в рамках её резко урезанных в последние годы полномочий и возможностей пытается что-то предпринимать, но без реальной системной поддержки эта активность сводится к экспертной деятельности. На заседании Президиума РАН 15 января 2019 г. отмечалось, что сейчас в России нет действующей программы высокого уровня по противодействию космическим угрозам, системная работа по координации исследований и практических работ (за исключением направления, связанного с космическим мусором) не ведётся. В результате роль России в международной кооперации в данной области незначительна и не соответствует статусу научной державы. Отсутствие ключевой отечественной информации по ряду направлений мониторинга космических угроз прямо влияет на уровень технологической независимости и обороноспособности Российской Федерации. К проблеме АКО это относится в первую очередь.

По аналогии с организацией дел в США и ЕС вполне логично было бы поручить роль основного организатора, ответственного за обнаружение опасных небесных тел, ГК «Роскосмос». Однако отношение Роскосмоса к проблеме АКО неустойчивое — от намерений поддержать соответствующие работы до игнорирования проблемы как таковой. Всё зависит от мнения руководства, которое часто меняется и, как правило, даже не успевает вникнуть в эту тематику, не рассматриваемую в качестве первоочередной в космической деятельности. Хотя следует признать, что предприятия Роскосмоса и их соисполнители в инициативном порядке провели ряд полезных научно-исследовательских работ по этой теме.

В последние годы наиболее активным государственным органом, уделяющим внимание проблеме АКО, являлся МЧС РФ. Министерство способно решать задачи определения риска, принятия решений и уменьшения ущерба в случае ЧС, обусловленных столкновением ОНТ с Землёй на территории России. Во взаимодействии с Роскосмосом, РАН и Министерством обороны РФ ядром федеральной системы противодействия космическим угрозам могут стать структуры МЧС. При МЧС создана соответствующая рабочая группа, проведено несколько НИР по созданию прототипа информационной системы для сбора сведений о конкретных угрозах столкновений с опасными небесными телами. Будучи завершённой, такая система должна обеспечить надёжные прогнозы вероятности и условий столкновения (места, времени, параметров катастрофического выделения энергии и т. д.), а также оценку возможных последствий. Активизации таких работ способствовало Челябинское событие 15 февраля 2013 г. Оказалось, что подобную информацион-

ную структуру, по крайней мере на уровне прототипа, можно создать в разумно короткие сроки — несколько лет.

В последнее время в совещаниях и конференциях по проблеме АКО принимают участие специалисты Министерства обороны РФ. Их интерес привлекают главным образом методы предотвращения столкновений с опасными объектами. Заметную роль в решении проблемы астероидно-кометной опасности могут играть (и отчасти играют) эксперты Министерства иностранных дел РФ, Росатома и Минпромторга. В последние годы МИД выступает в качестве координатора деятельности России по обсуждаемому направлению на уровне ООН.

* * *

Подробный анализ ситуации позволяет утверждать, что противодействие космическим угрозам — эволюционная необходимость для человечества. И во многих странах этот факт осознаётся не только учёными и специалистами, но и руководством, создаются национальные системы предупреждения таких угроз. Развивается международная деятельность в этом направлении, в частности, в рамках действующих под эгидой ООН программы «Международная сеть предупреждения об астероидах» (International Asteroid Warning Network — IAWN) и Консультативной группы по планированию космических миссий (Space Mission Planning Advisory Group — SMPAG). Разрабатываются и устанавливаются стандарты взаимодействия в этой области, однако роль России здесь пока невелика.

В России активность проявляют в основном эксперты и некоторые ведомства, прежде всего МЧС. Работы проводятся в инициативном порядке на уровне НИР, поскольку действующей программы высокого уровня по противодействию космическим угрозам в стране нет. Нет и эффективных инструментов для обнаружения ОНТ на дальних подступах (единственное такое средство — телескоп АЗТ-33ВМ, работающий, как отмечалось, лишь на 5% своей мощности). Российские планетарные радары в Евпатории и Уссурийске не планируются для использования по проблеме АКО, а потому не готовы к изучению опасных небесных тел. В последнее время некоторые радиотелескопы системы «Квазар» (ИПА РАН) участвуют в пассивных радиолокационных наблюдениях ОНТ. Отсутствует (даже в качестве федеральной комплексной программы) космический сегмент средств обнаружения ОНТ — единственно реальный способ выявления опасных тел, приходящих с дневного неба, а их в ближнем космосе около половины всего населения ОНТ.

Потенциал нашей страны в решении проблемы АКО и ряда других космических опасностей не консолидирован, поскольку государство не выражает стремления решать эту задачу на должном уровне. Но России необходимо определиться, создав собственную систему противодействия космическим угрозам и интегрировав её в мировую. С этой целью следует инициировать программу федерального уровня, в реализации которой Роскосмос мог бы играть роль организации, ответственной за создание подсистемы обнаружения опасных небесных тел, МЧС – за систему в целом и информационно-аналитическую подсистему по оценке рисков, за выработку решений и организацию мер по уменьшению ущерба и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. Другие ведомства и министерства могут выполнять работы по созданию средств прямого противодействия угрозам (МО РФ) и по приемлемой для России правовой интеграции в международное взаимодействие (МИД РФ).

