

Трехкомпонентный пенетраторный акселерометр для исследования Марса

Г. Х. Мардиросян, В. М. Фрейд*

*Институт космических исследований БАН
Институт физики Земли „О. Шмидт“ АН СССР

Первый и пока единственный опыт исследования внутреннего строения планеты Марс сейсмологическими методами и средствами был сделан еще в 1976 г., когда космические станции „Викинг-1“ и „Викинг-2“ доставили на планету сейсмологическую аппаратуру [1, 7]. Это были трехкомпонентные короткопериодные сейсмоприемники с электродинамическими преобразователями, настроенные для регистрации скорости \dot{x} . Сейсмоприемники не были установлены непосредственно на марсианском грунте, а остались смонтированными в верхней части спускаемого аппарата. Сейсмоприемник „Викинга-2“ был успешно разарретирован и функционировал в продолжение 546-ти марсианских суток. Вибрации спускаемого аппарата, вследствие порывистого марсианского ветра, очень затруднили интерпретацию полученных данных и, в первую очередь, идентификацию марсотрясений.

При реализации сейсмологической части „Викингов“ был успешно преодолен ряд серьезных технических и технологических проблем. Но, как результат, сейсмограф „Викинга“ не очень продвинул вперед наши знания о недрах Марса — задача изучения внутреннего строения и тектонических сил этой планеты сейсмологическими методами и средствами еще ждет своего решения [2].

В [3, 8] рассмотрены основные предпосылки и соображения разработки аппаратурного комплекса для сейсмологических исследований Марса, основанных на развитии в последние годы как сейсмологического аппаратуростроения, так и космической техники и технологии. В итоге синтезирован предварительный вариант приемно-преобразовательной части этого комплекса, реализованный на основе трехкомпонентного пьезоэлектрического преобразователя [4] с общей сферической или двойной конической инертной массой. Получены конкретные значения основных технико-эксплуа-

тационных характеристик, предложены способы установки, ориентации, калибровки, циклограммы работы и т. д. Но, так как эта разработка предназначена для исследований посредством использования спускаемого аппарата и (или) марсохода, она вероятно может быть реализована в следующих проектах („Марс-96“ и т. д.) программы исследования Марса. В Проекте „Марс-94“ не предусмотрен спускаемый аппарат или марсоход [5]. Исследования будут проводиться на орбите ИСМ, а к поверхности будет выслан пенетратор, что является единственной возможностью для контактных исследований грунта и внутренности планеты. Использование только пенетратора значительно ограничивает возможности по отношению к объему, разнообразию, продолжительности и методике контактных исследований, но в принципе все же есть два преимущества сейсмологических исследований — генерирование сейсмических волн от его падения и гораздо лучший контакт с грунтом.

В данной работе изложены результаты предварительной разработки научных задач, основные конструктивные характеристики приемно-преобразовательного и электронного блока, а так же алгоритм исследований трехкомпонентного двухуровневого пенетраторного акселерометра (ТПА) для сейсмологических исследований Марса.

Научные задачи

Наиболее общие научные задачи, связанные с исследованием поверхности и внутреннего строения Марса, которые ставятся перед сейсмологическим экспериментом с помощью ТПА, могут быть сформулированы так:

1. Восстановление начальной скорости и геометрических и временных параметров траектории при ударе пенетратора о грунт и при его заглублинии. Из полученных данных определяется профиль в глубину некоторых инженерных параметров марсианского грунта, а также решаются чисто технические задачи, связанные с усовершенствованием конструкции пенетратора и методики его использования.

2. Регистрация вторичного сейсмического поля в близкой зоне, связанного с механическими нарушениями среды и релаксацией тепловых аномалий. Полученные данные служат для изучения свойств среды.

3. Регистрация микросейсм естественного происхождения, как результат ветра и других атмосферных процессов. На основе этих данных получают частотно-временные характеристики среды как часть общих характеристик поверхностного слоя марсианского грунта.

4. Регистрация близких марсотрясений вследствие внутрипланетных причин и тектонических сил или от падения более крупных метеоритов на поверхность. Изучение вероятных макросейсмических событий на Марсе дает ценные данные о динамике планеты, уточняет границы между корой и мантией, а также геологическую историю планеты и т. д.

