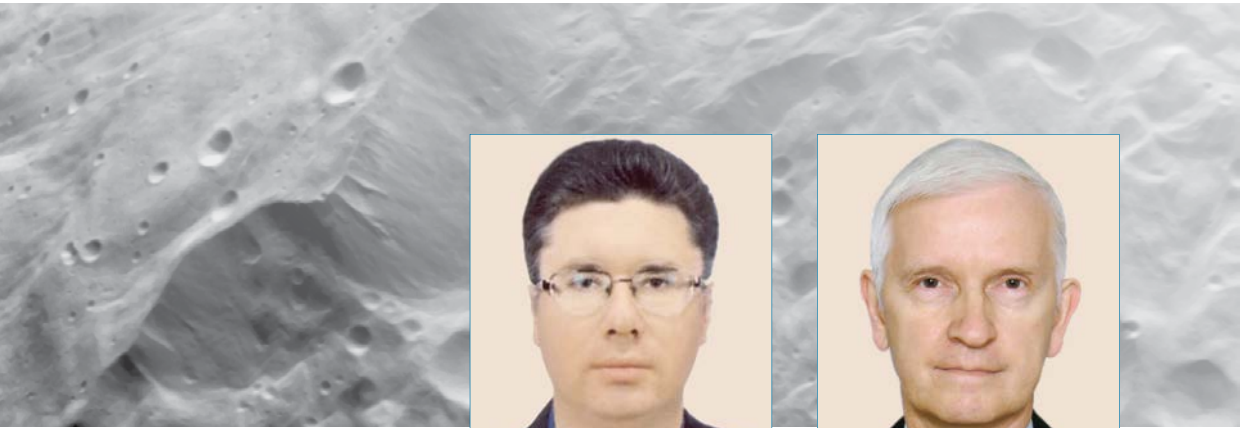


КОСМИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ



С.А. НАРОЕНКОВ,

кандидат физико-математических наук

Б.М. ШУСТОВ,

член-корреспондент РАН

Институт астрономии РАН

DOI: 10.7868/5004439481901002X

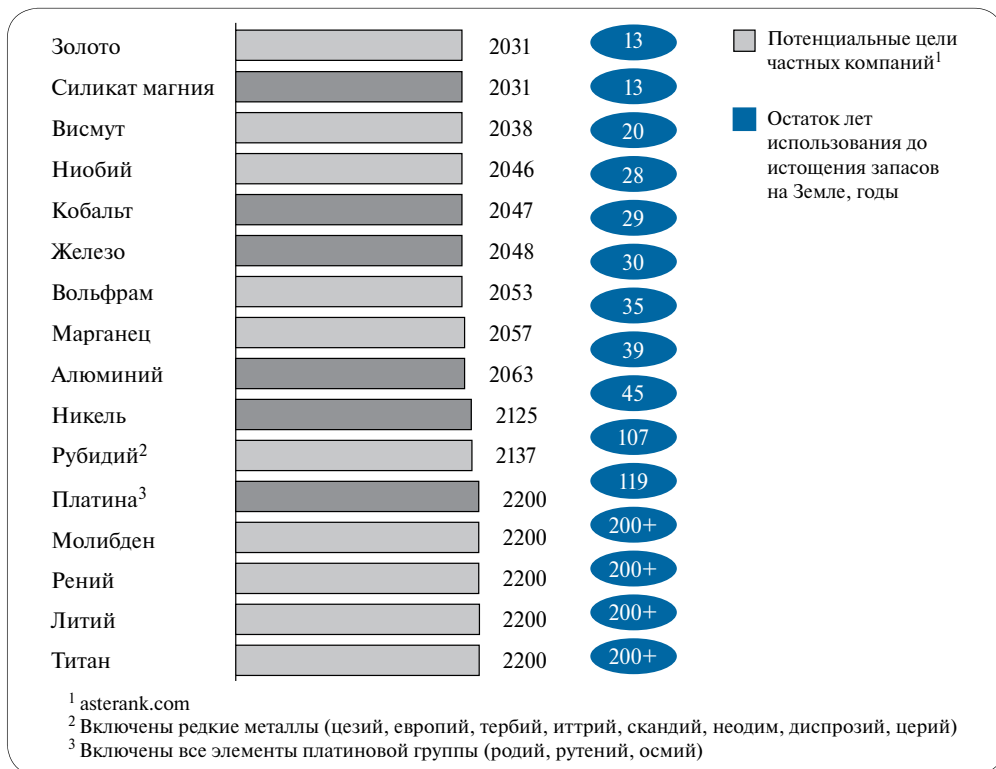
В статье рассматривается проблема добычи полезных ископаемых на астероидах. Колонизация космического пространства человечеством возможна только с использованием ресурсов, добытых в космосе. Среди полезных ископаемых наиболее востребованными для добычи на астероидах являются железо, никель, кобальт, алюминий, редкоземельные металлы и элементы платиновой группы, а также вода. Пока разработка полезных ископаемых на астероидах невозможна, но в недалеком будущем, когда человечество основательно выйдет в космос, космические ресурсы будут востребованы.

