УДК 629.78 | DOI: 10.30981/2587-7992-2019-98-1-76-81

INDUSTRIAL MINING OF WATER ICE IN SPACE

ABSTRACT I Water is one of the most necessary resources in space. In the Solar System water ice is abundant in comet nuclei, in the Kuiper Belt bodies and in giant planets' icy satellites. Thousands of comet fragments (mini-comets) consisting no less than 60% of water ice fly near Earth space every year. For water mining in space such mini-comets can be intercepted in the near-Earth space and for the following transfer to the point of use. It's expedient to exert a mini-comet motion control with the use of solar energy and substances of mini-comets themselves.

Keywords: *mining of water in space, interception of mini-comets in near-Earth space, interorbital transportation of space bodies*

Alexander V. BAGROV,
Dr. Sci (Physics and Mathematics),
leading research scientist,
the Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia,
leonov@inasan.ru

Vladislav A. LEONOV,
Cand. Sci (Physics and Mathematics), research scientist,
the Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia,
leonov@inasan.ru

Mikhail I. KISLITSKY,
Cand. Sci. (Tech), research scientist,
Polytechnic University,
Saint-Petersburg, Russia,
mksl21@mail.ru

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЗАГОТОВКА ВОДЯНОГО ЛЬДА В КОСМОСЕ

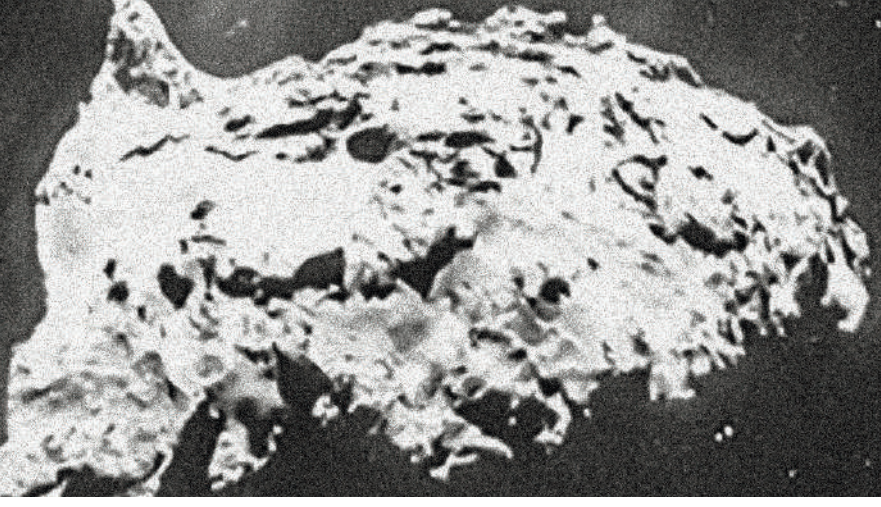
Александр Викторович БАГРОВ,
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института астрономии РАН, Москва, Россия,
leonov@inasan.ru

Владислав Александрович ЛЕОНОВ,
кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института астрономии РАН, Москва, Россия,
leonov@inasan.ru

Михаил Иванович КИСЛИЦКИЙ,
кандидат технических наук, научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия,
mksl21@mail.ru

АННОТАЦИЯ | Одним из самых востребованных ресурсов космоса является вода. В Солнечной системе вода находится в большом количестве в виде льда в кометных ядрах, в телах пояса Койпера и в ледяных спутниках планет-гигантов. Ежегодно мимо Земли пролетают тысячи кометных фрагментов (мини-комет), не менее чем на 60% состоящих из водяного льда. Для того чтобы его добыть, мини-комету можно перехватить в околоземном пространстве и перевести в точку использования. Управление движением мини-кометы целесообразно осуществлять с использованием солнечной энергии и вещества самой мини-кометы.

