

УДК 550.34.01

Сейсмические измерения на Земле и планетах Солнечной системы

© 2022 г. А.Б. Манукин, И.И. Калинин, О.С. Казанцева, В.П. Матюнин

ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

Поступила в редакцию 01.08.2022 г.

Аннотация. Рассмотрены основные проблемы построения сейсмоакселерометра для измерений на планетах Солнечной системы. Приведены данные об основных параметрах и особенностях сейсмометра для измерений на Марсе (прибор СЭМ), включая применение упругих растяжек для получения одноосного датчика первичной информации и введения магнитной жёсткости для прецизионного выставления пробной массы в условиях ускорения свободного падения на выбранной планете. Обсуждены вопросы использования конструкции прибора СЭМ для измерений на Луне (прибор СЕЙСМО-ЛР), а также возможности установки прибора на спускаемом аппарате ввиду отсутствия на Луне атмосферы и, следовательно, ветровых нагрузок, вопросы возможного демпфирования и искажения малых колебаний поверхности спускаемым аппаратом. Показано, что приборы, разработанные для планетарных исследований, могут использоваться для измерений на Земле.

Ключевые слова: сейсмометр, одноосный датчик, наклон, постоянный магнит, тепловые шумы, магнитная жёсткость, измерительная ёмкость, растяжка, ускорение свободного падения.

Для цитирования: Манукин А.Б., Калинин И.И., Казанцева О.С., Матюнин В.П. Сейсмические измерения на Земле и планетах Солнечной системы // Российский сейсмологический журнал. – 2022. – Т. 4, № 3. – С. 36–43. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2022.3.03>. EDN: IDUOAK

Введение

Проблема создания сейсмометра актуальна не только для проведения измерений на Земле, но и для измерений на планетах Солнечной системы. Конечно, требования к внеземным сейсмометрам существенно отличаются от земных вариантов. И в первую очередь это относится к весогабаритным характеристикам, хотя в некоторых случаях, например, при создании скважинных вариантов приборов для измерений на Земле, требования к весогабаритным параметрам также высоки. Важный элемент разработки – выставление устройства по местной гравитационной вертикали, необходимый для планетарных исследований, может пригодиться и на Земле при скважинных измерениях.

В ряде случаев измерения сейсмометром, установленным на спускаемом космическом аппарате, невозможны из-за большого уровня инерционных помех в связи с воздействием ветровых нагрузок и большой парусностью спускаемого аппарата. Так, например, случилось на Марсе в семидесятые годы XX века, где за полу-

тораговой период наблюдений по программе Викинг удалось получить единственную квазисейсмическую запись, свободную от ветровых помех. Это обстоятельство вынудило разработать систему спуска сейсмометра непосредственно на поверхность планеты под ветровой защитой. Подобная система может быть использована и на Земле. Здесь был приведён только краткий перечень задач, который сближает земные и космические сейсмические измерения. Многие вопросы, которые удалось решить при создании приборов для измерений на планетах Солнечной системы, несомненно могут оказаться важными и при организации наземных наблюдений.

Сейсмометр для измерений на Марсе

Теперь более подробно остановимся на разработке марсианского сейсмометра, который создавался в рамках программы «ЭкзоМарс». Краткое название прибора – СЭМ (сейсмометр «ЭкзоМарс»). Была использована известная схема построения трёхкоординатного прибора [Шнирман, 1982], когда одноосные датчики

первичной информации (ДПИ) выстраиваются так, что их оси чувствительности направлены вдоль рёбер, исходящих из одной вершины воображаемого куба, а главная диагональ куба из этой вершины направлена по местной гравитационной вертикали.

Схема построения трёхкоординатного сейсмоакселерометра

Рис. 1 (вид сбоку и вид сверху) [Manukin et al., 2021] поясняет геометрию установки однокоординатных датчиков в приборе.