В качестве срочных первоочередных мер предлагается разработать концепцию и провести комплексную НИР по созданию системы противодействия космическим угрозам. Координатором могут выступить Роскосмос, Минобрнауки России или РАН. И ещё нужно продемонстрировать готовность государства участвовать в решении проблемы космических угроз каким-либо конкретным действием, например, оперативно выделить финансирование на завершение оснащения единственного в России современного поискового телескопа АЗТ-33ВМ приёмниками излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астероидно-кометная опасность: стратегия противодействия / Под ред. В.А. Пучкова. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015.
2. Вениаминов С. С., Червонов А. Космический мусор – угроза человечеству. М: ИКИ РАН, 2012.
3. Космический мусор. Кн. 1. Методы наблюдений и модели космического мусора / Под ред. Г.Г. Райкунова. М.: Физматлит, 2014.
4. Космический мусор. Кн. 2. Предупреждение образования космического мусора / Под ред. Г.Г. Райкунова. М.: Физматлит, 2014.
5. *Klinkrad H.* Space Debris. Models and Risk Analysis. Springer, 2006.
6. *Kessler D.J.* Collisional Cascading: The Limits of Population Growth in Low Earth Orbit // *Advances in Space Research.* 1991. V.11. Is. 12. P. 63–66.
7. Сёмкин Н.Д., Воронов К.Е., Пияков А.В., Пияков И.В. Регистрация космической пыли искусственного и естественного происхождения // *Прикладная физика.* 2009. № 1. С. 86–102.
8. Новиков Л.С. Воздействие твёрдых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты. М.: Университетская книга, 2010.
9. *Bothmer V., Daglis J.A.* Space Weather. Physics and Effects. Springer, 2006.
10. Солнечно-земные связи и космическая погода / Плазменная гелиогеофизика / Под ред. А.А. Петруковича. М.: Наука, 2008.
11. Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н.Н. и др. Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // *Астрономический вестник.* 2013. Т. 47. № 4. С. 262–277.
12. Шустов Б.М., Рыхлова Л.В. Астероидно-кометная опасность: новые подходы // *Вестник РАН.* 2009. № 7. С. 579–586.
13. Астероидно-кометная опасность / Под ред. Б.М. Шустова и Л.В. Рыхловой. М.: Физматлит, 2010.
14. Шустов Б.М., Шугаров А.С., Нароенков С.А., Прохоров М.Е. Астрономические аспекты космических угроз: новые задачи и подходы к проблеме астероидно-кометной опасности после Челябинского события 15 февраля 2013 г. // *Астрономический журнал.* 2015. № 10. С. 867–880.
15. Шувалов В.В., Светцов В.В., Артемтева Н.А. и др. Астероид Апофис – оценка опасных последствий, ударов подобных тел // *Астрономический вестник.* 2017. № 1. С. 1–16.
16. Хамидулина Н.М., Новикова Н.Д., Дешева Е.А. Обеспечение планетарной защиты в экспедиции / ФОБОС-ГРУНТ проект космической экспедиции. Т. 1. М.: Полстар, 2011.
17. *Novikova N.D., Polikarpov N.A., Deshevaya E.A. et al.* Survival of dormant organisms after long-term exposure to the space environment // *Acta Astronautica.* 2011. V. 68. P. 1574–1580.
18. Шустов Б.М., Рыхлова Л.В., Кулешов Ю.П. и др. Концепция системы противодействия космическим угрозам: астрономические аспекты // *Астрономический вестник.* 2013. № 4. С. 327–340.

НУЖЕН НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ В ОБЛАСТИ КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

ОБСУЖДЕНИЕ НАУЧНОГО СООБЩЕНИЯ

Дискуссию по докладу Б. М. Шустова открыл академик **А. М. Сергеев**, который отметил, что проблемами космического мусора, космической погоды и астероидной опасности интересуются многие органы исполнительной власти и госкорпорации, однако по разным причинам пока не участвуют активно в формировании соответствующей программы. Он предложил создать альянс, включая Академию наук, Роскосмос, Минсвязи России, МЧС, Минздрав РФ, чтобы подготовить весомый документ на эту тему.

Б. М. Шустов уточнил, что в Совет РАН по космосу, помимо представителей РАН, входят специалисты многих ведомств, даже МИДа. Однако, по его мнению, к вопросу об астероидной опасности следует привлечь внимание руководства страны, что делается во многих странах.