Ключевые слова: *добыча воды в космосе, перехват мини-комет в околоземном пространстве, межорбитальная транспортировка космических тел*



Один из самых востребованных ресурсов космоса – вода. Она может стать сырьем для получения водорода и кислорода для перспективных реактивных двигателей. Существующим орбитальным и будущим обитаемым станциям на Луне потребуется стабильное снабжение водой. Кроме того, вода – именно тот ресурс, который необходим непосредственно в космосе; она доставляется на пилотируемые аппараты с Земли и никогда не будет импортным материалом для Земли.

В наибольшей степени проблема снабжения водой затрагивает интересы будущих обитаемых станций на Луне. Если не будет найден источник воды непосредственно в космосе, то вопрос обеспечения жизненных потребностей на обитаемой лунной станции придется решать за счет дорогостоящей доставки с Земли.

На добычу воды в вечно затененных областях лунных кратеров возлагают большие надежды, так как есть основания предполагать, что там могут сохраняться значительные запасы водяного льда, принесенного из космоса [1, 2]. Температура поверхности Луны в тех местах, которые никогда не нагреваются солнечными лучами, составляет менее –180 °С. При такой температуре вода может находиться только в фазе льда, причем даже в условиях вакуума она не может сублимировать [3]. Если предположения верны, то лунный грунт в вечно затененных областях может быть замороженной смесью воды и реголита. Стремление ведущих космических держав проводить научные исследования на Луне именно в приполярных районах в значительной степени определяется надеждой решить проблему воды для лунных поселений.

Обычный водяной лед при очень низких температурах переходит в форму I_c. В этой форме атомы кислорода и водорода располагаются подобно атомам углерода в кристалле алмаза, из-за чего криогенный лед приобретает прочность, сопоставимую с прочностью стали.

Однако нельзя забывать о физических свойствах водяного льда при криогенных температурах. При очень низких температурах обычный водяной лед переходит в форму I_c, в которой атомы кислорода и водорода располагаются подобно атомам углерода в кристалле алмаза. Из-за этого криогенный лед приобретает прочность, сопоставимую с прочностью стали, что делает его крайне сложным материалом для механической добычи из монолитных залежей. Трудно предположить, что на Луне лед окажется сконцентрированным в слабо связанных между собой глыбах, которые удастся отделять друг от друга и доставлять на переработку без затрат энергии и инструмента на их разрушение. Поэтому, как нам представляется, добыча водяного льда из лунных залежей едва ли будет целесообразной.

В космосе вода в виде льда находится в большом количестве в кометных ядрах, в телах пояса Койпера и в ледяных спутниках планет-гигантов [4]. Однако доставка льда в окрестности Земли из внешних областей Солнечной системы является сложной задачей, которую в ближайшие десятилетия трудно осуществить.

Ядра комет, теряя под действием солнечной радиации летучие, могут сохранить на своей поверхности пылевые частицы. Пористая пылевая кора – отличный теплоизолятор: под ее защитой кометное ядро может существовать миллиарды лет.

Вместе с тем известно немало короткопериодических комет, которые находятся на орбитах с размером малой полуоси в 1 а. е. и даже меньше [5]. Хотя сами кометы интенсивно испаряются вблизи Солнца и время их жизни составляет несколько тысяч витков, их ядра, теряя под действием солнечной радиации летучие, могут сохранить на своей поверхности пылевые частицы. Пористая пылевая кора – отличный теплоизолятор: достаточно укрыть ледяное тело полуметровым слоем пыли, и тогда, даже если внешние слои нагреются до 600 К, под этим тонким слоем температура льдов сохранится на уровне 100 К. Под защитой пылевой коры кометное ядро может существовать миллиарды лет. Только если пылевая кора будет разрушена, например, метеоритным ударом, ядро кометы станет терять летучие и начнет проявлять кометные свойства, то есть образовывать кому и хвост из испарившегося материала.