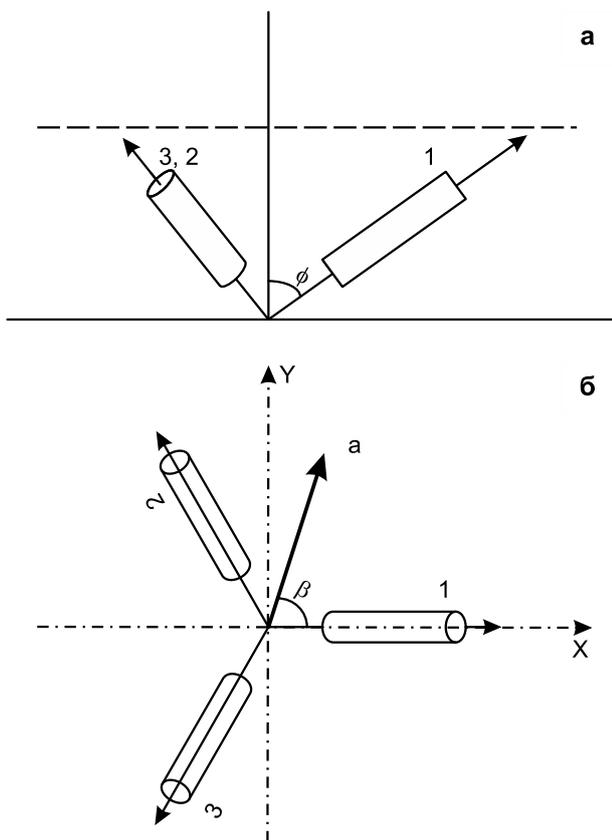


Рис. 1. Схема построения трёхкоординатного сейсмоакселерометра: а – вид сбоку; б – вид сверху

Каждый датчик установлен под углом $\varphi = \arctg\sqrt{2} \approx 0.955 \text{ рад}$ или 54.736° дуги. Если датчики ориентированы так, что (рис. 1, вид сверху) проекция оси чувствительности датчика № 1 направлена по оси X , проекция оси чувствительности датчика № 2 – под углом $2\pi/3$ к оси X , а проекция оси чувствительности датчика № 3 – под углом $(-2\pi/3)$ к оси X , то можно рассчитать ускорения, действующие на пробную массу каждого датчика при сейсмическом воздействии. Пусть мгновенное ускорение a основания прибора имеет вертикальную a_v и горизонтальную a_r составляющие, причём горизонтальная состав-

ляющая направлена под углом β к оси X . В этом случае, обозначая через a_1, a_2, a_3 ускорения, действующие на пробные массы каждого датчика вдоль их осей чувствительности, получим:

$$\begin{aligned} a_1 &= a_r \cdot \cos\beta \cdot \sin\varphi + a_v \cdot \cos\varphi \\ a_2 &= a_r \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \beta\right) \cdot \sin\varphi + a_v \cdot \cos\varphi, \\ a_3 &= a_r \cdot \cos\left(\beta - \frac{\pi}{3}\right) \cdot \sin\varphi + a_v \cdot \cos\varphi \end{aligned} \quad (1)$$

Из этой системы из трёх уравнений по измеренным a_1, a_2, a_3 можно найти a_v, a_r и угол β , т.е. вектор мгновенного ускорения основания прибора.

Обоснование выбора схемы построения одноосного сейсмического датчика

Существует большой класс механических чувствительных систем, где в качестве упругого элемента используется крутильная жёсткость металлических или кварцевых нитей (последние широко применяются в гравиметрах) [Железняк и др., 1980; Gotlib et al., 2004; Manukin et al., 2010]. В таких приборах об одноосности можно говорить условно.

В качестве альтернативы для создания одноосной системы предлагается схема, в которой одноосность обеспечивается самими элементами механической жёсткости [Manukin et al., 2019]. Схема такой системы представлена на рис. 2.