Основные конструктивные характеристики ТПА

По технологическим и эксплуатационным критериям целесообразнее расположить ТПА в нижней (носовой) части пенетратора. Точная форма и размеры последнего еще не известны окончательно, но во всех случаях у него будет цилиндрическая носовая часть. На рис. 1 схематично показана вероятная геометрия пенетратора.

Предложенное расположение ТПА в носовой части обладает следующими преимуществами:

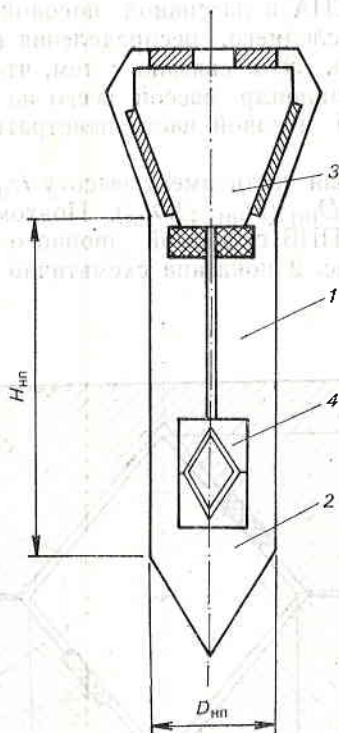


Рис.1. Вероятная геометрия пенетратора и расположение ТПА
1 — корпус, 2 — носовая часть, 3 — виброизолированный отсек, 4 — ТПА

1. Более точное воспроизведение параметров движения при ударе в начальный момент и при входе в марсианский грунт.

2. Обеспечение лучшего механического контакта с грунтом.

3. Вследствие того, что после внедрения в грунт ТПА будет работать на некоторой глубине под поверхностью, улучшаются эксплуатационные условия, из-за:

а) значительно более низкого уровня мешающего, микросейсмического шума, вызванного прямым действием порывистого марсианского ветра, а также ударами частиц, которые им переносятся;

б) меньшего температурного диапазона окружающей среды.

4. Не занимается полезная масса и объем penetrатора.

Последнее имеет исключительно важное значение, так как самая существенная часть ТПА — приемно-преобразовательный блок (ППБ), чувствительность K_x которого в прямой зависимости от величины его инертной массы M

$$(1) \quad K_x = \frac{Mr\ddot{x}}{C_0},$$

где M — величина инертной массы, r — пьезомодуль, характеризующий материал пьезоэлементов, C_0 — электрическая емкость пьезоэлементов, \ddot{x} — ускорение шасси ТПА, т. е. грунта.

Расположение ППБ ТПА в пассивной носовой части penetrатора не изменяет общей массы последнего, распределения ее по его объему и расположения центра тяжести. Это связано с тем, что внешняя конструкция ППБ представляет собой цилиндр массой всего на 1% меньше массы соответствующего пассивной носовой части penetrатора, в которой помещен ППБ.

Цилиндрическая носовая часть имеет высоту $H_{\text{НП}}$, которая в 3 и больше раз превышает диаметр $D_{\text{НП}}$ ($H_{\text{НП}} \geq 3D_{\text{НП}}$). Поэтому было целесообразно принять инертную массу ППБ с формой двойного конуса (два конуса с общим основанием). На рис. 2 показана схематично ППБ ТПА.