Как заметил академик РАН **В. Е. Фортов**, попытка связать космические угрозы и техногенные угрозы в космосе в одну программу предпринимается не в первый раз. Это делали американцы, существовала международная программа ООН, у нас была рабочая группа, куда входили представители Института физики Земли РАН. Но, несмотря на серьёзные усилия, ничего из этого не вышло. Все попытки разбиваются об один существенный аргумент: спрашивается, каковы потери от космического мусора и от метеоритов? И оказывается, что ясного цифрового анализа сделать не удаётся. Например, предлагается защищать нашу планету от метеоритов или комет размером больше 100 м, что соответствует мощности взрыва 60 Мт (по сути дела, это несколько Тунгусских метеоритов), но удалось найти всего один пример реального события такого рода — где-то в горах Австрии убило корову. Это очень серьёзный аргумент, хотя он и звучит несколько юмористически.

По мнению В. Е. Фортова, если браться за эту проблему, надо провести ясный цифровой анализ и показать, какие потери несёт наша космическая отрасль из-за космического мусора. Что касается катастрофических последствий, тут проблема несколько иная, поскольку это очень редкие события. Вы знаете, что крупный астероид, подобный тому, последствия падения которого описал Альварес, появляется раз в 5–6 млн лет и убивает всё на своём пути, он способен спровоцировать так называемую "ударную зиму", похожую на "ядер-

ную зиму". Простые оценки показывают: чтобы с ним что-то сделать, не хватит всего накопленного на Земле ядерного потенциала. Чтобы всерьёз противостоять подобной угрозе, нужно держать на орбите тысячи мегатонн заряда, иметь совсем другие носители с иной энергетикой. Вывод напрашивается сам собой: мы ничего не можем сделать в случае возникновения такого события. Поэтому, считает В. Е. Фортов, следует очень внимательно продумать решение и рекомендации по докладу.

Отвечая, Б. М. Шустов признал, что падения астероидов случаются нечасто, но когда это происходит, реакция на них общества оказывается очень острой. Так было, например, со скромнейшим по космическим масштабам Челябинским событием. Специалистам предъявлялись претензии: почему не предупредили население, почему не предсказали? Да, супервзрывы происходят раз в миллионы лет, но падения мелких небесных тел наблюдаются часто, и даже они имеют неблагоприятные последствия. А значит, надо предупреждать людей, но системы предупреждения нет, особенно если речь идёт о телах, которые приходят с дневного неба. Для этого нужна система, вынесенная в ближний космос, а её нет.

Академик РАН **Л. М. Зелёный** согласился с тем, что после падения Челябинского метеорита отношение к астероидной опасности изменилось, потому что было ранено много людей. Сейчас очевидно, что даже не крупное событие может нанести большой вред. Но есть очень простой способ профилактики, который следует использовать до того, как мы научимся предотвращать подобные угрозы уже в космосе. Речь идёт о гражданской обороне, которой сейчас практически не уделяется внимания. Между тем любой школьник должен знать, что если он видит за окном яркую вспышку, надо ложиться на пол и отползать от окна. Все травмы, полученные при падении Челябинского метеорита, — результат отказа от преподавания в школах гражданской обороны. По мнению Л. М. Зелёного, в качестве одной из рекомендаций заседания нужно записать рекомендацию Министерству просвещения РФ ввести уроки по гражданской обороне.

Что касается астероидно-кометной опасности и техногенного засорения космического пространства, то в соответствии с федеральном

законом "О космической деятельности" ответственность за безопасность в этой области лежит на госкорпорации "Роскосмос", подчеркнул директор департамента стратегического планирования Роскосмоса **Ю.Н. Макаров**. По его словам, это объединяющая тема для представляемого им ведомства и Российской академии наук.

Система мониторинга космического пространства должна быть превентивной. Сейчас большое количество аппаратов выходит из строя, и причины этого зачастую неизвестны. Иногда предполагается влияние каких-то частиц, высокоэнергетических космических лучей, техногенных объектов, иногда — преднамеренное воздействие на космический аппарат. Но это всё догадки. Чтобы знать точную причину, необходимо организовать систему мониторинга космического пространства, однако до недавнего времени мощной системой наблюдения располагали только США. К настоящему времени такая система сформирована и у нас, она эксплуатируется с 1 января 2016 г., сообщил Ю.Н. Макаров.

Обсуждаемая научно-техническая проблема носит комплексный характер, имеет высокую степень сложности, а значит, необходимо привлекать научный потенциал Академии наук. Однако значительная ресурсоёмкость мероприятий стала причиной сдержанного отношения министерств экономического блока к их финансированию. Каждый раз такие мероприятия декларируются в Федеральной космической программе, но затем из неё исключаются, приоритет отдаётся поддержанию орбитальной группировки. В то же время в США каждый запуск космических аппаратов сопровождается прогнозом потенциальных опасностей, связанных со столкновением с космическим мусором, имея в виду стоимость подобных объектов.

