Электронный научно-информационный журнал «Вестник Отделения наук о Земле РАН» №1(27)'2009 ISSN 1819 - 6586 URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h dgggms/1-2009/informbul-1 2009/planet-26.pdf

> **ЛУННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ: ВОЗМОЖЕН ЛИ ОПТИМУМ? Танака С.** (Ин-т Космич. Иссл., Япония),

Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. (ИФЗ РАН)

khavole@ifz.ru; тел.: 8-499 252-21-98

Ключевые слова: луна, внутреннее строение, ядро, геохимический и минералогический атласы, астро - космогонический мегадетектор, пылевой выброс

Оптимальная программа изучения Луны должна состоять из направлений: (1) исследование внутреннего строения и ядра;(2) космогонические и астрофизическое исследования с использованием Луны как мегадетектора; (3) создание геолого-геохимического атласа Луны. Предлагается оптимальная Программа, адаптированная к выполнению всех основных задач 1-3, а по стоимости не превышающая любое из направлений +20%-30%. Проработана и экспериментально обеспечена задача 1. Для определения физические границы ядра переходим к методу, аналогичному сейсмотомографии. Для этого с подлетной траектории по диску Луны производят пуск капсул с зарядами ВВ. Момент удара (взрыва) отмечается вспышкой, все зарегистрированные вспышки по координатам привязывают к существующей карте Луны. Используя совокупную информацию: координаты сейсмических источников, моменты взрывов, энергию каждого из них, сейсмические записи волн от взрывов решают задачи внутреннее строение Луны и границ. Этот этап одновременно служит и инструментом геолого-геохимического исследования при использовании орбитальной станции с возвращаемым на Землю блоком. Станция захватывает полевые выбросы грунта при взрывах, а затем блок доставляет их на Землю. Итак, оптимизация приводит к необходимости создания единого подхода к сейсмогеофизическому и геохимическому исследованию Луны. Первый этап использования Луны как мегадетектора обеспечивается уже имеющимися экспедиционными аппаратурно-методическими средствами геофизических исследований, поэтому в информационно-аппаратурном плане следует использовать соответствующую специализированную литературу. Предлагаемая работа во многом носит поисковый характер, поэтому список рекомендуемой литературы дан с «запасом».

Сейсмогеофизическое и геохимическое исследование Луны (СГГХЛ) (общее рассмотрение).

Предварительное замечание. Учитывая современный уровень познания и понимания сейсмичности Луны, казалось бы, любая сейсмическая часть исследований может быть профилирована на одно из двух главных направлений:

1. Исследование внутреннего строения, особенно центральной зоны и/или внутреннего ядра.

2. Космогонические и астрофизическое исследования с использованием Луны как уникального мегадетектора.

Однако такой чисто сейсмический подход – не более чем академическая абстракция, поскольку не отвечает на другие, не менее важные вопросы:

3. Создание геологического атласа Луны с привязкой к уже имеющимся подробным геофизическим и гравиметрическим картам Луны.

4. Создание атласа залежей He₃ с аналогичной привязкой.

Последнее (п.4) особенно актуально из-за проблем энергетики будущего. Несомненно, актуальность каждого их четырех направлений всего комплекса задач не может быть причиной реализации только одного из них, а выполнение исследований по всему комплексу задач нереально по экономическим причинам. Поэтому, одна из основных задач настоящей публикации – создание универсальной единой Программы. Соответственно реализация такой Программы, адаптированной к выполнению всех основных задач (1-4) по стоимости не должна превышать любое из направлений на +20%–30%. То есть, необходим выбор базовой Программы СГГХЛ для комплексного решения основных научно- технических задач на ближайшие 30-50 лет. Наиболее детально проработана и экспериментально обеспечена задача 1 Программы СГГХЛ, и как это будет показано ниже, эта работа содержит принципиальные трудности. Задачи 3, 4 имеют вариант перспективного развития, но незначительно проработаны. Поэтому после анализа задачи 1 Программы необходимо формирование всей Программы СГГХЛ. При этом следует предусмотреть изменение Программы в сторону радикального упрощения (и сокращения расходов).

Задача 1 - сейсмическое исследование Луны. Основная цель предлагаемой задачи - внутреннее строение и ядро Луны.



I. Модель Луны в соответствии с новейшими результатами

Рис.1. Современная модель внутреннего строения Луны



II. Сейсмические поля в рамках общепринятой модели Луны

Рис.2. Идеализированная модель строения Луны: 1, 2 - прямые сейсмические волны от импакта; 3 - отраженные волны от границы мантия - астеносфера; 4 - отраженные волны от границы ядроастеносфера; 5 - прямая волна от приливного лунотрясения (трасса: источник - дневная поверхность); 6 - волна от приливного лунотрясения (трасса: источник - граница астеносфера - ядро); 7 - отраженная волна 6 от границы ядра

Сейсмостанции сети «Аполлон» могли всегда зарегистрировать удар 10 кг метеорита (скорость 30 км/с) на любом расстоянии из любого места падения; частота падения ~3 метеорита в месяц. Это задаёт временные границы существования экспедиции.