ПРОБЛЕМА ИСТОЩЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

Человечество на протяжении своего существования использует полезные ископаемые, которые предоставлены нам природой. По мере развития человечеству требуется все больше ресурсов, за их обладание происходят большинство

конфликтов и даже войн. Ресурсы – это, прежде всего, энергоносители – нефть, газ, кроме того, повышенным спросом также пользуются редкоземельные металлы.

В последние десятилетия спрос на редкоземельные металлы имеет устойчивую тенденцию к росту, объемы рынка за последние 50 лет увеличились с 5 до 125 тыс. тонн в год. Это объясняется



Срок потенциального истощения полезных ископаемых на Земле. Данные взяты из отчетов Геологической службы США, 2012–2016 гг.

применением редкоземельных металлов в быстроразвивающихся областях промышленности, связанных с производством гибридных автомобилей, оборонной техники, компьютерной и телевизионной техники, лазеров, сверхпроводников и прочей наукоемкой продукции (производство магнитов – 22%; высококачественная оптика и стекло – 15%; катализаторы – 18%; конструкционные материалы – 19%; прочее – 26%). Сплавы с редкоземельными металлами широко используются в военно-промышленной и авиационно-космической отраслях и поэтому считаются стратегическим сырьем. Любое технически сложное изделие или электронный прибор содержит в себе миллиграммы редкоземельных металлов: никеля, лития, платины или золота. Но поскольку электронные

приборы производятся в массовом масштабе, то, по некоторым оценкам, на Земле осталось платины на 30–1000 лет. Нижняя граница уже настораживает и почти сравнима с аналогичными оценками запасов нефти.

Истощение важных ресурсов на Земле и перспективы колонизации ближнего космоса заставляют обратить внимание на аспекты добычи полезных ископаемых на астероидах и на Луне.

АСТЕРОИДЫ И ЛУНА – ИСТОЧНИКИ РЕСУРСОВ

Астероиды и кометы – это остатки строительного материала, из которого состоит наша Солнечная система. Рано или поздно небольшие астероиды

сталкиваются с планетами, например с Землей, выпадают на планету в виде метеоритов, и тогда появляется возможность исследовать химический состав метеорита и сравнить его с образцами земных пород. Оказывается, что определенных элементов, например чистых металлов, в астероидах в процентном соотношении больше, чем в земной коре (табл. 1). Поэтому вполне закономерно встают вопросы о добыче полезных ископаемых в космосе. Например, металлические астероиды содержат золото и платину в соотношении 0,01% к своей массе. Элементы группы платиноидов (благородные металлы: платина, золото, серебро, рутений, родий, палладий, осмий, рублидий) настолько ценны для нас, например, в качестве промышленных катализаторов, что их в будущем может стать выгоднее “импортировать” из космоса. При современных ценах на редкоземельные элементы один небольшой астероид диаметром 200 м и массой 32 млн тонн может стоить многие сотни миллиардов долларов. Важно,

что многие астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ), достижимы с современными средствами космической техники. К тому же на астероидах сила гравитации невелика, что позволяет легче транспортировать с них добытые материалы.

Кроме астероидов для добычи полезных ископаемых интерес представляет Луна. Исследование лунного реголита показало присутствие в нем железа, титана, алюминия, магния, серы, калия и натрия, редкоземельных элементов (скандий, иттрий, лантан и лантаноиды). В реголите также обнаружен изотоп гелий-3, который может использоваться как топливо в термоядерных реакторах. По данным планетолога доктора физико-математических наук В.В. Шевченко (ГАИШ МГУ), в лунном кратере Флемстид-Р содержание изотопа гелия-3 оценивается в 13×10^{-9} г на грамм реголита. При переработке реголита на площади 1 км² и в глубину 3 м возможно получение 70 кг изотопа, что достаточно для получения 7 МВт энергии (ЗиВ, 2014, № 2).