За время существования практической космонавтики на орбитах произошло более 250 разрушений вследствие взрывов и столкновений. В космосе остались тысячи отработавших космических аппаратов и ступеней ракет-носителей, а также фрагменты космической техники. В результате количество находящихся на орбите объектов, размер которых превышает 1 см, по разным оценкам, составляет от 600 до 700 тыс. Ситуация усугубляется резко возросшей в последний период интенсивностью космической деятельности, к развёртыванию готовится большое число новых орбитальных группировок. Если сейчас в околоземном космическом пространстве находится 2288 космических объектов, то в ближайшие годы это количество резко возрастет. Эта ситуация требует наблюдения и контроля, отметил Ю.Н. Макаров. Действующая с 2016 г. система предупреждения об опасных ситуациях включает средства,

размещённые не только в России (Кисловодске, Благовещенске, Крыму), но и в Армении, Бразилии, ЮАР.

Упомянув, что сейчас сформировано 12 национальных проектов, а госкорпорация "Росатом" предложила 13-й проект, Ю.Н. Макаров считает, что стоит задуматься о национальном проекте в области космической деятельности. Здесь инициатором могла бы выступить госкорпорация "Роскосмос" совместно с Академией наук, имея в виду такие составляющие, как высокая энергетика в космосе и мониторинг околоземного космического пространства и дальнего космоса на предмет в том числе парирования угроз астероидно-кометного плана и техногенного засорения космического пространства.

Как сообщил директор Научно-исследовательского испытательного центра ракетно-космической обороны Минобороны России **О.Ю. Аксёнов**, при подготовке к заседанию была предпринята попытка получить усреднённую оценку динамики засорения околоземного космического пространства путём обобщения данных множества доступных источников. Причём особое внимание уделялось именно мелким фракциям космического мусора, в первую очередь потому, что в этой области Министерство обороны РФ ожидает помощь от Академии наук, Роскосмоса и других организаций, которые обладают соответствующими средствами контроля.

По словам О.Ю. Аксёнова, бросается в глаза, что при линейном нарастании крупной фракции, которую мы в состоянии регистрировать и вносить в каталог, количество мелкой фракции увеличивается экспоненциально. По данным наблюдений радаров, таких как "Haystack/НАХ", за три года (с 2006 по 2009 г.) плотность потока космического мусора на высоте 800–900 км возросла на 20–30%. Следует учитывать, что в некотором смысле мелкий мусор опаснее крупного, так как столкновения с ним всегда неожиданны и их невозможно избежать, а при космических скоростях это чревато непоправимым ущербом. Такие ситуации уже возникали, в том числе с военными космическими аппаратами, и, помимо технических проблем, имели своим следствием взаимные подозрения соперничающих сторон.

В настоящее время достигнута технологическая готовность к развёртыванию в ближнем космосе масштабных многоаппаратных космических систем коммуникационного назначения. Это проекты "Starlink" (США) и "One Web" (Великобритания). Есть такой проект — "Эфир" (правда, в начальной стадии) — и у России. Все они предполагают запуск в низкоорбитальную область (ниже 2 тыс. км) более 8 тыс. малых космических аппаратов весом 150–300 кг и дальнейшее поддер-

жание их функционирования путём восполнения. Это резко ускорит насыщение низкоорбитальной области как самими космическими аппаратами, так и другими техногенными объектами, которые неизбежно сопутствуют запуску. По оценкам, дополнительно привнесённая масса будет соизмерима с массой, накопленной в низкоорбитальной области за всю 61-летнюю историю космонавтики. В этих условиях, считает О.Ю. Аксёнов, важно создавать и совершенствовать отечественные инструментальные средства и методы контроля космического мусора размером менее 10 см. Поскольку частицы сантиметрового, миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов невозможно контролировать по отдельности, измерения должны позволять оценивать плотность их потоков в околоземном пространстве — от 500 до 1000 км, а телекоммуникационные системы — на высотах 1100—1300 км. В этом деле Министерство обороны РФ ждёт решительных шагов (предложений по сотрудничеству) именно от Российской академии наук.

Член Межведомственной рабочей группы по долгосрочной устойчивости космической деятельности при МИДе России **В.М. Агапов** (Институт прикладной математики РАН) выделил в качестве основы изучения техногенной засорённости эволюционную модель всей совокупности объектов космического мусора и её непрерывную верификацию. Вследствие большого разнообразия этих объектов все существующие модели являются эмпирическими. Чтобы понять, насколько адекватно они отражают действительность, используются различные измерительные средства (наземные и бортовые), и с учётом измерений производится корректировка моделей. Также речь идёт о критериальной основе оценки рисков. Критерии, которые используются для принятия решения о манёврах уклонения или ещё о каких-то действиях, опираются на имеющуюся информацию и неразрывно связаны с используемыми моделями. Поэтому в настоящее время не существует каких-то универсальных критериев, некоторые из них спорны, поскольку опираются на упрощённые гипотезы, и здесь нужна серьёзная научная проработка. Это прежде всего оценка физических свойств и классификация объектов космического мусора, поскольку нужно понять, откуда он возникает и как сократить его образование. На орбитах уже накоплено свыше 57 тыс. объектов размером более 5 см и свыше 750 тыс. объектов — более 1 см в поперечнике. Для каждого источника космического мусора, будь то разрушение отдельных объектов, разрушение материалов внешних элементов конструкции, выбросы частей шлака при работе твердотопливных двигателей, выбросы частиц теплоносителей