III. Сейсмические поля Луны в рамках реальной модели

Рис.3. Лучевой метод для реальной модели Луны: $И_1$, $И_2$ - сейсмические лучи, исходящие от источника И; $U_{1\kappa}$, $U'_{1\kappa}$ - сейсмические лучи, отраженные от реальной границы ядра и от предполагаемой интегральной соответственно; $U_{2\kappa}$, $U'_{2\kappa}$ - то же, что и для случая U_1 ; $\Delta \theta_1^0$, $\Delta \theta_2^0$ - ошибки в оценке направления отраженного сейсмического луча при использовании интегральной модели; для земной сейсмологии - $\Delta \theta^0 \sim \theta^0$, то же и в рамках общепринятой модели Луны (см. рис. 2)

Однако рассмотрение применимости лучевого метода для реальной модели Луны приводит к вероятной (почти неизбежной) ошибке $\Delta\theta$ в десятки градусов (см. рис. 3), что исключает применение классической сейсмологии и объясняет многолетние неудачи в поисках границ ядра. При этом основной проблемой является не организация (излучение) мощного зондирующего удара, а отождествление на сейсмограмме вступлений сейсмических волн, отраженных от границ ядра. Рассмотрим другие сейсмологические методы, близкие к классическим, позволяющие хотя бы приблизиться к выполнению сейсмической части СГГХЛ.

IV. Метод глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ). Успешно применялся в земной сейсмологии для детального исследования границ геосфер. В условиях Луны будет необходимо пройти профиль ~1000 км. Луноход с подобным ресурсом хода, системой установки трехкомпонентных сейсмостанций, система организации мощного источника сейсмических волн не существуют. К тому же даже успешное выполнение ГСЗ Луны дает информацию только для определенного региона Луны, а не для границ всего ядра.

V. Лазерный деформограф (ЛД). Канал регистрации открыт по частоте, поэтому непосредственно регистрация длиннопериодных колебаний Луны дает информацию по ядру, но с присущими ГС Луны недостатками (см. IV). Однако в будущем с усовершенствованием лазерных систем и созданием лунохода со значительным ресурсом хода ЛД станет перспективной системой.

VI. Нелинейная сейсмология, регистрация спектров собственных колебаний Луны в реальном времени. В информационном плане практически решает задачи (1,2), минимальные веса и энергопотребление, максимальные надёжность и простота, дешевизна. Пример. Одна станция, 3-х компонентная регистрация сигнала, один дополнительный нестандартный сейсмоприемник; микропроцессор; малое энергопотребление; ударостойкость (10³g); заглубление

сейсмометра на глубину ~ 0.7–1.0 м; возможно питание на основе термоэлектронного преобразователя. Предполагаемый ресурс работы ~ 10 лет.

Место посадки - возможно любое, наилучшее у границы кратера - температурной аномалии (Северный или Южный полюс Луны). Научный результат - размеры интегрального ядра, т.е. переход к комплексной Программе сейсмического изучения Луны. Но, помимо такого результата, необходимо определить реальные физические границы ядра, что вновь возвращает к лучевому методу. Возникшее противоречие устраняется с переходом на метод исследования, аналогичный сейсмотомографии. При этом методе конфигурация изучаемого объекта (ядра) «просвечивается» сейсмическими волнами со всех направлений (сторон), а компьютерный анализ данных позволяет получить трехмерное изображение. Для реализации сейсмотомографического метода изучения Луны метод нелинейной сейсмологии в инструментальном плане значительно расширяется, но при этом не требует принципиально новых разработок (подробнее см. IX).

VII. Обработка Каталога Накамуры (КН), предполагаемые результаты и планирование лунной программы. Методы эффекты нелинейной сейсмологии, перенесенные на лунную сейсмичность, дали новое прочтение огромного массива данных, принесли массу качественно новой информации, затронувшей многие разделы естествознания. Причем этот источник ещё далеко не иссяк. В будущем Программа неизбежно должна дополняться и корректироваться в соответствии с новыми результатами обработки КН и/или более глубоким их пониманием.

VIII. Другие геофизические методы. Лунный орбитальный спутник, установка магнитометра и гравиметра, совместная регистрация их данных с последующей оценкой корреляции; картирование значимостей корреляций и определение мест неоднородностей могут стать ещё одним подходом внутреннего изучения Луны.

IX. Комплексное сейсмическое изучение Луны. Задачи:

- 1. Регистрация спектра собственных колебаний Луны (СКЛ);
- 2. Исследование сейсмичности Луны;
- 3. Исследование центральной зоны Луны сейсмотомографическим методом;
- 4. Определение температуры во внутренних точках среды; теплового потока;
- 5. Другие попутно решаемые задачи.

Решения: инструменты и методы. 1. Для регистрации СКЛ достаточного 1-го однокомпонентного сейсмоприемника резонансного типа, работающего как узкополосный сейсмометр и широкополосный акселерометр. Огибающая сейсмического сигнала с узкополосного приемника может записываться с частотой 1 отсчет/мин, в режиме акселерометра с частотой 20 1/с и более. Переключение на режим акселерометра может происходить по превышению амплитуды огибающей, например в 10 раз. Заглубление приемников в реголит– 2-3 м. Для обеспечения высокой надежности исследования (> 95%) необходим сброс 2-х сейсмоприемников; однако, при этом у широкой научной общественности, с другой точки зрения, возникает вполне «обоснованный» вопрос: почему 2, а не 3 (3 позволяют применять триангуляционный метод определения координат сейсмического источника).