Таблица 1

Химический состав земной и лунной коры, метеоритов (в весовых %)

Элемент	Земная кора	Лунная кора	Метеориты (в среднем)
О – кислород	46,6	42,0	33,0
Si – кремний	27,7	21,0	17,0
Al – алюминий	8,13	4,8	1,1
Fe – железо	5,00	13,0	28,6
Mg – магний	2,09	4,8	13,8
Ca – кальций	3,63	6,8	1,39
Na – натрий	2,83	0,44	0,68
K – калий	2,59	0,17	0,10
Ti – титан	0,44	6,0	0,08
Ni – никель	0,006	0,02	1,68
Pt – платина	$0,2 \times 10^{-4}$	–	63×10^{-4}

На Луне также обнаружены определенные запасы воды в виде льда, доставленного туда кометами, а также метеориты, в частности металлические. Так как на нашем спутнике нет атмосферы, найти такие тела в ударных кратерах намного проще, чем на Земле.

Кометы в космическом пространстве представляют интерес как источники воды и газов, находящихся в твердом состоянии (льды). Ядро кометы представляет собой ледяной ком с вкраплениями твердых частиц (ЗиВ, 2017, № 6). Сырье от переработки комет могло бы стать основным источником воды и топлива для долговременных экспедиций в космосе. Но основная проблема в использовании комет состоит в том, что скорости движения комет по своим орбитам составляют 20–30 км/с, а некоторые кометы движутся со скоростью до 72 км/с, поэтому подавляющее большинство комет труднодостижимо.

ИЗ ЧЕГО СОСТОЯТ АСТЕРОИДЫ

Космические объекты, которые можно рассматривать в качестве источника ресурсов, – астероиды Главного пояса и астероиды, сближающиеся с Землей. Все астероиды можно разделить на три широких класса по степени дифференциации вещества:

- примитивное вещество протопланетного диска;
- вещество, претерпевшее нагрев до нескольких сотен градусов и претерпевшее некоторое изменение;
- дифференцированное вещество, подвергшееся полному или частичному

плавлению, которое привело к разделению его на фракции.

В структуре Главного пояса астероидов (ГПА) четко прослеживается следующая закономерность: астероиды, образованные примитивным веществом, располагаются на окраине ГПА, а наиболее дифференцированное вещество располагается ближе к Солнцу, во внутренней области Главного пояса.

Подавляющее большинство астероидов ГПА разделяются на три главных класса:

- астероиды класса С (углеродные астероиды) составляют примерно 75% популяции астероидов ГПА, по составу близки к углистым хондритным метеоритам;

- астероиды класса S (силикатные астероиды) составляют 15% популяции, состоят из силика-

тов Fe, Mg, отсутствуют углеродные соединения;

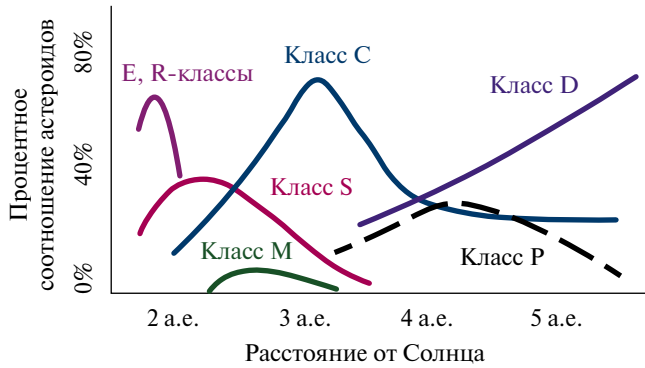
- астероиды класса M (X) (железные астероиды) составляют 10% популяции, богаты Fe и Ni.

Каждый класс можно разделить на несколько подклассов в зависимости от спектральных характеристик астероидов.

Состав астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), отличается от астероидов Главного пояса. Среди АСЗ преобладают астероиды с наиболее дифференцированным веществом. Это отличие от ГПА объясняется механизмом их миграции в околоземное пространство, куда чаще попадают тела из внутренней области Главного пояса астероидов. Среди околоземных астероидов, по проведенным исследованиям, в основном присутствуют силикатные астероиды, обыкновенные хондриты и железные астероиды (с высоким

Ядро кометы представляет собой ледяной ком с вкраплениями твердых частиц. Сырье от переработки комет могло бы стать основным источником воды и топлива для долговременных экспедиций в космосе

Распределение астероидов по составу, в зависимости от расстояния до Солнца. Выделяются основные классы С и S. Классы E, R, M относятся к классу M (X), P и D – С. По данным Gradie & Tedesco, 1982.



содержанием металлов). Общее количество АСЗ размером от 30 м и более оценивается в 800 тыс., состав определен только для примерно 1000 объектов, к тому же нам известен только состав поверхностного слоя. Среди исследованных АСЗ определено, что астероиды S-класса составляют 40% изученной популяции, С-класс – 30%, астероиды М-класса с высоким содержанием металлов – 11%.

Типичным представителем металлических астероидов М-класса является астероид Психея (16) диаметром 186 км, находящийся в ГПА. Исследования показали, что данный астероид содержит в себе большое количество железа и никеля. Среди околоземных астероидов к металлическим астероидам относится астероид (6178) 1986 DA группы Амура размером 2,3 км.