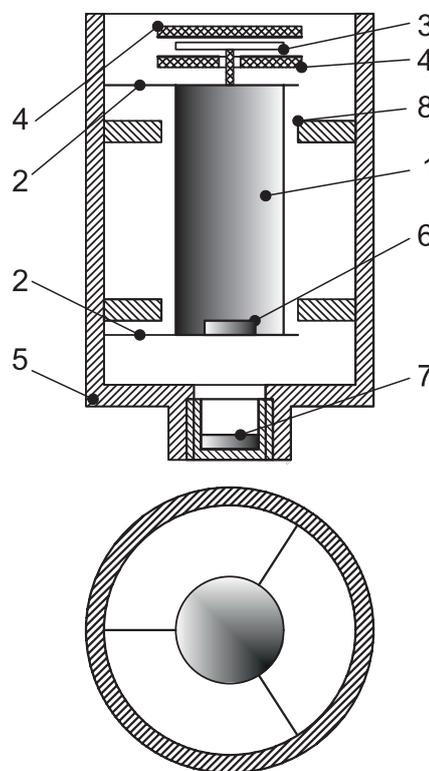


Рис. 2. Схема одноосного датчика сейсмоакселерометра

Пробное тело 1 в форме цилиндра удерживается по оси Z (ось чувствительности), а также по осям X и Y с помощью двух блоков растяжек 2, установленных вблизи двух торцов цилиндра. Каждый блок представляет собой три ленты из тонкой фольги (или нити), размещённые под углом 120° и соединённые одним концом с пробной массой 1, а другим – с корпусным элементом прибора 5, имеющим форму полого цилиндра, соосного с пробной массой. Продольная механическая жёсткость лент на пять порядков превышает их изгибную жёсткость, что и обеспечивает одноосность ДПИ. Движения пробного тела 1 по оси Z измеряются с помощью ёмкостного преобразователя. На рис. 2 показана только роторная пластина 3 измерительной дифференциальной ёмкости, соединённая с пробной массой, и неподвижные пластины 4 измерительной ёмкости.

Если диаметр каждой нити растяжки D , а длина l , то коэффициент жёсткости такого подвеса по оси Z будет [Ландау, Лифшиц, 1965]:

$$K = \frac{9\pi ED^4}{32l^3}, \quad (2)$$

где E – модуль Юнга материала растяжки. При величине пробной массы m собственная частота такой колебательной системы:

$$\omega_0 = \sqrt{9\pi ED^4 / m32l^3}. \quad (3)$$

При $E=10^{11}$ н/м², $m=50$ г, $l=0.01$ м, $D=0.1$ мм, $\omega_0 \approx 14$ рад/с (~ 2.2 Гц). Если $l=0.03$ м, $D=0.01$ мм, $\omega_0 \approx 2.7 \cdot 10^{-2}$ рад/с ($\sim 4.3 \cdot 10^{-3}$ Гц). Соответствующая величина минимального измеряемого ускорения, определяемого тепловыми шумами [Гусев, Манукин, 1985]:

$$a_{\min} = \omega_0 \sqrt{\Theta / m}, \quad (4)$$

для этих параметров составит от $4.2 \cdot 10^{-9}$ до $8 \cdot 10^{-12}$ м/с² (Θ – произведение постоянной Больцмана k и абсолютной температуры). Эти простые оценки показывают, что на базе описываемой конструкции механической системы может быть реализован акселерометр с высокой чувствительностью при относительно небольших габаритах и общей массе.

Обеспечение работоспособности датчика при воздействии ударов и транспортировочных ускорений

На первый взгляд настораживает применение тонких растяжек диаметром от 0.1 до 0.01 мм или тонких лент толщиной 20–30 мкм. Чтобы

растяжки выдержали большие вибрационные и ударные нагрузки, в конструкции прибора предусмотрены специальные элементы 8 (рис. 2). Зазор между ними и пробной массой составляет величину d . Удлинение Δx растяжки диаметром D под действием ускорения a в плоскости XY составит величину $\Delta x = aml / SE = 4aml / \pi D^2 E$. Для случая, когда $\Delta x = d$, соответствующее ускорение:

$$a = d\pi D^2 E / (4ml). \quad (5)$$

Механическое напряжение в растяжке под действием ускорения a определяется соотношением: $T = 4ma / \pi D^2$.