Другие предполагаемые параметры сейсмометрической системы:

 – число компонентов регистрации - 3 (для записи волн от импульсных и природных сейсмических источников);

вес механической системы сейсмометра - ~ 0.8-1.0 кг;

вес электронного блока (микросхем, выполняющих функцию усилителя, блока выделения огибающей, АЦП, элементарной логики) ~ 0.2 кг;

- вес блока памяти - не менее 0.3 кг;

- характерный размер механической части сейсмоприемника & ~ 6.0-7.0 см.;
- добротность (механических) резонансных систем ~ 1000;
- чувствительность в режиме сейсмометра $\sim 10^{-10}$ 10^{-12} см;
- чувствительность в режиме сейсмоакселерометра $\sim 10^{-8}$ 10^{-10} см/с²;
- разрядность АЦП 16;

- длительность работы в модуляционном режиме на одной компоненте - 7-10 лет;

– длительность работы в режиме сейсмоакселерометра (определяется программной сейсмо-томографического исследования).

– перегрузки при посадке: осевые и боковые ~ 1000 g.

Внешний облик и компоновка космического аппарата. Выполняется как малый скоростной пенетратор с диаметром не более 10 см. и длиной ~ 100см.; ориентировочный вес пенетратора ≥10кг; сейсмический блок и блок электроники располагаются в головной части; далее до хвостовой части - питание (химическое, радиоизотопное, подзаряжаемое от термопар аккумулятора); хвостовая часть с блоком телеметрии - отделяется в процессе пенетрации и остается вблизи дневной поверхности, на которой остаются тормозные двигатели. Двигатели и головная часть могут быть соединены термопарами для зарядки аккумуляторов; сейсмический блок и телеметрия соединены информационным кабелем. В головной части пенетратора, посреди корпуса и всей хвостовой части устанавливаются термодатчики. Посадка 3-х пенетраторов производится в районы Луны с мощным слоем реголита, один из пенетраторов должен быть расположен в районе станций «Аполлон- 1, 2»; все 3 пенетратора - образуют треугольник:

1. После посадки сейсмоприемник регистрирует огибающую сейсмических шумов Луны в полосе приема и по телеметрии передает полученную информацию на Землю, далее методами статистического анализа (например, спектральным) определяют спектр СКЛ;

2. Предполагаемые характеристики сейсмометров позволяют более детально продолжить изучение лунной сейсмичности, начатой по программе «Аполлон», особенно в части исследования сейсмических шумов и микросейсм Луны, а также слабой лунной сейсмичности, т.е. особенности модуляции микросейсм, высокочастотных шумов, сейсмоакустической эмиссии;

3. Регистрация (отождествление) телесейсмических волн, прошедших центральную зону Луны, а также отражений от внутренних границ, в том числе и ядра, - до сих пор не решенная задача; тем самым остаются значительные неопределенности по ядру и веществу центральной зоны. Поскольку информация по спектру СКЛ на основе молуляционного метода дает, в конечном счете, периоды и размеры по интегральной границе ядра, то для решения этой задачи вероятно, перспективен сейсмотомографический полход как по техническим возможностям реализации, так и по опыту земной сейсмологии и сейсморазведки. Схема реализации сейсмотомографического метода (СТМ) исследования Луны представляется в виде следующей последовательности. Предварительно на Луне размещают 2-3 сейсмических станции. Расстояние между станциями $\sim 90^{\circ}$, т.е. они образуют орт с вершиной в центре Луны. Пример расположения: одна станция в приполюсном районе, другая - на экваторе, западнее станции «Аполлон», последняя восток, экватор на расстоянии 90°. Заглубление сейсмометров - 2-3 см. Далее с подлетной траектории по диску Луны производят пуск 15-20 капсул с зарядами ВВ при столкновении равномерно покрывающих диск. Момент удара (взрыва) отмечается вспышкой, все зарегистрированные вспышки по координатам привязывают к существующей карте Луны. Используя совокупную информацию: координаты сейсмических источников, моменты взрывов, энергию каждого из них, сейсмические записи волн от взрывов по определенным программам на ЭВМ выявляют внутреннее строение Луны и скорости телесейсмических волн. Для эффективной регистрации сейсмических волн от взрывов необходимо знать их ТНТ - эквивалент. В соответствии с опытом «Аполлон» 10 кг метеорит (~ 10 кг ТНТ) мог быть записан из любого района Луны. Поскольку чувствительность предполагаемых станций на 10² выше, чем «Аполлон», то резонно снизить предполагаемый вес капсулы до 1 кг. Для надежности эксперимента выброс капсул желательно провести по аналогичной процедуре и на обратную сторону Луны. Качественное улучшение полученной картины внутреннего строения Луны может быть получено заменой капсул на меньшее число компактных автономных сейсмовибраторов;