Как мы узнаем, из чего состоит астероид? В настоящее время основным методом исследования астероидов считается фотометрия и спектроскопия – изучение оптических свойств поверхности астероида в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра. Фотометрия позволяет провести исследование света, отраженного от поверхности в различных фильтрах, и таким образом определить альbedo и показатели цвета астероида. Спектральные наблюдения позволяют разложить

свет, отраженный от астероида, на составляющие и построить спектральную кривую отраженного излучения и соответственно поглощенного, поскольку на астероид падает излучение Солнца, спектр которого известен, и таким образом определить состав внешних слоев астероида. По этим данным астероиды обычно классифицируют, то есть относят к одному из типов, в зависимости от спектрального состава (таксономический класс).

В Институте астрономии РАН на протяжении многих лет идет работа по определению спектральных классов астероидов ГПА и АСЗ. Учеными всего мира получено более 3000 спектров астероидов АСЗ и ГПА. Сравнивая лабораторные спектры земных пород и метеоритов со спектрами астероидов, можно сделать выводы о происхождении метеоритов.

ЦЕННОСТЬ АСТЕРОИДОВ

В связи с истощением запасов на Земле добыча нужных нам материалов в космосе может стать актуальной уже в этом столетии. Среди полезных ископаемых наиболее востребованными и выгодными для добычи на астероидах являются железо, никель, кобальт, алюминий, редкоземельные металлы



Астероид Психея в представлении художника.
Рисунок NASA.

и элементы платиновой группы. Уже упоминавшийся астероид Психея – летящая космическая кладовая этих металлов. Масса астероида Психея оценивается в $2,27 \times 10^{19}$ кг, а доля металлов, по оценке Д.Ф. Лупишко, может составлять до 50% от массы астероида. Но даже в небольшом каменном астероиде диаметром около 1 км и массой 2 млрд тонн металлическая фракция достигает примерно 200 млн тонн. Основная ее часть приходится на железо, к малым составляющим относятся никель – 30 млн тонн, кобальт – 1,5 млн тонн и металлы платиновой группы (серебро, золото, платина) – 7500 тонн. Рыночная стоимость только этой самой небольшой части астероида может оказаться более 150 млрд долларов (ЗиВ, 2014, № 2).

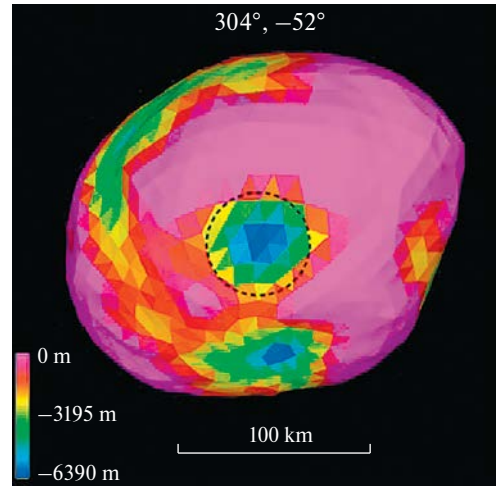
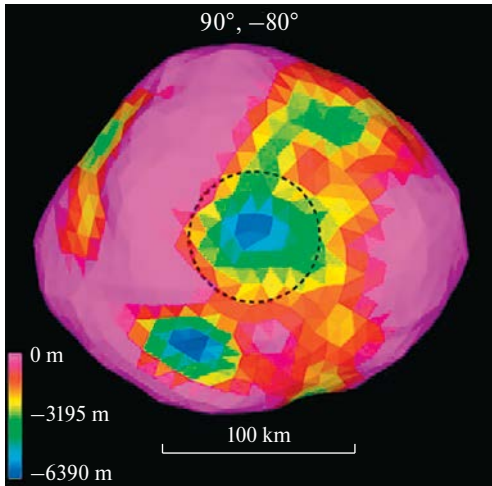
Но не только металлы интересны как объект добычи. Широко распространенное на Земле такое химическое соединение, как вода, может оказаться наиболее важным космическим ресурсом, необходимым не для наземных нужд, а для дальнейшего продвижения

человечества в просторы космоса. Вода в космосе – критически важный ресурс, ее можно использовать для нужд будущих космических поселений. Человеку для жизнедеятельности необходимо очень много воды, поэтому доставка больших объемов воды с Земли представляет нетривиальную задачу в экономическом плане. Выгоднее снабжение водой непосредственно из космоса, так как затраты на транспортировку одного литра воды с одного из астероидов на около-

земную орбиту намного меньше, чем затраты на доставку литра воды с поверхности Земли на эту же орбиту. Стоимость доставки, например, с помощью РН “Протон-М” на низкую околоземную орбиту 1 кг груза начинается с 2800 долларов и более. Кислород и водород из воды можно использовать как компоненты топлива для двигателей космических аппаратов будущего. Хранилища такого топлива можно создавать прямо на орбите астероида.