Многие из тех комет, орбиты которых пересекают орбиту Земли, после своего распада оставляют на ней рои метеорного вещества и более крупные фрагменты. Все они имеют размеры, не позволяющие заметить их в телескопы, зато при сгорании метеорных частиц в земной атмосфере они хорошо видны, и по ним несложно вычислить

параметры орбит, по которым эти частицы движутся. Это позволяет обнаруживать самые крупные кометные фрагменты еще в космосе [6].

Известно, что через околоземное космическое пространство в пределах сферы Хилла (до 1,5 млн км от Земли) ежегодно проходит несколько тысяч небольших тел декаметрового размера, большая часть которых является мини-кометами [5]. С целью добычи водяного льда такую мини-комету можно перехватить в околоземном пространстве [7]. Если на нее доставить газовый реактивный двигатель [8], то, используя концентрированное солнечное излучение в качестве источника энергии и вещество кометы в качестве рабочего тела, можно изменить начальную траекторию движения мини-кометы и доставить ее в «точку утилизации», например на околоземную или окололунную орбиту.

С учетом того, что мини-кометы находятся на гелиоцентрических орбитах, выход в точку утилизации может занять время нескольких витков мини-кометы вокруг Солнца. За это время все ее вещество можно разделить на чистые фракции.

Вне зависимости от химического состава кометного ядра его вещество может быть полностью переработано во время движения мини-кометы по гелиоцентрической орбите до момента следующей ее встречи с Землей. С помощью солнечного зеркала-концентратора вещество кометы следует испарить, а пары конденсировать на холодильной панели.

В условиях вакуума парциальное давление паров ничтожно и селекция вещества по температурному параметру конденсации малоэффективна. Для качественного разделения летучих на фракции будет необходимо использовать герметичные камеры, загружаемые кометным веществом, в которых конденсация паров будет идти под давлением и при контролируемой температуре, что позволит гарантировать химическую чистоту разделяемых компонентов. Подобная камера, внутрь которой можно заводить перехватываемый объект, разрабатывалась NASA для Asteroid Redirect Mission (ARM) [9]. Собранный по отдельности водяной, углекислотный, метановый и другой лед можно формовать в виде ледяных блоков и складировать раздельно вдали от солнечных лучей. Равновесная температура в солнечной тени близка к абсолютному нулю, и складированный лед не будет сублимировать без притока тепла. Возгонка и перегонка летучих не требует ме-

Рис. 1. Схематическое устройство газового реактивного двигателя на ядре мини-кометы