из контура охлаждения советских ядерно-энергетических установок, нужна отдельная модель. **В.М. Агапов** с сожалением отметил, что сейчас таких моделей нет, системной работы по созданию и верификации моделей индивидуальных событий и объектов, являющихся источниками космического мусора, у нас не ведётся.

По мнению академика РАН **В.Е. Фортова**, **В.М. Агапов** затронул очень важный вопрос, касающийся моделей. Ясно, что если количество мусора будет расти, то вся система может выйти на цепной режим роста, потому что каждое столкновение порождает несколько осколков, из которых в свою очередь возникает энное количество новых осколков, то есть создаётся ситуация теплового цепного взрыва. Насколько далеки мы сегодня от этого? Где та граница, за которой последует лавинообразное экспоненциальное увеличение количества мусора?

В.М. Агапов разъяснил: то, о чём идёт речь, применительно к проблематике космического мусора называется синдромом Кесслера. Он был предсказан в конце 1970-х годов применительно к системе Юпитера, а затем перенесён на околоземное пространство. За многие годы изучения проблематики космического мусора была выявлена очень интересная особенность: логарифмическая зависимость потока частиц от их размера на уровне 1 см характеризуется изломом, то есть тут речь идёт о совершенно разных производных. До сих пор физический смысл этого излома никто не смог объяснить. Общепринятая сейчас теория основывается на том, что этот излом — результат взаимных столкновений малых частиц, которые происходят регулярно, а концентрация малоразмерных объектов постоянно растёт. По некоторым оценкам, она уже превысила критические пороги. Но поскольку модели эмпирические, а измерений недостаточно, к этим оценкам следует подходить настороженно. Надо проверять, насколько математика и физика согласуются с реальными наблюдениями.

Затем слово было предоставлено доктору физико-математических наук **В.Д. Кузнецову**, директору Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН). Он обратил внимание на тот факт, что с развитием технической наземной и космической инфраструктуры всё ощутимее дают о себе знать факторы космической погоды. Толчком, послужившим веским основанием учёта этих факторов, стало событие 1989 г., когда в результате мощной геомагнитной бури, вызванной солнечной активностью, провинция Квебек, включая столицу Канады Оттаву, на 9 часов осталась без электроэнергии. По оценкам, ущерб составил от 1 до 2 млрд долл. Помимо

урона, нанесённого наземным объектам, было нарушено функционирование всех космических систем и группировок, в частности, работа американской системы определения местоположения — прообраза нынешних систем GPS и ГЛОНАСС. Многие спутники были потеряны или изменили свои орбиты.

Основной источник космической погоды — солнечная активность: из Солнца непрерывно истекает солнечный ветер, происходят выбросы массы, которые генерируют частицы высоких энергий и ударные волны в межпланетной среде. Все эти процессы воздействуют на Землю и околоземное космическое пространство, вызывая многообразные явления, самые мощные и опасные из которых — геомагнитные бури, во время которых происходит генерация геомагнитно-индуцированных токов во всех проводящих системах.

Космическая инфраструктура — международные космические станции, спутники, космические системы разного назначения — подвергается серьёзным рискам со стороны космической погоды. Например, в периоды сильных магнитных бурь международная космическая станция аномально тормозит и теряет высоту быстрее обычного (на 7–10 км), что создаёт для неё угрозу. В связи с тем, что критически важные элементы наземной инфраструктуры взаимосвязаны и взаимозависимы, помимо прямых последствий космической погоды, имеют место и существенные косвенные потери. Так, серьёзный отказ одного из видов инфраструктуры страны, например связанной с поставкой электроэнергии, приведёт к каскадному отказу других видов, причём по мере интенсивного технологического развития риск для экономики и её устойчивого развития вследствие действия факторов космической погоды будет только возрастать.

Значимость угроз, связанных с космической погодой, осознаётся мировым сообществом, заметил В.Д. Кузнецов. В рабочих органах ООН создана специальная экспертная группа по космической погоде, которая разрабатывает меры по минимизации её негативных последствий на космическую деятельность. Ставится задача ведения мониторинга солнечной активности и околоземного космического пространства, получения данных о космической погоде, составления надёжных прогнозов, разработки и внедрения технических стандартов, координации действий на международном уровне.