4. Пункт программы по определению температуры среды и теплового потока Луны выполняется установкой термодатчиков в различных местах на внешней поверхности корпуса пенетратора;

5. Как это показано в других исследованиях, Луна может играть роль чувствительного и астрофизического космогонического и астрофизического детектора для регистрации:

a) ударов микрометеоритов: частоты падения в кратер (~10⁴ км²) для 100 г - 1/год; в масштабах Луны: 100 г - 362/год; 10 кг - 36/год; 100 кг - 3/год;

б) импактов крупных метеоритов на Луне: 300 кг/год ⇒ амплитуда собственных колебаний Луны А _{с.к.л.} ~ 1 см, т.е. регистрации длинных периодов СКЛ;

в) импактов элементов пролетной конструкции аппарата ~ 0.5 т, V=2.5 км/с, $A_{c.к.Л.} \sim 0.1$ см; конструкция снабжена радиомаяком;

г) лунотрясений; вид сейсмограммы \Rightarrow поиск разных механизмов особенностей сейсмичности (добротности);

д) оптических спектров от импактов: сейсмоприемник + ФЭУ; локация места удара, скорость сейсмических волн;

ж) широкого атмосферного ливня (ШАЛ), газопылевых потоков и их модуляции небесными телами и процессами, пульсации солнечного ветра;

6. Предложенная сейсмическая часть Программы решает только проблему внутреннего строения Луны, но вопросы геохимии и геологии Луны остаются открытыми. Требуется адаптация этой части к решению указанных задач.

Х. Геолого-геохимическое комплексное изучение Луны. Во многом базируется на методе исследования поверхности планеты, лишенной атмосферы, с помощью анализа микробов пылевидного выброса (ранее эскизно разработанным К.П.Станюковичем и О.Б.Хаврошкиным и одобренным академиком Б. В. Раушенбахом).

Современные методы исследования планет Солнечной системы разнообразием не отличаются. Большинство исследовательских программ предусматривает посадку станции в определенном районе небесного тела и изучение места посадки с небольшим расширением за счет планетохода. Указанные программы, помимо чрезвычайно высокой стоимости, неэффективны с точки зрения получения информации относительно всей поверхности и подповерхностных структур в целом, а целесообразность посадки аппарата в определенном районе небесного тела диктуется слишком общими соображениями. Возврат проб грунта на Землю даже не обсуждается.

Необходим поиск методов, позволяющих при меньшей стоимости аппаратуры и технического обеспечения, но с более высокой надежностью составить атласы химического и геологического строений поверхности небесного тела, в первую очередь на основе возвращенных на Землю микропроб. Наиболее просто это осуществить в случае планет, лишенных атмосферы или Луны. При этом, как в данном случае, этап сейсмического изучения Луны одновременно служит и для реализации геолого-геохимического исследования. Дл этого необходимо дополнение Программы орбитальной исследовательской станцией (ОИС) с возвращаемым на Землю блоком (ВЗБ) (рис. 4, 5).



Рис.4. Принципиальная схема организации и забора пылевого выброса. 1 - поверхность Луны; 2 - орбитальный аппарат ОИС; 3 - пылевой выброс раздробленного взрывом грунта; 4 - воронка от взрыва капсулы 5; 6 - траектории спуска капсулы 5; 7 - низкая орбитальная траектория ОИС; 8 - коллектор для забора пылевых частиц; 9 - магазин с капсулами; 10 - мощный лазер, спектранализатор



Рис.5. Схема организации пылевого выброса и его изучения лазерными методами. 1-10 - то же, что и на рис. 4. 11 - мощный лазер; 12 - лазерный импульс, воздействующий на стенку воронки 4

ОИС состоит из лазерно-спектрального, командно управляющего, капсульного, заборного и возвращаемого отсеков. ОИС известными методами выводится на круговую орбиту Луны. Высота аппарата относительно поверхности выбирается минимальной и определяется рельефом и гравитационными аномалиями. Затем в окрестности плоскости орбиты производится химический анализ поверхности. Для этого с борта аппарата в определенную точку поверхности посылается мощный лазерный импульс. Полное отсутствие атмосферы и фокусировка луча позволяют сконцентрировать в небольшом пятне всю энергию излучения. После поглощения этой энергии импульса лазерного излучения, равной ~100 Дж, часть грунта испарится и произойдет последующее излучение световой энергии. При высоте полета ОИС, равной 10 км, и площади приема регистрирующего фотоэлемента ~1 м² телесный угол приема излучения равен ~10⁻⁸ ст. Если лучеиспускательная способность E_T равна хотя бы 1 % от энергии импульса, а излучение предположить изотропным по всем направлениям, то принимаемая энергия равна ~10⁻¹¹ Дж. Чувствительность современных фотоумножителей равна ~10-19 Дж, что намного меньше величины энергии падающего на фотоэлемент потока лучистой энергии. Для большей эффективности этого метода лазерный импульс посылается в зону подрыва капсулы (рис. 5). Так, последовательно записывается спектр испарившейся породы не только в плоскости орбиты, но и всего небесного тела в целом путем поворота плоскости орбиты. Зарегистрированные с привязкой по месту спектры анализируются либо бортовой системой, либо сразу передаются на Землю.