Сравнивая это напряжение с максимальным разрывным напряжением T_p для материала растяжки, получим максимальное ускорение, которое выдержит растяжка:

$$a_{\max} = T_p \pi D^2 E / (2m). \quad (6)$$

При воздействии ускорения на акселерометр растяжка начнёт упруго растягиваться и пробная масса упрётся в элементы (8) конструкции прибора. Чтобы не было разрыва растяжек, необходимо, чтобы a , определяемое (5), было много меньше a_{\max} (6), например, $a = a_{\max} / 10$ (10-кратный запас по прочности). Из последнего равенства определяется требование к величине зазора d :

$$d \approx T_p l / (10E). \quad (7)$$

Как правило, $T_p / E \approx 10^{-2}$ и формулу (7) можно переписать в приближенном виде:

$$d \approx 10^{-3} l. \quad (8)$$

Зависимость от величины массы m и диаметра растяжки D , естественно, выпала. Так, при $l = 10$ мм $d = 10$ –20 мкм.

Роль элементов (8) при механических нагрузках, ускорениях по оси Z выполняют неподвижные пластины дифференциальной измерительной ёмкости, между которыми находится подвижная пластина, связанная с пробной массой акселерометра. Приведём простые оценки величины механического напряжения в растяжке при воздействии ускорения по оси Z .

Воспользуемся формулой (2) для жёсткости подвеса на растяжках. Если зазоры между подвижной и неподвижными пластинами конденсатора d , то относительное удлинение растяжки, когда подвижная пластина коснётся неподвижной, составит:

$$\Delta l / l = 1/2(d/l)^2. \quad (9)$$

Механическое напряжение в растяжке при этом в соответствии с законом Гука:

$$T = E(\Delta l/l) \approx E \cdot 1/2 \cdot (d/l)^2. \quad (10)$$

При $d=0.1$ мм и $l=10$ мм $T \approx 5 \cdot 10^{-5} E$, что существенно меньше разрывного напряжения T_p . При величине пробной массы $m=50$ г этим параметрам соответствует максимальное ускорение $a_{\max} \sim 2 \cdot 10^2$ м/с². При ускорениях, превышающих a_{\max} , подвижная пластина просто прижмётся к одной из неподвижных и нагрузки на растяжки не будет.

Выбор механического упругого элемента датчика

Во всех проведённых численных оценках полагалось, что модуль Юнга $E=10^{11}$ н/м² или 10^2 ГПа. Это значение E выбрано не случайно, поскольку именно таким E характеризуется бериллиевая бронза – сплав БрБ2.

Упругий элемент – растяжка – представляет собой тонкую ленту или нить (стержень) кругового сечения и является важнейшей частью датчика. Для его изготовления требуется материал, у которого величина модуля упругости слабо зависит от влияния таких факторов как температура, время, вибрации, рабочие нагрузки и т.п. Поскольку идеальных материалов нет, то необходимо выбрать материал, у которого температурная характеристика модуля упругости в требуемом диапазоне температур линейна и достаточно стабильна. Тогда температурную погрешность датчика, появляющуюся за счёт изменения модуля упругости, можно учесть.

Другим важным требованием к материалу упругого элемента является высокая стабильность модуля упругости во времени.

Нестабильность модуля упругости связана с процессами последействия и релаксации, происходящими в материале после его механической или термической обработки. Поэтому наименьшей временной нестабильностью модуля упругости обладают металлы, которые в результате обработки не получают значительных остаточных напряжений.

К таким металлам относятся дисперсионно-твердеющие сплавы. Характерной особенностью этих сплавов является то, что в закалённом состоянии они обладают высокой пластичностью, а повышение упругих свойств достигается в процессе отпуска. Бериллиевая бронза является именно таким дисперсионно-твердеющим сплавом. Кроме того, изменение модуля Юнга в широком диапазоне температур (от -200 до $+600^\circ\text{C}$) практически линейно [Смитлз, 1980]. Для бериллиевой бронзы термоупругий коэффи-

циент $\sim -2.4 \cdot 10^{-4}$ 1/К. Поэтому в приборе в качестве упругих элементов (растяжек) желательнее использовать нити или тонкие ленты из бериллиевой бронзы.