Директор Института космических исследований РАН член-корреспондент РАН А.А. Петрукович дополнил выступление В.Д. Кузнецова информацией о мониторинге космической погоды, прежде всего отметив, что это комплексная задача, которая решается ежедневно, для разных

отраслей и регионов. Он указал на важность формирования независимой российской системы мониторинга, несмотря на наличие международной наблюдательной сети. Сейчас в космосе с этой целью работают два спутника — "Электро" и "Метеор", осуществляющие ограниченный комплекс наблюдений. Но специалисты ждут запуска нового ионосферного комплекса, который запланирован на 2023 г., а также солнечного спутника и крупной сети Гидромета.

А.А. Петрукович напомнил, что в советский период Академия наук отвечала за "верхний этаж" мониторинга — за службу Солнца, за всё, что связано с солнечными прогнозами. Сейчас, к сожалению, из-за ведомственной неопределённости и постоянных изменений эта деятельность не осуществляется в полном объёме. Часть наблюдений на "верхних этажах" в российской системе полностью отсутствует. В то же время существует система прогноза и моделирования, в которую наши научные организации вносят большой вклад. Например, информацией прогнозного центра ИЗМИРАНа, созданного на инициативной основе, сейчас пользуются десятки потребителей из разных отраслей народного хозяйства.

Говоря о тех сегментах системы, которые пока отсутствуют, А.А. Петрукович указал прежде всего на мониторинг солнечного ветра. Как уже было сказано, основной фактор воздействия на Землю — магнитные бури, которые обусловлены даже не потоком вещества к Солнцу, а потоком магнитного поля от Солнца, который составляет примерно 1% кинетической энергии солнечного ветра. Возникает такой режим, когда магнитное поле в солнечном ветре направлено противоположно геомагнитному полю. Это направление нельзя предсказать по солнечным данным, но оно полностью определяет энергетику системы, магнито- и ионосферы. Для его мониторинга нужен спутник-монитор солнечного ветра в точке вибрации. В настоящее время действует такой американский спутник, данные с него доступны, но неизвестно, будут ли они доступны в будущем.

А.А. Петрукович также обратил внимание на мониторинг полярных районов, которые особенно чувствительны к магнитной активности, к космической погоде. В то же время Арктика — существенный сегмент российской территории, но расположить здесь во всех точках станции невозможно. Единственный способ полностью наблюдать эту зону без привязки к конкретной станции — осуществлять мониторинг полярных сияний из космоса, с помощью специализированного спутника, который позволяет установить и состояние ионосферы, и изменчивость, и проходимость радиоволн практически для каждой нужной точки. Сейчас, считает А.А. Петрукович,

проблема состоит в том, что в российской системе космического мониторинга не представлены две ключевые позиции, обеспечивающие независимость, — мониторинг солнечного ветра и мониторинг авроральной зоны, имеющие важное значение с точки зрения решения как прикладных задач, связанных с гражданской обороной, так и многих фундаментальных научных задач. Создание соответствующих двух спутников может быть реализовано на базе малых космических аппаратов весом 100–200 кг. Это по силам кооперации Роскосмоса, РАН и Минобрнауки России.

О последствиях, которые возникают при входе космических объектов в атмосферу Земли, говорила кандидат физико-математических наук **О.П. Попова** (Институт динамики геосфер РАН). Такие последствия определяются параметрами космического объекта: не только его размером и скоростью, но и углом входа, углом наклона его траектории к поверхности Земли и веществом, из которого оно состоит. Тела одного и того же размера, движущиеся с той же скоростью, состоящие из одного и того же вещества, при падении могут привести как к образованию кратера, так и полностью разрушиться в атмосфере Земли и вызвать возникновение ударной волны теплового излучения.

К неблагоприятным последствиям относятся прежде всего ударная волна и тепловое излучение, вызывающее пожары и ожоги. Эти эффекты наиболее характерны для входа в атмосферу малых космических объектов, то есть тел размером 20–50 м, типа челябинского или тунгусского тела. Такие тела могут приводить к возникновению сильных ионосферных возмущений, более крупные — к образованию кратеров и цунами. Помимо ударной волны и теплового воздействия, важным является формирование масштабной возмущённой области в атмосфере и ионосфере.

Как оцениваются последствия? Раньше пользовались ударно-взрывной аналогией, в последние годы была проведена комплексная оценка последствий для тел в широком диапазоне размеров, углов входа, скоростей и состава на основе развитых специализированных математических моделей. Поскольку в лаборатории моделировать последствия невозможно, используется численное моделирование, которое требует больших временных затрат. Поэтому исследователи предпринимают попытки построения интерпретационных формул, которые экономят время на оценку последствий, когда получены первые сведения о космическом объекте. Этот инструмент позволяет предложить оптимальную стратегию противодействия, заключила **О.П. Попова**.