Не менее перспективен лазерный метод и в задачах поиска и картирования поверхности Луны на содержание He₃ (рис. 6). Для этого одну из частей капсул (рис. 7) снабжают зарядом BB, содержащим гранулы термита. При подрыве этой части эти горящие гранулы взрывом внедряются в окружающий реголит и прогревают прилегающий к капсуле объем породы до температуры свыше 400°C (рис. 8). В результате He₃ образует облачко над зоной подрыва, которое доступно для изучения лазерными методами (рис. 6).

Полученные данные по химическому составу поверхности позволяют перейти к изучению геологического строения поверхности планеты, что осуществляется методом забора проб грунта и/или возбуждения сейсмического импульса. При этом в функции рассматриваемого метода входит уже не только обеспечение излучения сейсмического импульса, но одновременно использование энергии взрыва для вертикального выброса раздробленного грунта вверх на орбиту ОИС (см. рис. 4). С учетом параметров траектории, характеристик метательного заряда с борта космической лаборатории на поверхность изучаемой планеты доставляется капсула, которая переводится на траекторию встречи с поверхностью планеты с помощью ракетного двигателя или баллистическим методом. Точка встречи с поверхностью планеты рассчитывается на бортовой ЭВМ. В простейшем случае капсула с зарядом взрывчатого вещества должна быть запущена из летательного аппарата так, чтобы двигалась в том же направлении траектории, касающейся поверхности планеты в точке, противоположной точке запуска (т.е. по полуэллипсу). Разность полупериодов космического аппарата и капсулы с зарядом взрывчатого вещества (BB), т.е. время запаздывания рассчитывается по формуле:

$$\Delta t = \frac{\pi}{\sqrt{k}} \left(a_1^{3/2} - a_2^{3/2} \right), \tag{1}$$

где a_1 , a_2 - большие полуоси космического аппарата и космической капсулы; $k = \gamma M$, γ - постоянная тяготения, M - масса планеты.



Рис.6. Схема поиска и картирования He₃

1-11 - то же, что и на рис. 4. 13 - луч лазера, осуществляющий резонансное возбуждение молекул Не₃ в облачке над воронкой 4; 14 - тепловой луч для прогрева поверхности геологической структуры (например, центральной горки кратера) и луч резонансного прогрева-сопровождения 15.



Рис.7. Принципиальная схема капсулы 5 (рис. 4, 5)

16 - часть с ВВ дробления и выброса реголита и горной породы на орбиту аппарата 2; 17 – заглубляемая часть (до 50 м) с ВВ, формирующим сейсмический импульс; 18 - кавитатор.



Рис.8. Принципиальная схема воронки

1-17 - то же, что и на рис. 4, 5, 7. 19 - зона пластической деформации и/или прогрева реголита гранулами термита (случай глубинного взрыва сейсмического просвечивания); 20 - верхняя часть канала пенетрации; 21 - граница прогрева; 22 - тормозные щитки части с зарядом ВВ для выброса реголита на орбиту.

Для Луны:

$$\Delta t = 0.045 \left(a_1^{3/2} - a_2^{3/2} \right)$$

или $\Delta t = 1.41h$,

где *h* – высота в километрах.

Скорость, которая должна быть придана заряду ВВ относительно космического аппарата, равна разности скорости космического аппарата и афелийной скорости космического заряда. (Возможны и другие варианты сброса.) При снижении капсулы она буде длительное время в поле зрения космического аппарата, что может быть использовано для оптического и радиолокационного слежения за космическим зарядом. В случае полета космического заряда над обратной стороной Луны, чтобы место падения и взрыва было на видимой стороне и могло наблюдаться также с Земли. Частицы грунта планеты, выбрасываемые вверх в виде пылевидного выброса при взрыве капсулы, достигают траектории заборного устройства космического аппарата в момент пролета последнего над точкой встречи. Частички тормозятся и захватываются заборным устройством. Поскольку при сбросе капсулы возможны возмущения траектории, снижающие эффективность забора микропроб грунта, то в некоторых случаях более целесообразно капсулы с метательными зарядами расположить заранее на поверхности планеты на заданных глубинах. Более того, если пойти на незначительное усложнение капсул, то их доставку параллельно можно вести по схеме сейсмотомографического просвечивания. Для этого каждая из капсул будет состоять из двух частей: одна - более глубокого проникания, предназначена для возбуждения только сейсмического импульса, другая - приповерхностного расположения, для организации пылевого выброса. Поскольку каждая из частей снабжена радиовзрывателем, то каждая капсула (рис. 7) может возбуждать три сейсмических импульса (рис. 8): 1-й – от удара капсулы о грунт Луны; 2-й - от подрыва заряда, предназначенного для собственно просвечивания Луны; 3-й - для организации пылевого выброса.