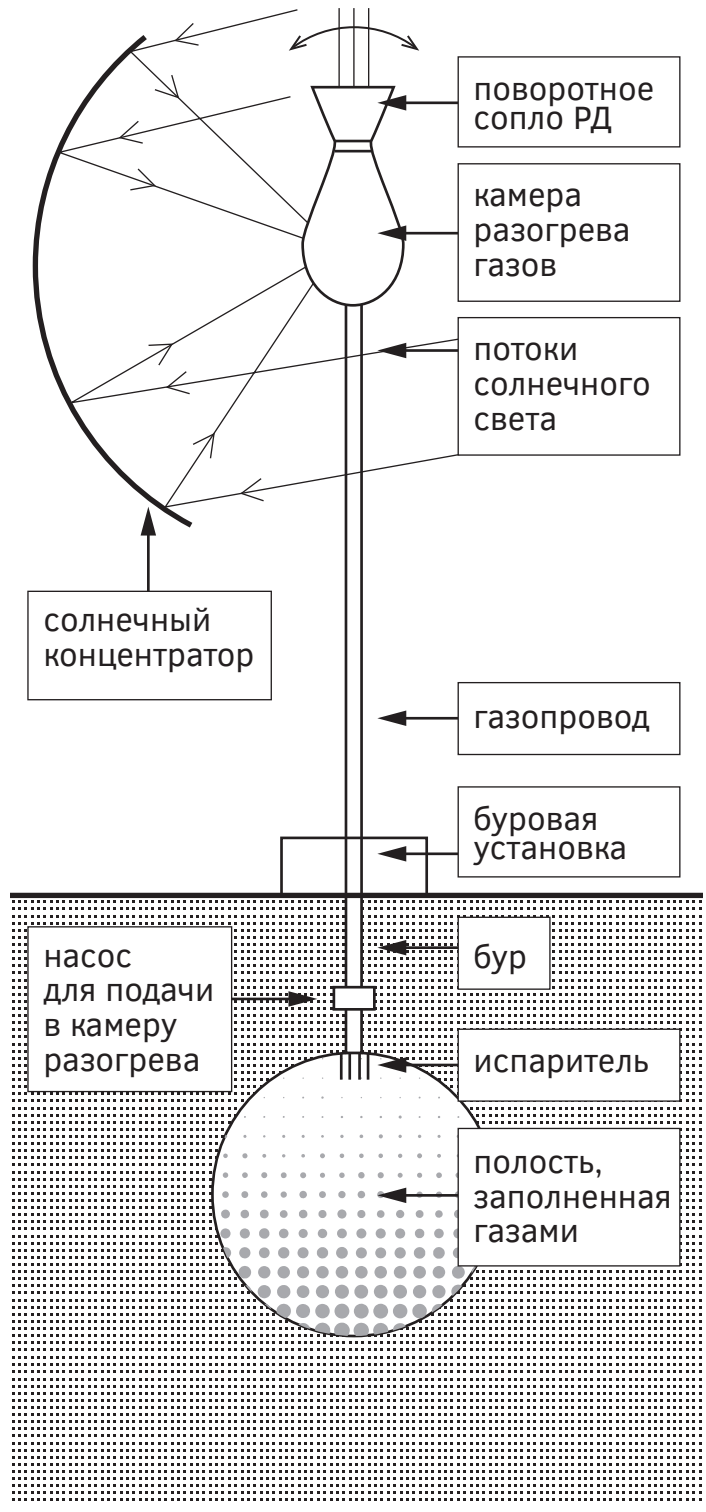
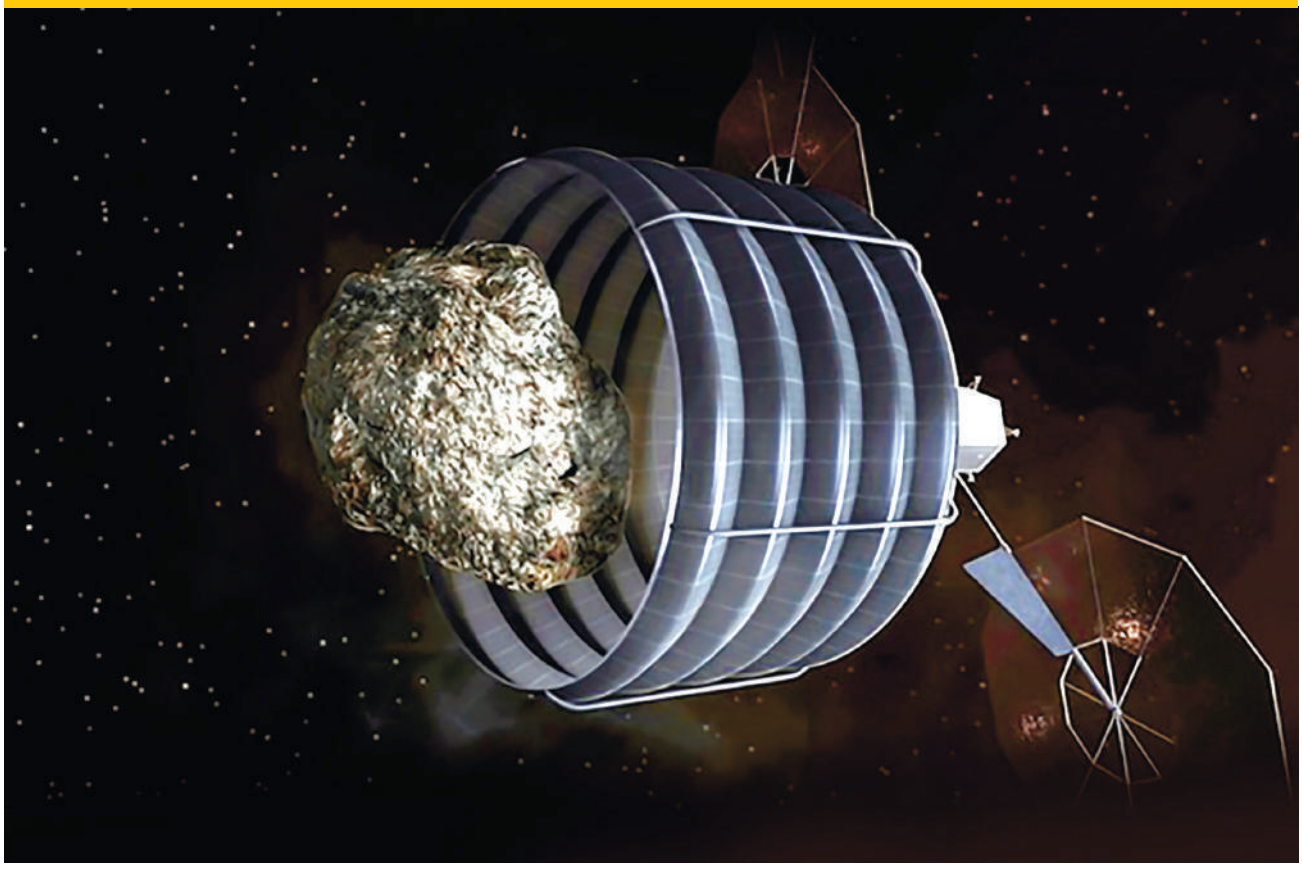