Одна из первых попыток оценить в денежном выражении ценность астероидов была проведена компанией “Planetary Resources” (США). Данные по приблизительной стоимости некоторых астероидов приведены на сайте компании (<http://asterank.com>). В таблице 2 приведены примеры таких оценок для наиболее перспективных с коммерческой точки зрения АСЗ.

Приведенные в таблице 2 оценки в денежном эквиваленте конечно условны, ограничены и зависят от многих параметров – состава астероида, достижимости этого объекта, стоимости полезных ископаемых на бирже. Объем полезных ископаемых, возможных для



Предположительный рельеф астероида Психея, полученный по радарным наблюдениям. Ровные поверхности обозначены розовым цветом, кратеры и впадины отмечены зеленым и синими цветами. (По данным Shepard et al., 2017).

добычи, оценивался на основе сведений о таксономическом классе и приблизительной массе астероида. Исходя из этих данных определялась потенциальная стоимость. В таблице подобраны “самые выгодные” для добычи металлов астероиды.

Астероид (162173) Рюгу (Ryugu) диаметром 920 м – типичный околоземный астероид из группы Аполлона – это первый кандидат для добычи полезных ископаемых. Рюгу интересен тем, что он выбран в качестве цели для забора грунта с помощью японской АМС “Хаябуса-2” (“Hayabusa-2”), запущенной 3 декабря 2014 г. (ЗиВ, 2015, № 2, с. 15).

В рамках миссии планируется изучение физико-химических свойств астероида и доставка образцов на Землю к 2020 г. Полученные образцы позволят более точно определить состав астероида и его

коммерческую привлекательность для будущих разработок. Прогнозируется, что в составе астероида присутствуют никель, железо, кобальт, вода, азот, водород, аммиак. Наиболее тесное сближение его с Землей ожидается в 2076 г., расстояние до Земли составит 1,5 млн км, скорость – 4,8 км/с. По таксономическому классу он относится к

График спектров астероидов и метеоритов. По данным Clark et al., 2002.

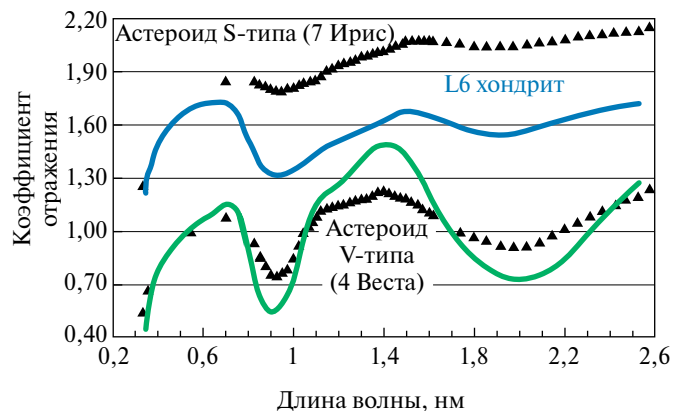


Таблица 2

Приблизительная стоимость некоторых астероидов

Название астероида	Класс	Максимальное расстояние до Солнца, а.е.	Среднее расстояние до Земли, а.е.	Эксцентриситет	Стоимость миссии, млрд долл.	Доход миссии, млрд долл.
Ryugu	Cg	1,19	0,001116	0,19	82,76	30,07
1989 ML	X	1,272	0,082722	0,137	13,94	4,38
Nereus	Xe	1,489	0,003207	0,36	4,71	1,39
Bennu	B	1,126	0,003223	0,204	0,669	0,185
Didymos	Xk	1,645	0,040681	0,384	62,25	16,41
2011 UW158	Xc	1,62	0,001749	0,376	6,69	1,74
Anteros	L	1,431	0,062539	0,256	5570	1250
2001 CC21	L	1,033	0,083068	0,219	147,04	29,77
1992 TC	X	1,566	0,167973	0,292	84,01	16,78
2001 SG10	X	1,449	0,017489	0,424	3,05	0,545

углистым хондритам. Возможно, все перечисленные вещества будут найдены как вкрапления в основное вещество астероида. По оценке компании “Planetary Resources” материалы, составляющие астероид, оцениваются в 83 млрд долларов, с учетом затрат по подлету, переработке выгода оценивается в 30 млрд долларов.

КАК ДОБРАТЬСЯ ДО БОГАТСТВ?