Предварительные испытания показали, что описываемая конструкция акселерометра обладает широким динамическим диапазоном (не менее 140 дБ) и частотным диапазоном – вплоть до квазистатических измерений. Основным шумовым воздействием, кроме вариаций температуры, являются дрейфовые явления в упругом элементе. Накоплен большой опыт изучения дрейфовых явлений в гравиметрах. Показано, что чувствительность на больших периодах ограничивает не столько величина дрейфа прибора, сколько непрогнозируемая величина дрейфа пружины. Если прибор характеризуется даже относительно большим, но линейным по времени дрейфом, то его легко спрогнозировать и вычесть из показаний измерений. Так, при измерениях вариаций ускорения свободного падения на корабле кварцевым морским гравиметром учёт линейного дрейфа прибора (он составлял 10^{-6} г/сут) позволил провести измерения в течение 120 сут непрерывного плавания в мировом океане с относительной точностью 10^{-7} [Михайлов и др., 2017]. Для металлических пружин соответствующая величина дрейфа составляет обычно $\sim 10^{-7} a_{\max}$ /сут.

Введение дополнительной магнитной жёсткости датчика

Во всех предыдущих построениях не учитывалась сила тяжести, воздействующая на пробную массу. В присутствии силы тяжести механической жёсткости подвеса из растяжек может не хватить, поэтому необходимо ещё одно, независимое силовое воздействие на пробную массу датчика. Эта проблема решается использованием двух постоянных магнитов, один из которых (7) устанавливается в корпусе прибора, другой (6) – на пробной массе, так что на пробную массу будет действовать дополнительная сила, направленная вверх, поскольку магниты повернуты друг к другу одноимёнными полюсами. Перемещая магнит 7, можно добиться положения, когда сила отталкивания магнитов будет равна весу пробной массы.

Как следствие диполь-дипольного характера взаимодействия, сила взаимодействия между магнитами обратно пропорциональна четвёртой степени расстояния между ними z [Ландау, Лифшиц, 1992]:

$$F = \frac{3\mu_0 J_1 V_1 \cdot J_2 V_2}{2\pi \cdot z^4} = \frac{B}{z^4}, \quad (11)$$

где J и V – намагничённость и объём магнитов соответственно.

Уравнение движения пробной массы, где x – координата пробной массы относительно положения равновесия, соответствующего z_0 :

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + kx = \frac{B}{(z_0 + z)^4} - mg + \sum f, \quad (12)$$

где $\sum f$ – сумма всех внешних сил, действующих на пробную массу.

После разложения по малому параметру x/z_0 выражение (12) принимает вид:

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + kx \left(k + \frac{4mg}{z_0} \right) x = \sum f. \quad (13)$$

Величина $4mg/z_0 = k_{\text{mag}}$ – «магнитная» жёсткость. Частота собственных колебаний, определяемая этой жёсткостью:

$$\omega_0 = 2\sqrt{g/z_0}. \quad (14)$$

Важно отметить, что в соотношении (14) вошли только ускорение силы тяжести g и расстояние между магнитами z_0 , при котором магнитная сила полностью компенсирует mg . Величина магнитной жёсткости близка к жёсткости механической, определяемой упругостью подвеса на растяжках.

Передвижением магнита можно изменять и жёсткость механического осциллятора, и положение пробной массы (магниты поставлены одноимёнными полюсами навстречу друг другу). Таким образом, имеется возможность настраивать прибор на гравитационное поле планеты ещё на Земле. Для этого необходимо наклонить прибор так, чтобы проекция ускорения свободного падения Земли на ось чувствительности выбранного датчика была равна ускорению свободного падения планеты, после чего с помощью передвижения постоянного магнита устанавливают пробную массу в заданное положение. Эта операция проделывается для каждого ДПИ, после чего прибор готов к измерениям на выбранной планете Солнечной системы. Подготовленный к старту прибор уже не проверишь одновременно по трём ДПИ в земных условиях.

Ёмкостный преобразователь перемещений пробной массы в электрический сигнал

Данные о колебаниях корпуса прибора от сейсмических воздействий получаются из анализа информации о движениях пробной массы относительно корпуса. Колебания роторной пластины 3 (рис. 1), соединённой с пробной массой и находящейся между двумя статорными пласти-

нами 4, приведут к изменениям дифференциальной измерительной ёмкости ёмкостного преобразователя. С помощью передвижения постоянного магнита роторная пластина устанавливается примерно в середине зазора между статорными пластинами.