Рис. 2. Герметический мешок для сохранения летучих во время ректификации



ханической переработки и может быть осуществлена тепловой машиной с транспортировкой газообразных продуктов по трубам.

Отходы переработки вещества могут быть использованы для двигателей на мини-комете. Эти двигатели обеспечат ее перевод с существующей гелиоцентрической орбиты на околоземную орбиту консервации.

Наличие в околоземном пространстве запасов химически чистого водяного льда способно изменить технику космических полетов в околоземном пространстве: она может перейти на позиции «зеленой космонавтики».

Большинство мини-комет в окрестностях Земли имеет гелиоцентрическую скорость 10–30 км/с, то есть периоды их обращения вокруг Солнца составляют несколько лет. За время возвращения к земной орбите полную переработку вещества мини-кометы можно обеспечить минимальными средствами, то есть производительность солнечно-перегонной техники может быть подобрана в зависимости от периода обращения мини-кометы, ее массы и затрат ее вещества на проведение орбитального маневрирования. Возможно, из соображений экономии рабочего тела целесообразно использовать в качестве маршевого двигателя не газовый реактивный, а более эффективный ионный двигатель. В этом случае время переработки исходного материала и доставки чистых компонентов в окрестности Земли может увеличиться и занять несколько оборотов мини-кометы вокруг Солнца.

Наличие в околоземном пространстве запасов химически чистого водяного льда способно изменить технику космических полетов в околоземном пространстве: она может перейти на позиции «зеленой космонавтики».

Литература

1. **Базилевский А.Т., Абдрахимов А.М., Дорофеева В.А.** Вода и другие летучие на Луне (обзор) // Астрономический вестник. 2012. Т. 46. № 2. С. 99-118.

2. **Митрофанов И.Г., Санин А.Б., Литвак М.Л.** Вода в полярных областях Луны: результаты картографирования нейтронным телескопом ЛЕНД // Доклады Академии наук. 2016. Т. 466. № 6. С. 660-663.