Конечно, полагаться только на дистанционные методы анализа состава астероидов неразумно. Проекты по добыче полезных ископаемых на астероидах весьма дорогостоящие и нужно заранее убедиться, что “игра стоит свеч”. В большинстве проектов будущего освоения астероидов предполагается предварительное исследование объекта добычи с помощью межпланетных станций, то, что называется *in situ*. Для того, чтобы отправить исследователь-

ский аппарат к астероиду, надо знать точные параметры орбиты астероида. Как можно с высокой точностью определить орбиту? Долговременные наземные наблюдения (например, измерения, полученные более чем на двух оборотах астероида вокруг Солнца) позволяют оценить орбиту астероида с точностью лучше 0,5 угловых секунд. Такая точность позволяет спрогнозировать положение астероида на следующем обороте вокруг Солнца с ошибкой не более 1000 км и направить космический аппарат для встречи с астероидом. Но на заключительном этапе перелета необходимо будет воспользоваться системой навигации самой АМС с использованием построенного ее фотокамерами изображения астероида среди звезд.

Реализованные космические миссии: в 1996–2001 гг. АМС “NEAR-Shoemaker” к астероиду Эрос (ЗиВ, 1997, № 4, с. 63–64; 2001, № 5, с. 24–25), в 2003–2010 гг. АМС “Хаябуса”

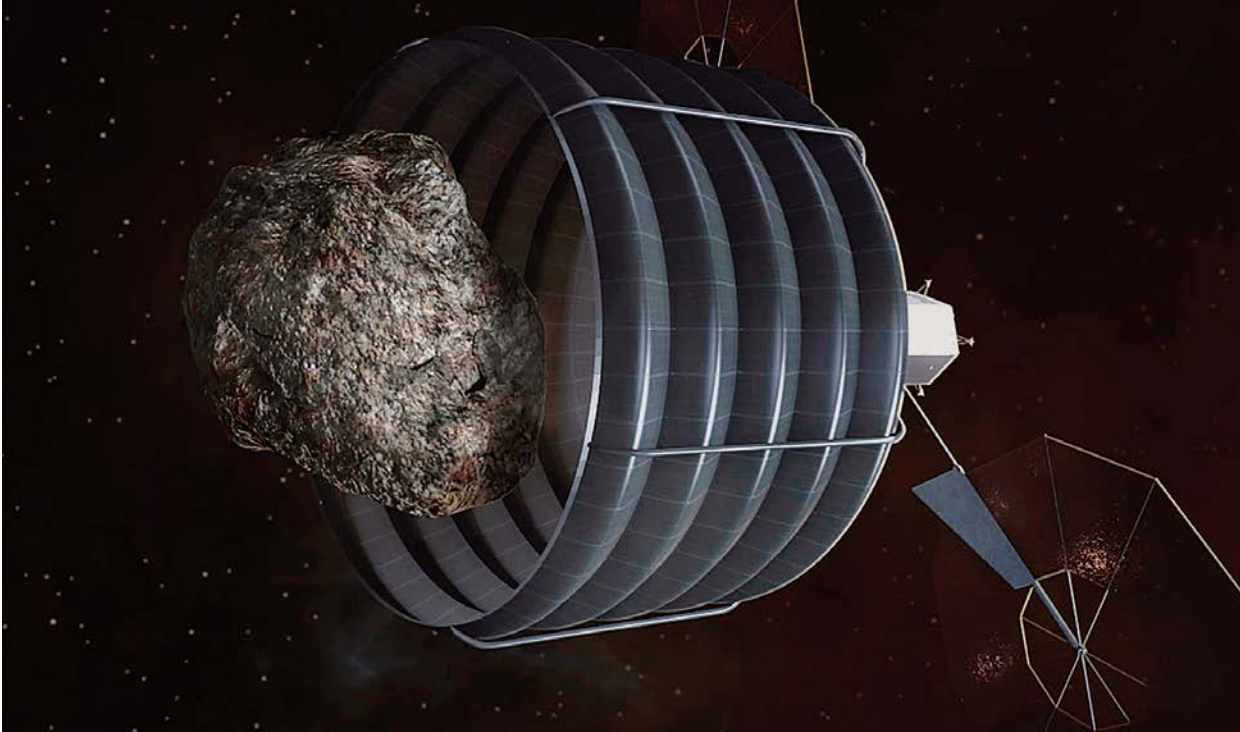
к астероиду (25143) Итокава (ЗиВ, 2004, № 1, с. 29, 33–35; 2010, № 6, с. 49), в 2007–2018 гг. АМС “Доун” (“Down”) к астероидам Веста и Церера (ЗиВ, 2008, № 1, с. 96–97; 2012, № 1, с. 35–37; 2015, № 4, с. 102; 2017, № 1, с. 96–98; 2017, № 4, с. 54), в 2004–2016 гг. АМС “Розетта” (“Rosetta”) к комете Чурюмова–Герасименко (ЗиВ, 2004, № 4, с. 47–50; 2015, № 4; 2016, № 1, с. 109–110; 2017, № 1, с. 36–37), показали техническую осуществимость посещения астероидов космическим аппаратом-роботом. Основной проблемой при полете к астероиду является большое расстояние до астероида. Каждая миссия к астероиду на сегодняшний день уникальна. Чтобы наладить добычу полезных ископаемых с минимальными затратами времени на перелет к астероиду, надо прежде всего рассматривать астероиды, которые приближаются к Земле