Глубину проникновения *h* капсулы (как снаряда) в грунт (рис. 8) без кавитатора можно определить, например, по эмпирической формуле:

$$h = k \frac{G}{D^2} v \sin \alpha, \tag{2}$$

где G – вес снаряда, кг; D – диаметр снаряда, м; α – угол между траекторией и касательной к поверхности в точке столкновения; k – эмпирический коэффициент, характеризующий свойства грунта; v – скорость снаряда.

Скорость частиц грунта, выброшенных из воронки, в грубом приближении можно определить из условия:

$$M\frac{u_0^2}{2} + E_0 = E_{\rm BB},\tag{3}$$

где $E_{\rm BB}$ – энергия, выделяемая при взрыве заряда BB; M – масса грунта, выброшенного из воронки; u_0 – средняя скорость частиц грунта; E_0 – энергия, необратимо затрачиваемая при выносе массы на поверхность планеты.

Отсюда скорость частиц грунта, выброшенных при небольшом заглублении, определится простым соотношением:

$$u_{0} = \sqrt{\frac{2E_{\rm BB}}{M}} = \sqrt{\frac{6E_{\rm BB}}{\rho h h_{0} r_{0}^{2}}},\tag{4}$$

где h_0 – глубина воронки; r_0 – размеры воронки; ρ – плотность грунта.

Интересующая нас средняя проекция скорости на нормаль найдется из соотношения:

$$u_0^{(n)} = \frac{1}{\beta} \int_0^\beta u_0 \cos \varphi d\varphi = \frac{u_0 \sin \beta}{\beta},$$

где β – угол выбрасываемого пылевого конуса.

Из средней проекции скорости на нормаль нетрудно определить размеры пылевого выброса:

$$R = \frac{u_0^{(n)^2}}{2g_{\rm II}},\tag{5}$$

где

$$g_{\rm II} = \gamma \frac{M}{R^3}.$$

Масса выбрасываемой на поверхность планеты пылевого вещества определяется:

$$M = \frac{\pi}{3} \rho h_0^3 \mathrm{tg}^2 \varphi_0, \tag{6}$$

где ρ – плотность грунта планеты; h_0 – глубина проникновения снаряда; φ_0 – угол раствора конуса.

Учитывая, что для лунного грунта $\rho_{\rm cp} = 1.6$ г/см³, из формулы (6) получаем массу выбрасываемого пылевого облака:

М ~ 100 кг.

Принимая, что частицы лунного грунта имеют линейные размеры от 0.1 до 2 мм, а размеры пылевого облака R = 2 км, $\beta = 35^{\circ}$, средняя плотность частиц окажется равной

 $n \sim 4$ частиц/м³.

Заборное устройство на высоте 1 км сможет зарегистрировать ~ 4·10³ частиц, что достаточно для проведения анализа геологического строения планеты.

В соответствии с особенностями полученных указанными методами атласов химического и геологического строения поверхности небесного тела приступают затем к взятию заглубленных проб грунта, расположенных в наиболее интересных участках планеты. В воронку, образовавшуюся от предыдущего взрыва капсулы, дно у которой имеет интересный химический и структурный состав пород, снова направляют капсулу с более мощным метательным зарядом. Взрывом этого заряда снова образуется пылевый выброс из более глубинных пород планеты. Грунт выброса забирается лабораторией.

Вес космической лаборатории, предназначенной для реализации данного метода, намного меньше по сравнению с весом применяемых в настоящее время систем. Таким образом, предлагаемым методом можно получить подробные атласы химического и минералогического состава поверхностных и подповерхностных пород планеты.

Предлагаемая программно-методическая разработка геолого-геофизических и геохимических исследований небесных тел, лишенных атмосферы, ориентирована на Луну, но с незначительными модификациями эффективна для всех аналогичных тел Солнечной системы, а с использованием новых принципов возврата грунта допускает и изучение Марса.

Литература

1. Галимов Э.М. Состояние и перспективы исследования Луны и планет // Вест. РАН. Сер. геофиз. 2004. Т. 74. №12. С. 1059-1081.

2. Станюкович К.П. Физика взрыва // М.: Наука, 1975.

3. Изнар А.Н., Павлов А.В., Федоров Б.Ф. Оптико-электронные приборы космических аппаратов // М.: Машиностроение. 1972.

4. Станюкович К.П. Элементы теории удара твердых тел с большими (космическими) скоростями: Искусственные спутники Земли // М.: Изд-во АН СССР. 1960. Вып. 4.

5. Хаврошкин О.Б., Хрусталев А.Б. Сейсмичность Луны: проблема периодичностей минутного диапазона // Докл. РАН. 2008. Т. 421. №1. С. 106-110.

6. Галимов Э.М., Смирнов В.Е. Способ забора грунта планеты и устройство для его осуществления // Патент № 2132803. Приоритет от 30 дек. 1997 г.

7. Smith A., Crawford I.A. Gowen R.A. Ball A.J.; Barber S.J.; Church P. Coates A.J.; Gao Y. Griffiths A.D. Hagermann A. et.al. LunarEX a proposal to cosmic vision // Experimental Astronomy. V. 23. Issue 3. P. 711-740. March, 2009.