Академик РАН **О.И. Орлов** отметил, что в выступлениях **Б.М. Шустова** обозначена роль био-

логических рисков в системе космических угроз. Особое значение придаётся сейчас возможности попадания на Землю биологических объектов, микроорганизмов из космоса. В ряде экспериментов, в частности в экспериментах "Биориск" и "ЭкзоМарс", показано, что различные живые формы прекрасно переносят экспонирование в условиях открытого космоса и выживают. В настоящее время в рамках эксперимента "Тест" на борту МКС подтверждено, что некоторые формы жизни способны существовать в космической пыли на внешней обшивке станции. А благодаря проекту "Бион" удалось доказать, что при определённых условиях некоторые формы микроорганизмов могут переносить прохождение через плотные слои атмосферы и таким образом попадать на Землю.

Надо сказать, что этой серьёзной проблеме уделяется достаточно большое внимание на международном уровне. Разработана целая система мероприятий по предупреждению попадания биологических объектов на Землю при проведении межпланетных экспедиций. В нашей стране эту работу курирует Совет РАН по космосу, в рамках которого создана межведомственная экспертная рабочая группа по планетарной защите, а применительно к проекту "ЭкзоМарс" идёт практическая работа по обеспечению условий планетарной биологической защиты.

О.И. Орлов обратил внимание на ещё один не менее важный аспект проблемы. Дело в том, что экспонирование в условиях космического пространства способствует изменению свойств микроорганизмов, они становятся более активными, выживают наиболее агрессивные штаммы. Повышается устойчивость микроорганизмов к антибиотикам, противогрибковым препаратам, изменяется механизм переноса генетического материала и условия деления микроорганизмов в более активную сторону, усиливается устойчивость к повреждающим факторам, например ультрафиолетовому облучению. И это непростая проблема. Огромное количество микроорганизмов населяют сегодня Международную космическую станцию, а значит, возникает вероятность модификаций: различные источники микрофлоры, взаимодействуя и модифицируясь, могут представлять угрозу для станции и для человека. **О.И. Орлов** подчеркнул, что многие факторы, действующие при полётах за пределами магнитосферы Земли (изменённые радиационные условия и условия микрогравитации, гипомангнитная среда), пока не исследовались, можно только предполагать, какие здесь могут возникать последствия.

Озабоченность МЧС России в связи с космическими угрозами выразил кандидат технических наук **М.И. Савельев** (Всероссийский НИИ

по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России). Он отметил крайнюю заинтересованность МЧС России в поддержании на должном уровне орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, защиты её от воздействия космического мусора, а также в решении проблем защиты населения и территории страны в условиях астероидно-кометной опасности.

МЧС России обрела определённый опыт ликвидации последствий чрезвычайной ситуации космического происхождения в связи с Челябинским событием 2013 г., которое было признано чрезвычайной ситуацией федерального уровня. Это событие сопровождалось мощным взрывом, который по разрушительному потенциалу сопоставим с энергией ядерного взрыва от 350 до 500 кт. Полоса поражения от ударной волны составила свыше 130 км в длину и 50 км в ширину. Было повреждено или разрушено более 7 тыс. зданий, медицинская помощь оказана 1600 пострадавшим, в том числе госпитализировано 38 человек. Материальный ущерб превысил 1 млрд руб.

С этого момента проблема астероидно-кометной опасности стала предметом пристального внимания МЧС России, нашла своё отражение в Федеральной космической программе на 2016–2021 гг. По инициативе министерства на основе консолидации усилий институтов РАН, других научных учреждений в 2014–2015 гг. была разработана информационная аналитическая система мониторинга опасных небесных тел и планирования противодействия астероидно-кометной опасности. В результате подготовлен программный комплекс по исследованию эволюции опасных небесных тел, визуализации изменения их орбит, оценки вероятности опасных сближений и падения астероидов на Землю. Работа выполнена научным коллективом в составе представителей Института астрономии РАН, Института динамики геосфер РАН, Института радиотехники, электроники и автоматики РАН, НИУ "Высшая школа экономики".

Исследования по данной теме показали, что тема астероидно-кометной опасности относится к наукоёмким проблемам, требующим фундаментальных поисков и крупных финансовых затрат, что не по силам любому отдельно взятому ведомству. Необходима консолидация усилий и принятие федеральной программы по космическим угрозам, считает М.И. Савельев.

Академик РАН **А.О. Глико** согласился с В.Е. Фортовым в том, что прямое попадание осколков метеоритов — явление очень редкое. Непонятно, как следует противостоять последствиям солнечного ветра и магнитных бурь — их можно только наблюдать. А вот космический мусор — ре-

альная проблема, которой действительно нужно заниматься. Специалисты Отделения наук о Земле РАН хорошо умеют моделировать подобные явления. Но если говорить об эффективных методах парирования угроз, этим институты отделения не занимаются.