на близкое расстояние. На сайте NASA в разделе “Доступные астероиды” приводится таблица достижимости приблизительно 2000 астероидов, сближающихся с Землей (<https://cneos.jpl.nasa.gov/nhats/>).

Сегодня ракетно-космическая техника не позволяет массово осуществлять прямые перелеты к астероидам из-за огромного объема топлива, необходимого для перелета. Чем больше топлива требуется аппарату для перелета, тем меньше полезной нагрузки можно будет взять с собой. Перелеты с использованием гравитационных маневров и ионных двигателей позволяют уменьшить расход топлива, но требуют большего времени осуществления миссии. К примеру, длительность перелета АМС “Хаябуса-2” к астероиду Рюгу с использованием гравитационного маневра около Земли и ионных

АМС “Хаябуса-2” (Япония) около астероида Рюгу. Рисунок Акихиро Икешита, JAXA.





АМС "ARM" захватывает небольшой астероид, в представлении художника.
Рисунок с сайта NASA.

двигателей составит 3,5 года (сближение станции с астероидом в июле 2018 г., старт с астероида – в декабре 2019 г.). Ионные двигатели могут работать довольно долго, но они являются маломощными. Они могут дать небольшое приращение скорости космического аппарата, но требуют намного меньше расходного материала (это не топливо, а рабочее тело, то есть вещество, частицы которого выбрасываются в космос для обеспечения реактивного эффекта). В качестве рабочего тела обычно используют инертный газ. Например, если обеспечить космическому аппарату скорость отлета с опорной околоземной орбиты 3,5 км/с, то он сможет долететь до астероида Рюгу за 217 сут.

Помимо добычи материалов на астероидах и их транспортировки на Землю еще одной идеей, над которой бьются ученые и инженеры, стали захват и перемещение астероидов поближе

к Земле с помощью космических аппаратов.

Примером проекта по захвату астероида может служить американский проект "ARM" (Asteroid Retrieval Mission – программа доставки астероидов). В рамках проекта предлагается сближение межпланетной станции с небольшим астероидом, захват его фрагмента с поверхности и размещение его внутри АМС, перевод его на новую орбиту, например, вблизи Луны.

Для такой миссии необходимо выбирать астероиды с небольшой скоростью движения относительно Земли и малым вращением вокруг собственной оси. К тому же космический аппарат должен обладать значительной тягой, чтобы изменить орбиту астероида. Задачи полета АМС "ARM", на первый взгляд, представляются фантастическими, но, возможно, в будущем такие миссии станут обыденными.

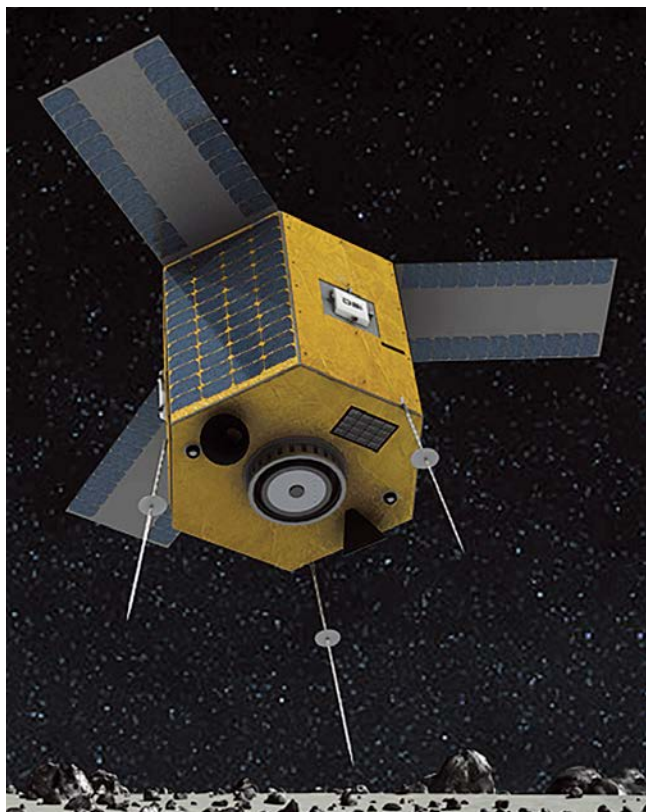
КОСМИЧЕСКАЯ ГОНКА ЗА РЕСУРСАМИ НАЧАЛАСЬ?