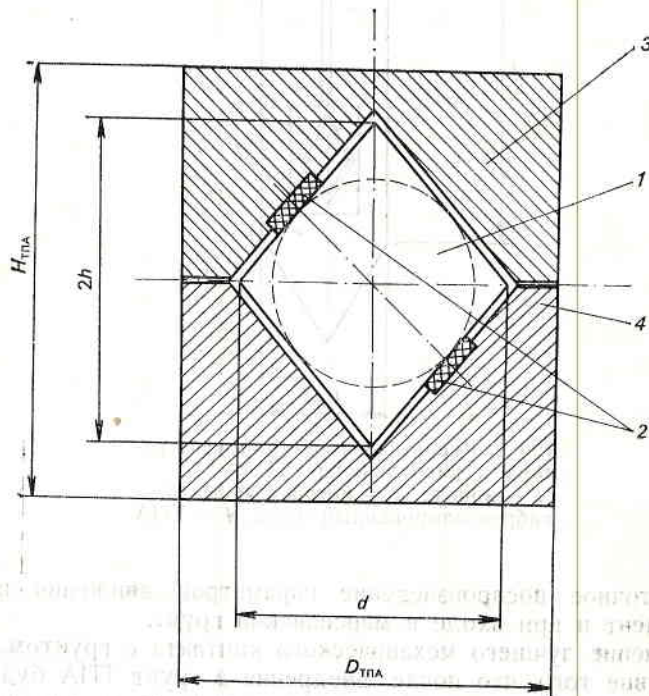


Рис. 2. Конструкция ППБ ТПА в схематическом виде

1 — инертная масса, 2 — пьезодатчики, 3 — верхняя часть шасси, 4 — нижняя часть шасси (корпуса) ТПА

Двойная коническая инертная масса имеет еще одно преимущество перед сферической, а именно — лучший коэффициент заполнения объема. Например для конкретной разработки, при которой $d=40$ мм и $2h=80$ мм, сфера (обозначенная пунктирной линией на рис. 2) имеет примерно в 1,4 раза меньший объем и соответственно во столько же раз меньшую массу, чем двойной конус. В случае $M=0,265$ кг, общая масса ППБ при $D_{\text{ТПА}}=60$ мм и $H_{\text{ТПА}}=100$ мм около 2,2 кг при общем объеме $V_{\Sigma}=282$ см³, а воздушный зазор имеет объем около 4 см³, т. е. меньше 1,5%. Это и определяет упомянутое выше ничтожное изменение общей пассивной массы пене-тратора, если в нее поместить ППБ ТПА. Конечно, можно уменьшить общую массу ППБ за счет облегчения корпусных деталей (верхняя и нижняя крыш-ки), но это не является необходимым.

К общей инертной массе прижаты три пары пьезодатчиков, предназна-ченных для регистрации ускорения по трем компонентам X , Y и Z в прямоуголь-ной координатной системе $OXYZ$. Выходы шести пьезодатчиков (на рис. 2 показаны только два) подключены к электронному блоку (ЭБ) ТПА. Использо-ваны пьезодатчики на основе керамики ЦТС-19. Первое звено ЭБ — элек-тронный усилитель (ЭУ), качества которого оказывают важное влияние на технико-эксплуатационные характеристики всего ТПА.

Постоянная времени τ входной цепи ЭУ

$$(2) \quad \tau = R_{\text{вх}} C_0,$$

где $R_{\text{вх}}$ — входное сопротивление ЭУ.

Из формул (1) и (2) очевидно влияние C_0 на K_x и τ . Здесь имеется в виду тот факт, что постоянная времени τ определяет нижнюю границу частот-ного диапазона, которую в данном случае считаем целесообразным принять за $F_{\text{ниж}}=0,5$ Гц. Предварительные результаты разработки ЭУ показывают, что он имеет сопротивление на входе $R_{\text{вх}} \geq 10$ Г Ω , при сопротивлении утеч-ки $R_y \geq 5$ М Ω .

Единственный способ увеличить K_x , сохраняя ту же τ и не увеличивая M , это использование пьезодатчиков, состоящих из набора n пьезоэлементов со сравнительно небольшими емкостями, соединенными параллельно. В кон-кретной разработке при $n=4$ и $C_0=50$ пФ, постоянная времени $\tau=R_{\text{вх}}nC_0$ не изменяется, коэффициент чувствительности K_x увеличивается примерно в 4 раза по сравнению с вариантом, где $n=1$ и $C_0=200$ пФ.

Другой важный параметр, влияющий на K_x на ППБ, это приведенные ко входу шумы $U_{\text{ш}}$ ЭУ [6], которые в данном случае — $U_{\text{ш}} \leq 0,5$ μ V.

Каждая компонента X , Y и Z имеет собственный ЭУ. А для работы в отдельных режимах (предлагаемый алгоритм работы дан в настоящей работе) целесообразно использование отдельных ЭУ для низкочувствитель-ного уровня с $K_{\text{ус}} < 5$ для режима I и для высокочувствительного уровня с $K_{\text{ус}} > 5 \cdot 10^3$ для режимов II и III.