8. *Khavroshkin O.B., Tsyplakov V.V.* Astrohysical periodicity of the lunar seismicity // Herald of the DGGGMS RAS: Electr. Sci.-Inf. J. 2000. N 4(14)'2000.

URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h dgggms/4- 2000/selena.engl.htm#beginm

9. Khavroshkin O.B., Tsyplakov V.V., Berezhnoy A.A., Smirnov G.T. Microwave radiation of the Moon and Venus: amplitude-time variations // Herald of the DGGGMS RAS: Electr. Sci. - Inf. J. 2002 N 1 (20)²002.

URL : http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2002/scpub-4.htm//begin

10. O.B.Khavroshkin, V.V.Tsyplakov. Moon exogenous seismicity: meteoroid streams, micrometeorites and IDPs, Solar wind // Herald of the DGGGMS RAS: Electr. Sci. - Inf. J. 2003. N 1 (21)' 2003.

11. Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Радиосейсмология Земли, Луны и планет // Альманах - 2000: Междунар. академия авторов науч. открытий и изобрет. М.: 2000. С. 80-84.

12. Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В., Попереченко Б.А., Бережной А.А., Шевченко В.В. Изменения микроволнового радиоизлучения в результате падения "Lunar Prospector" // Докл. РАН. 2001. Т. 376. №2. С. 247-249.

13. Berezhnoi A.A., Bervalds E., Khavroshkin O.B., Ozolins G. PSA-16 Radioseismology as a new method of investigations of meteor streams on the Moon and planets // Proc. Conf. "Meteoroids 2001" (ESA SP-495). Noordwijk. The Netherlands: ESA Publ. Division. 2001.

14. Хаврошкин О.Б., Царев В.А., Цыплаков В.В., Чечин В.А. Взаимодействие нейтринных пучков с сейсмически активной средой // Препринт. Физический ин-т АН СССР. М.: 1985. №167. 16с.

15. Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Гелио-геофизический фактор в метрологии и фундаментальных физических экспериментах // Теоретические и экспериментальные проблемы общей теории относительности и гравитации: Тез. докл. Х Рос. гравитац. конф., Владимир, 20-27 июня 1999 г. Москва. 1999.

16. Khavroshkin O.B., Tsyplakov V.V. Radioseismology of the Earth, the Moon and planets // Vernadsky Institute-Brown University MICROSYMPOSIUM 30: Int. Working Meeting on Comparative Planetology. Moscow. Oct. 8-9, 1999: Abstr. M.: Vernadsky Inst. Geochem. and Analyt. Chem. RAS, 1999. P.45

17. Khavroshin O.B., Tsyplakov V.V., Vidmont N.A. Triboradioseismic luminescence of geological structure (TRSL) of the Earth and the Moon // Vernadsky Institute-Brown University MICROSYM-POSIUM 32: Int. Working Meeting on Comparative Planetology, Moscow, Oct. 9-11, 2000: Abstr. M.: Vernadsky Inst. Geochem. and Analyt. Chem. RAS. 2000. P. 84-85.

18. Khavroshkin O.B., Berezhnoi A.A., Gusev S.G., Tsyplakov V.V., Poperechenko B.A., Shevchenko V.V. Radio emission of the Moon before and after the Lunar Prospector impact // Proceedings of the ICEUM-4 Proc. Fouth Int. Conf. on the Exploration and Utilisation of the Moon, 10-14 July 2000. ESTEC, Noordwijk. The Netherlands. 2000. P. 179-181

19. Khavroshkin O.B., Tsyplakov V.V. Meteoroid stream impacts on the Moon: information of duration of seismograms // Abstr. Conf. "Meteoroids 2001", Swedish Inst. Space Phys. Kiruna, Sweden, 6-10 Aug., 2001: P. 4.

20. Khavroshkin O.B., Tsyplakov V.V. PSA-6 temporal structure of meteoroid stream and lunar seismicity according to Nakamura's catalogue // Abstr. Conf. "Meteoroids 2001", Swedish Inst. Space Phys. Kiruna, Sweden, 6-10 Aug., 2001: P. 25.

21. Berezhnoi A.A., Bervalds E., Khavroshkin O.B., Ozolins G. PSA-16 Radioseismology as a New Method of Investigations of Meteor Streams on the Moon and Planets // Abstr. Conf. "Meteoroids 2001". Swedish Inst. Space Phys. Kiruna. Sweden. 6-10 Aug. 2001: P. 30.

22. Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Луна как астрофизический фактор: первые результаны, возможные перспективы // V Междунар. конф. по гравитации и астрофизике стран Азиатско-Тихоокеанского региона. М.: Изд-во РУДН. 2001. С.86.

23. Khavroshkin O.B., Tsyplakov V.V., Vidmont N.A. Adaptation of modern space instrument and vehicles to earthquake prediction // The General Organization of Remote Sensin holds: Abstr. Damascus. Samir Amis. Oct. 29-Nov. 1. 2001.