Сейчас мы становимся свидетелями того, как зарождается новая отрасль промышленности – разведка, добыча и переработка полезных ископаемых на астероидах. Заинтересованные стороны предпринимают попытки изменить национальные законодательства и международные законы о космосе, чтобы присвоить себе первоочередное право добычи полезных ископаемых в космосе. В конгрессе США, в нарушение международного договора о космосе (“Договор о принципах деятельности государств по исследованию и использованию космического пространства, включая Луну и другие небесные тела”) 1967 г., в 2015 г. был принят законопроект “Об исследовании и использовании ресурсов космоса”, разрешающий частным компаниям добывать полезные ископаемые на астероидах. “Любые астероидные ресурсы, полученные в открытом космосе, являются

собственностью лица, получившего такие ресурсы, вместе со всеми причитающимися правами, предусмотренными положениями Федерального закона и существующими международными обязательствами”, – гласит законопроект. По данным интернета (Wikipedia.org), уже девять компаний в мире провозгласили своей бизнес-идеей освоение космических ресурсов. Гонка, получившая в США название “новой золотой лихорадки”, уже началась, только сейчас это гонка за межпланетными ресурсами. Дальше всех в этих вопросах продвинулись компании “Planetary Resources” и “Deep Space Industries”. Две компании сейчас заняты определением наиболее ценных астероидов и закреплением за ними права на разработку этих ресурсов. В январе 2018 г. “Planetary Resources” запустила со стартовой площадки Космического центра им. Сатиша Дхавана (Шрихарикота) индийской Организации космических исследований (ISRO) с помощью РН “PSLV” ИСЗ “Arkyd-6” класса 6U CubeSat (размер 10 × 20 × 34 см,

*Микроспутник “Arkyd-6” компании “Planetary Resources” на околоземной орбите.
Рисунок с сайта PlanetaryResources.com.*





Аппарат-разведчик серии "Prospector" компании "Deep Space Industries" для определения состава астероидов. Рисунок с сайта Deepspaceindustries.com.

масса до 8 кг) для отработки технологий исследования физико-химических характеристик астероидов.

На микроспутнике установлен инфракрасный блок формирования изображений (mid-wave infrared, MWIR), который работает в диапазоне от 3 до 5 мкм, он снабжен сложной и мощной оптической системой, которая позволяет обнаруживать наличие молекул воды с большого расстояния. "Arkyd-6" с помощью инструмента MWIR начнет производить съемку некоторых участков поверхности Земли. Это будут делать для поиска еще не открытых залежей полезных ископаемых, и этими данными смогут воспользоваться

предприятия горнодобывающей промышленности.

Компания "Deep Space Industries" планирует использовать малые космические аппараты-разведчики серии "Prospector" для определения состава астероидов.

Предполагается, что они будут полностью роботизированными. Конечно, сейчас технологии не позволяют сразу начать добычу полезных ископаемых на астероидах, но в ближайшем будущем, лет через 50–100, такое вполне осуществимо. Возможно, в будущем появятся биржи астероидов, где частные компании станут предлагать к продаже астероиды.

Добыча полезных ископаемых на астероидах представляется более отдаленной перспективой, нежели на Луне. Наш естественный спутник обладает большими запасами по-

лезных ресурсов, которые могут быть использованы как в космосе, так и на его поверхности. Создание поселений на Луне потребует огромного количества строительных материалов, воды и технических средств. Реголит Луны богат гелием-3, который предполагается использовать как источник энергии. Вода, полученная на Луне, будет намного дешевле той, которую можно привезти с Земли. Металлы, содержащиеся в метеоритах, упавших на Луну, можно переработать на месте и использовать для создания лунной и околоземной космической инфраструктуры. Возможно, в будущем на Луне будет создана площадка для мягкого "прилунения" астероидов.

Подводя итог, следует сказать, что освоение космического пространства и использования ресурсов околоземных астероидов и Луны является актуальной и интересной задачей. Опыт проведенных программ посещения межпланетными станциями космических тел с целью исследования состава показывает, что такие полеты возможны,

но сейчас они сложны в техническом плане и слишком дорогостоящие. Организация полетов космических аппаратов с целью разведки полезных ископаемых пока затруднительна. Но хочется надеяться, что в недалеком будущем человечество основательно выйдет в космос и тогда космические ресурсы пригодятся человеку.