Основу ёмкостного преобразователя малых механических перемещений пробной массы в электрический сигнал составляет микросхема AD7746, предназначенная для измерения величины дифференциальных ёмкостей и преобразования сигнала в цифровой код. Собственный электронный шум микросхемы составляет единицы $a\Phi$ ($10^{-6} n\Phi$). При рабочей ёмкости $4 n\Phi$ минимальные смещения пробной массы, определяемые шумом микросхемы, $x_{\text{min}} \approx (\Delta C/C) d/2 \approx 1.2 \cdot 10^{-9} \text{ см}$ при зазоре $d=100 \text{ мкм}$. Эта величина незначительно превышает уровень собственных тепловых шумов механического осциллятора (4).

Краткие результаты калибровок прибора СЭМ и заключение

Калибровки созданного датчика методом наклонов показали, что разрешение прибора близко к расчётному с учётом шумов преобразователя. Чувствительность по амплитуде вертикальных и горизонтальных колебаний основания прибора в окрестности 1 Гц составила соответственно $A_{\text{верт}} \sim 4.4 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, $A_{\text{гор}} \sim 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, чувствительность по наклонам прибора составила $\sim 3 \cdot 10^{-8} \text{ рад}$, а минимально обнаружимое изменение ускорения $\sim 2.4 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2$.

Были разработаны система доставки прибора в защитном, предохраняющем от воздействия ветра, кожухе на поверхность Марса и система выставления его по гравитационной вертикали. Прибор СЭМ успешно прошёл все предполётные испытания и готов к старту.

Именно схема построения прибора СЭМ была взята за основу при проектировании сейсмометра для измерений на Луне – прибор СЕЙСМО-ЛР. Отсутствие на Луне атмосферы даёт возможность проводить измерения, оставаясь на спускаемом аппарате. Относительно высокая механическая жёсткость конструкции спускаемого аппарата (низшая частота его собственных колебаний составляет $\sim 40 \text{ Гц}$) обеспечивает передачу малых колебаний поверхности на прибор практически без искажений и демпфирования. Высокая механическая жёсткость спускаемого аппарата также существенно понижает вероятность появления спорадических всплесков, обусловленных эффектами теплового

расширения его конструкции в сейсмической области частот 0.1–10 Гц.

Необходимо отметить ещё одну особенность измерений этим вариантом прибора. С его помощью можно получить информацию о процессах в квазистатической области спектра. Скорость размагничивания постоянных неодимовых магнитов, обеспечивающих более половины величины механической жёсткости чувствительного элемента прибора, — менее 2% за десять лет — позволяет создать прибор с малой и прогнозируемой величиной собственного дрейфа. Имеется возможность получить данные о медленных наклонах основания прибора, о вариациях величины ускорения свободного падения. Это означает, что мы можем измерять эффекты, связанные с приливными процессами, либрационными колебаниями Луны, с деформационными явлениями в приповерхностных структурах и т.д.

Те же возможности существуют и при наземных измерениях, где столь же важно изучение приливных эффектов, деформационных процессов.

Общий вывод, который можно сделать из изложенного: после незначительной доработки, включающей введение демпфирования для получения необходимых амплитудно-частотных характеристик, приборы, предназначенные для измерений в космических проектах, могут с успехом использоваться для решения большого числа земных проблем наряду с классическими сейсмическими задачами.

Литература

Гусев Г.А., Манукин А.Б. Предельная чувствительность гравиинерциальных приборов при измерении квазистатических процессов // Физика Земли. — 1985. — № 9. — С. 90–95.

Железняк Л.К., Казанцева О.С., Попов Е.И., Сафронов В.В. Малогабаритный гиростабилизированный гравиметр ГГМ // Разработка и исследование гравиинерциальной аппаратуры. — М.: Наука, 1980. — С. 3–14.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. — М.: Наука, 1965. — 202 с.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. — М.: Наука, 1992. — 621 с.

Михайлов П.С., Железняк Л.К., Конешов В.Н., Соловьев В.Н. Методические приёмы повышения точности при выполнении гравиметрических съёмки на море // Морские исследования и образование (MARESEDU — 2017). Труды VI Международной научно-практической конференции. — М.: ООО «ПолиПРЕСС», 2017. — С. 332–337. — EDN: YPCZEN

Смитлз К.Дж. Металлы: Справочник. Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1980. — 447 с.