Говоря об астероидно-кометной опасности, директор Института прикладной астрономии РАН кандидат физико-математических наук **Д.В. Иванов** отметил, что в возглавляемом им институте ведётся регулярная работа по определению и уточнению орбит тел солнечной системы, в том числе сближающихся с Землёй. Разработаны и реализованы оригинальные методики оценки вероятности и последствий столкновений, выполняется полный цикл наблюдений, обработки и анализа результатов.

Наиболее точный метод обнаружения и сбора информации об объектах, сближающихся с Землёй, — радиолокация. В настоящее время в мире на постоянной основе действуют только два радиолокатора, в США реализуется государственная программа поддержки таких наблюдений, и 32-метровый телескоп Института прикладной астрономии "Квazar-КВО" периодически участвует в этой работе. 72-метровый планетный лока́тор-антенна в Голдстоуне излучает сигнал, а российский радиотелескоп его принимает. С 2015 г. получены сигналы от восьми астероидов. Беда в том, что все эти наблюдения полностью зависят от доброй воли американской стороны. Чтобы организовать в России независимые наблюдения, необходимо создать планетный лока́тор с характеристиками, аналогичными американским. Д.В. Иванов считает нужным подготовить обращение в Министерство обороны РФ об организации и проведении радиолокационных наблюдений околоземных объектов на радиотелескопах комплекса "Квazar-КВО", а в качестве лока́торов использовать радиотелескопы "РТ-70" Министерства обороны РФ.

Руководитель рабочей группы при Президенте РФ по анализу рисков и проблем безопасности, которая была создана после катастрофы на Чернобыльской АЭС, член-корреспондент РАН **Н.А. Махутов** считает, что обсуждаемая проблема представляет интерес для Академии наук в двух аспектах. С одной стороны, это углублённый анализ того, что происходит в космосе и какие возникают чрезвычайные ситуации, с другой стороны, это вопрос о том, что необходимо предпринять, чтобы минимизировать соответствующие риски.

По мнению Н.А. Махутова, проблема защиты от космических угроз, имеющая самостоятельное значение, должна быть объединена с проблемой защиты от земных угроз, включая и военные угрозы, и угрозы цунами, землетрясений,

радиоактивных волн. И только Академия наук может ставить интегральную задачу о стратегических рисках на Земле, возникающих по разным причинам. Н.А. Махутов напомнил, что вопрос о создании системы противодействия разнообразным рискам и угрозам рассматривался 15 лет назад, когда академик Д.Е. Охочимский выступил с замечательным докладом, в котором утверждалось, что Советский Союз был способен вывести на космические орбиты около шести спутников, предназначенных для обеспечения устойчивого космического мониторинга. И в академии такого рода работы нужно продолжить, имея в виду фундаментальный подход к глобальным угрозам и рискам, в том числе космическим, но в первую очередь военным.

Взявший слово академик РАН **Б.Н. Четверушкин** обратил внимание на необходимость компьютер-

ной обработки данных и математического моделирования. По его мнению, средства защиты сейчас можно найти за счёт моделирования, как это делается в некоторых военных приложениях.

Подводя итоги заседания, президент РАН академик **А.М. Сергеев** обобщил прозвучавшие предложения. Он считает, что следует обсудить с Роскосмосом возможность такой инициативы, как формирование самостоятельной программы, посвящённой космическим угрозам. Это серьёзная инициатива, и она должна быть всесторонне изучена.

Материалы обсуждения подготовила к печати
Г.А. ЗАЙКИНА,
кандидат философских наук,
журнал "Вестник Российской академии наук"
galzaikina@yandex.ru

THE ROLE OF SCIENCE IN THE STUDY OF AND RESPONSE TO SPACE THREATS

© 2019 B. M. Shustov

Institute of Astronomy RAS, Moscow, Russia

Received 04.03.2019

Revised version received 20.03.2019

Accepted 16.04.2019

During the second half of the 20th century and the beginning of the 21st century, space hazards multiplied, the most urgent of which is space debris. Professionals working in space are exposed to this hazard daily and are aware of it as a problem. Furthermore, increasing attention is being paid to the unpredictable behavior of the Sun, which produces the so-called space weather. The asteroid-comet hazard is considered as potentially having the most catastrophic consequences. No manifestations of biological hazard have yet been observed, although as space activities develop, it is becoming increasingly important. The appropriate time scale for astrophysical hazards is many millions of years, so from a practical perspective, they have no importance. This article briefly describes the main types of space hazards. The author analyzes the results of research and practical work in the field, both worldwide and specifically in Russia. Comparative analysis leads to the clear conclusion that a national program must be developed for the study of space hazards and to respond to space threats. This article is based on a report made by the author at the meeting of the Presidium of the Russian Academy of Sciences (RAS) on January 15, 2019.

Keywords: space threats, space debris, space weather, asteroid-comet hazard, parrying space threats.