Некоторыми другими основными технико-эксплуатационными характе-ристиками ЭУ ТПА являются: коэффициент нелинейных искажений $k_{\text{н.л.н}}$ $< 1\%$, динамический диапазон $D > 65$ дБ и рабочий температурный диапазон от -65 до $+50$ °С.

Алгоритм работы

Алгоритм работы ТПА определяется и ограничивается в основном двумя факторами:

а) научной и служебной задачами, поставленными перед сейсмологическим экспериментом с помощью ТПА;

б) самой сущностью, возможностями и действиями пенетратора, а это конструктивные особенности, скорости при ударе и глубина входа в грунт, продолжительность активного действия, возможности его служебной системы, организация связи с орбитальным аппаратом и т. д.

В настоящее время разработан предварительный вариант алгоритма работы ТПА.

Предлагаются три режима работы:

I. Режим удара — регистрация соответственных ускорений по трем осям при ударе пенетратора о грунт (при $t=0$) и при его входе в глубину. Регистрация низкочувствительного уровня K'_{yc} , продолжительность регистрации $\tau'_p=1$ s, частота опроса $f'_n=300$ Hz на компоненту с разрядностью $R=12$ bit. Общий объем информации в этом случае — около 1,5 kByte.

II. Режим регистрации микросейсм — стационарный режим регистрации микроколебаний по трем осям. Включение — по заданной программе по времени, периодически с $T_p=60$ min и продолжительностью каждого дискретного интервала $\tau''_p=20$ s, т. е. общее время регистрации за сутки $\tau_2=8$ min. Частота опроса $f''_n=100$ Hz на компоненту, при этом общий объем информации при одном включении будет 12 kByte. Регистрация высокочувствительного уровня K''_{yc} .

III. Режим регистрации марсотрясений — стационарный режим регистрации макросейсмических событий на высокочувствительном уровне K'''_{yc} . Включение — по амплитудному признаку, когда амплитуда огибающей сигнала возрастает в 4 раза и больше ($A_c \geq 4A_\Phi$). Мы считаем, что в данном случае целесообразнее выключать прибор не по амплитудному признаку, а фиксировать продолжительность регистрации $\tau'''_p=3$ min. Частота опроса также $f'''_n=f''_n=100$ Hz, объем информации одного возможного марсотрясения — 100 kByte.

Отчет времени относителен — таймер начинает счет с момента удара пенетратора о марсианский грунт.

Заключение

Как в первой в своем роде разработке, притом по неуточненному окончательно техническому заданию, некоторые конкретные параметры ТПА бесспорно будут подлежать коррекции и уточнению. В этой статье даны результаты предварительной разработки ТПА, сделанной на базе наиболее вероятных конструктивно-эксплуатационных характеристик пенетратора. С одной стороны, вероятное изменение некоторых из этих характеристик и особенно габаритномассовых параметров, скорости падения на грунт, энергетических ресурсов, возможности и организации служебных систем, как и организации связи между пенетратором и орбитальной станцией и т. д., оказали бы соответствующее влияние на технико-эксплуатационные характеристики и алгоритм работы ТПА. С другой стороны, такие измене-

ния возможно будут необходимы и после эксперимента с лабораторным макетом ТПА в условиях, близких к реальным эксплуатационным условиям.

Анализ и обсуждение всех возможных вариантов не могут вместиться в рамки одной статьи, поэтому здесь упоминаются только наиболее характерные случаи:

1. Если цилиндричная носовая часть пенетратора имеет не круглое, а многоугольное сечение, имеющий цилиндрическую внешнюю форму ТПА без технологических проблем вмещается в нее.

2. В настоящей разработке общая масса ППБ ТПА около 2,2 кг, предусмотренная для пенетратора массой 22—25 кг. Если пенетратор имеет большие массу и габариты, возможно увеличить массу и габариты ППБ ТПА, соответственно инертную массу M , а также, если необходимо, увеличить K_x .

3. При необходимости K_x можно увеличить и посредством увеличения только M , без увеличения общей массы и габаритов ППБ ТПА. При том же $d=40$ мм, но при большей $2h$ инертная масса может достичь $M=0,350$ кг.