3. Физический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1983.

4. **Маров М.Я.** Космос: от Солнечной системы вглубь Вселенной. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016.

5. **Багров А.В.** Потоки тел декаметровых размеров через околоземное пространство // Метеорит Челябинск — год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции. Челябинск, 2014. С. 82-89.

6. **Муртазов А.К., Багров А.В.** Концептуальный взгляд на проблему астероидно-кометной опасности: обнаружение и противодействие // Материалы IV Всероссийской астрономической конференции «Небо и Земля», Иркутск, 22-24 ноября 2016 г. Иркутск: Оттиск, 2016. С. 43-51.

7. Патент № 2504503 РФ. Способ ударного воздействия на опасные космические объекты и устройство для его осуществления / Багров А.В., Кислицкий М.И.; опубл. 10.09.2013. Бюл. № 25.

8. **Багров А.В., Кислицкий М.И.** Обеспечение космических поселений водой путем перехвата в космосе микрокомет // Материалы III Международной конференции «Метеориты, астероиды, кометы». Челябинск: ТЕТА, 2015. С. 39-42.

9. Asteroid Redirect Mission [Электронный ресурс] // NASA. URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/asteroids/initiative/index.html (Дата обращения: 10.11.2018).

References

1. **Bazilevskiy A.T., Abdrakhimov A.M., Dorofeeva V.A.** Voda i drugie letuchie na Lune (obzor). Astronomicheskiy vestnik, 2012, vol. 46, no. 2, pp. 99-118.

2. **Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Litvak M.L.** Voda v polyarnykh oblastyakh Luny: rezul'taty kartografirovaniya neytronnym teleskopom LEND. Doklady Akademii nauk, 2016, vol. 466, no. 6, pp. 660-663.

3. Fizicheskiy entsiklopedicheskiy slovar'. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1983.

4. **Marov M.Ya.** Kosmos: ot Solnechnoy sistemy vglub' Vselennoy. Moscow: Fizmatlit, 2016.

5. **Bagrov A.V.** Potoki tel dekametrovykh razmerov cherez okolozemnoe prostranstvo. Materialy vserossiiskoy nauchnoy konferentsii “Meteorit Chelyabinsk — god na Zemle”. Chelyabinsk, 2014, pp. 82-89.

6. **Murtazov A.K., Bagrov A.V.** Kontseptual'nyy vzglyad na problemu asteroidno-kometnoy opasnosti: obnaruzhenie i protivodeystvie. Materialy IV vserossiiskoy astronomicheskoy konferentsii “Nebo i Zemlya” (Irkutsk, 22-24 November 2016). Irkutsk: Ottisk, 2016, pp. 43-51.

7. **Bagrov A.V., Kislitskiy M.I.** Sposob udarnogo vozdeystviya na opasnye kosmicheskie ob"ekty i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya. Patent RF no. 2504503 (2013).

8. **Bagrov A.V., Kislitskiy M.I.** Obespechenie kosmicheskikh poseleniy vodoy putem perekhvata v kosmose mikrokomet. Materialy III Mezhdunarodnoy konferentsii “Meteority, asteroidy, komety”. Chelyabinsk: TETA, 2015, pp. 39-42.

9. Asteroid Redirect Mission. Available at: https://www.nasa.gov/mission_pages/asteroids/initiative/index.html (Retrieval date: 10.11.2018).

© Багров А В., Леонов В. А., Кислицкий М. И., 2018

История статьи:
Поступила в редакцию: 23.11.2018
Принята к публикации: 21.12.2018

Модератор: Плетнер К. В.
Конфликт интересов: отсутствует

Для цитирования:
Багров А. В., Леонов В. А., Кислицкий М. И. Промышленная заготовка водяного льда в космосе // Воздушно-космическая сфера. 2019. №1(98). С. 76-81.