24. Khavroshkin O.B., Tsyplakov V.V. Information content of meteoroid seismology by Nakamura's Catalog (NC): two unknown periodicity // In: Proceedings of Vernadsky Institute and Brawn University Microsymposium 36 "Topics in Comparative Planetology". October 14-16. 2002. Moscow, Russia. 2002. P. MSO44

25. Khavroshkin O.B., Tsyplakov V.V., Moon exogenous seismicity: meteoroid streams, micrometeorites and IDPs, Solar wind // In Abstracts of 66th Annual Meteoritical Society Meeting. Munster Germany. July 28-August 1. 2003.

26. Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В., Андрианов Т.В. Гистограммый анализ лунной сейсмичности // Тезисы докладов Всероссийской астрономической конференции к 250-летию МГУ им. М.В.Ломоносова ВАК-2004 «Горизонты Вселенной» МГУ, ГАИШ, 3-10 июня 2004 г. Труды ГАИШ им. П.К.Штернберга. Т. LXXV. С. 65

27. Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В., Андрианов Т.В. Новые методы обработки данных лунной сейсмичности // Тезисы докладов Всероссийской астрономической конференции к 250летию МГУ им. М.В.Ломоносова ВАК-2004 «Горизонты Вселенной». МГУ, ГАИШ, 3-10 июня 2004 г. Труды ГАИШ им. П.К.Штернберга. Т. LXXV. С. 101.

28. Berezhnoy A.A., Hasebe N., Fujimura A., Mizutani H., Khavroshkin O.B. Radio observations of the Moon during Leonid meteor showers in 1999 and 2001 // Baltic Astronomy. 2004. V. 13. P. 601-605.

29. Volvach A.E., Berezhnoy A.A., Khavroshkin O.B., Kovalenko A.V., Smirnov G.T. The lunar radio flux during Leonid meteor showers and lunar eclipse, Kinematics and Physics of Celestial Bodies // Suppl. Ser. 2005. No 5. P. 82-85.

30. Galimov E.M., Khavroshkin O.B., Kolosnisyn N.I., Smirnov V.E., Tsyplakov V.V., Veldanov V.A. Exploration of planetary interiors using high-velocity penetrators and radio-seismology // Penetrometry in the Solar System: Proc. Int. Workshop, Oct. 18-20, 1999 // Wien: Verlag der Osterreichischen Akademie der Wissenschaften. 1999. P. 197-211.

31. Galimov E.M., Kulikov S.D., Kremnev R.S., Surkov Yu.A., Khavroshkin O.B. The Russian Lunar Exploration Project // Solar System Research (Official English Translation of Astronomicheskii Vestnic). 1999. V. 33. No 5. P. 327-337.

32. Veldanov V.A., Smirnov V.E., Khavroshkin O.B. Lunar Penetrator: Reducing Overload and Penetration Control // Ibid. P. 432-436.

33. Khavroshkin O.B., Tsyplakov V.V. Penetrator "Mars-96" Reality and Possibilities of Seismic Experiment // UIPE RAS. Moscow. 1996. 36p.

34. Khavroshkin O.B., Tsyplakov V.V. Astrophysical periodicity of the lunar seismicity // Herald of the DGGGMS RAS: Electr. Sci.-Inf. J. 2000. N 4(14)'2000.

URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h dgggms/4-2000/selena.engl.htm#begin

35. Khavroshkin O.B., Tsyplakov V.V. Meteoroid stream impacts on the Moon: information of duration of seismograms // Proc. Conf. "Meteoroids 2001" (ESA SP-495). Noordwijk. The Netherlands: ESA Publ. Division. 2001.

36. Khavroshkin O.B., Tsyplakov V.V. Temporal structure of meteoroid stream and lunar seismicity according to Nakamura's catalogue // Proc. Conf. "Meteoroids 2001" (ESA SP-495). Noordwijk. The Netherlands: ESA Publ. Division. 2001

37. Khavroshkin O.B., Tsyplakov V.V., Berezhnoy A.A., Smirnov G.T. Microwave radiation of the Moon and Venus: amplitude-time variations // Herald of the DGGGMS RAS: Electr. Sci. - Inf. J. 2002 N 1'(20). 2002.

URL : http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h dgggms/1-2002/scpub-4.htm//begin

38. Berezhnoy A.A., Hasebe N., Fujimura A., Mizutani H., Khavroshkin O.B. Radio observations of the Moon during Leonid meteor showers in 1999 and 2001 // Baltic Astronomy. 2004. V. 13. P. 601-605.

39. Khavroshkin O.B., Surkov Yu.A. Outlooks of terrestrial planets research and problem of scientifical priorities // EGS. Part III. Space & Planetary Sciences. Suppl. III to V. 14. C826.

40. Khavroshkin O.B., Nevskii M.V., Surkov Yu.A., Tsyplakov V.V. Penetrator like element of small seismic array // Ibid.

Вестник Отделения наук о Земле РАН - №1(27) 2009

Информационный бюллетень Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии 2009 года (ЕСЭМПГ-2009)

URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2009/informbul-1_2009/planet-26.pdf Опубликовано 1 сентября 2009 г.

© Вестник Отделения наук о Земле РАН, 1997 (год основания), 2009 При полном или частичном использовании материалов публикаций журнала, ссылка на «Вестник Отделения наук о Земле РАН» обязательна