4. Начальная скорость v_0 ($t=0$), с которой пенетратор ударяется о марсианский грунт, является важным вопросом в нескольких аспектах, потому что от нее при данных грунтовых условиях зависят:

- а) глубина проникновения пенетратора;
- б) характеристики генерированных от удара сейсмических волн;
- в) ударное ускорение $g_{уд}$, которое будет воздействовать на пенетратор и, соответственно, смонтированная в него аппаратура.

Уточнение v_0 позволит вычислить все эти параметры, после чего надлежит уточнить:

— оптимальный коэффициент чувствительности K_x ППБ, коэффициент усилия $K_{ус}$ ЭУ, продолжительность регистрации τ_p , частоту опроса $f_{ц}$ и разрядность R для режима I;

— оптимальные K_x , $K_{ус}$, T_p , τ_p и $f_{ц}$ для режима II;

— необходимую устойчивость к ударным ускорениям как ППБ ТПА, так и ЭБ ТПА и другой служебной и научной аппаратуры, смонтированной в виброизоляционном отсеке пенетратора.

5. С целью экономии энергоресурсов возможно в отдельных режимах и случаях не регистрировать все три компоненты X , Y и Z , а только две или одну из них. Специально для режима I из соображений резервирования, с целью повышения надежности, целесообразно регистрировать все три компоненты.

6. Предстоит теоретическое решение и экспериментальное подтверждение целесообразности того, чтобы ППБ имело отдельные пьезодатчики для двух уровней $K_{ус}$ и $K_{ус}'$, т. е. всего 12 пьезодатчиков. Этот вариант имеет преимущество по соображениям надежности. Схематически такой вариант показан на рис. 2, где пьезодатчик составной (двухуровневый).

7. Периоды включения T_p и продолжительность регистрации τ_p в режиме II находятся в прямой зависимости от продолжительности действия пенетратора. При короткоживущих пенетраторах (порядка нескольких суток) целесообразно уменьшить T_p и увеличить τ_p .

Л и т е р а т у р а

1. Г а л к и н, И. Внеземная сейсмология. Серия „Планета Земля и Вселенная“, АН СССР, М., Наука, 1988.
2. Б о л т, Б. В глубинах Земли. М., Мир, 1984, с. 100.
3. М а р д и р о с я н, Г., В. Ф р е м д. Исходные предпосылки и соображения разработки пьезоэлектрического преобразователя аппаратного комплекса для сейсмологических исследований на Марсе. — Бюлл. геофиз. сп., XI, 1989, № 2.
4. Ф р е м д, В. Трехкомпонентный пьезоэлектрический сейсмометр. Авт. свид. СССР № 1377799. — Бюлл. изобретений, 1988, № 8.
5. М а т е р и а л ы Международного совещания по Проекту „Марс-94“ ИКИ АН СССР, Москва, 14—17 февраля 1989.
6. Ф р е м д, В. Регистрационные возможности каналов с пьезосейсмометрами. — В: Инструментальное изучение сейсмических колебаний (Сейсмические приборы, вып. 16). М., Наука, 1984, 158—160.
7. A n d e r s o n, D. et al. Seismology on Mars. — J. of Geoph., 82, 1977, No 28, p. 4524.
8. M a r d i r o s s i a n, G., V. F r e m d, D. D e n e v a. Consideration and elaboration of the receiving-transducing part of an apparatus complex for seismological investigations on Mars. — In: XXI General Assembly of ESK, Sofia, 1988.

Three-component penetrator accelerometer for Mars exploration

G. H. Mardirospan, V. M. Fremd

(S u m m a r y)

In the present work the basic science and operation problems concerning the seismologic experiment for the planet Mars' surface and inner structure exploration are discussed, using a two sensitivity level, three-component penetrator accelerometer (TCPA). The initial results from the development of the receiver-converter and electronic unit are given and some variants of the alternative approach for the basic design characteristics determination are discussed. An algorithm is proposed for the use of TCPA. In conclusion, the necessary modifications of the performance characteristics and the TCPA operation algorithms are discussed as a consequence of the eventual variations of the dimension-mass characteristics, the energetic resources, the organisation of the operation systems, etc. of the penetrator.