Шнирман Г.Л. Астазирование маятников. — М.: Наука, 1982. — 168 с.

Gotlib V.M., Evlanov E.N., Zubkov B.V., Linkin V.M., Podkolzin S.N., Manukin A.B., Rebrov V.I. High-Sensitivity quartz accelerometer for measurements of small accelerations of spacecraft // Cosmic Research. — 2004. — V. 42, N 1. — P. 54–59. doi: 10.1023/B:COS M.0000017562.59500.d3. — EDN: LIOCKJ

Manukin A.B., Gorshkov O.N., Andreev O.N., Shlyk A.F. Compact high-sensitivity accelerometer-seismometer // Cosmic Research. — 2010. — V. 48, N 4. — P. 346–351. doi: 10.1134/S0010952510040076. — EDN: MXICDL

Manukin A.B., Kazantseva O.S., Kalinnikov I.I. New version of a highly sensitive uniaxial sensor for seismic accelerometers // Seismic Instruments. — 2019. — V. 55, Is. 4. — P. 404–409. doi: 10.3103/S0747923919040091

Manukin A.B., Kazantseva O.S., Kalinnikov I.I., Matyunin V.P., Sayakina N.F., Ton'shev A.K., Chernogorova N.A. Seismometer for observations on Mars // Cosmic Research. — 2021. — V. 59, N 5. — P. 366–375. doi: 10.1134/S0010952521050087. — EDN: CTGQTI

Сведения об авторах

Манукин Анатолий Борисович, д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия. E-mail: amanukin@yandex.ru

Калинников Игорь Иванович, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. ИФЗ РАН, г. Москва, Россия. E-mail: I-kalinn@yandex.ru

Казанцева Ольга Сергеевна, канд. техн. наук, вед. науч. сотр. ИФЗ РАН, г. Москва, Россия. E-mail: o.kazantseva@yandex.ru

Матюнин Валерий Петрович, ст. науч. сотр. ИФЗ РАН, г. Москва, Россия. E-mail: matyunin.valerii@yandex.ru

Seismic measurements on the Earth and planets of the Solar system

© 2022 A.B. Manukin, I.I. Kalinnikov, O.S. Kazantseva, V.P. Matyunin

IPE RAS, Moscow, Russia

Received August 1, 2022

Abstract The article deals with the main problems of constructing a seismic accelerometer for measurements on the planets of the Solar system. Data on the main parameters and features of a seismometer for measurements on Mars (SEM instrument) are presented, including the use of elastic braces to obtain a uniaxial sensor of primary information and the introduction of magnetic rigidity for precise setting of a test mass under conditions of free fall acceleration on a selected planet. The issues of using the design of the SEM instrument for measurements on the Moon (SEISMO-LR instrument), as well as the possibility of installing the instrument on the descent vehicle due to the lack of an atmosphere on the Moon and, consequently, wind loads, the issues of possible damping and distortion of small surface oscillations by the descent vehicle are discussed. It is shown that instruments developed for planetary research could be used for measurements on Earth.

Keywords Seismometer, single-axis sensor, tilt, permanent magnet, thermal noise, magnetic rigidity, capacitance, stretch, free fall acceleration.

For citation Manukin, A.B., Kalinnikov, I.I., Kazantseva, O.S., & Matyunin, V.P. (2022). [Seismic measurements on the Earth and planets of the Solar system]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 4(3), 36-43. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2022.3.03> EDN: IDUOAK

References

- Gotlib, V.M., Evlanov, E.N., Zubkov, B.V., Linkin, V.M., Podkolzin, S.N., Manukin, A.B., & Rebrov, V.I. (2004). High-Sensitivity quartz accelerometer for measurements of small accelerations of spacecraft. *Cosmic Research*, 42(1), 54-59. doi: [10.1023/B:COSM.0000017562.59500.d3](https://doi.org/10.1023/B:COSM.0000017562.59500.d3). EDN: LIOCKJ
- Gusev, G.A., & Manukin, A.B. (1985). [Limiting sensitivity of gravitational inertial devices when measuring quasi-static processes]. *Fizika Zemli* [Physics of the Earth], 9, 90-95. (In Russ.).
- Landau, L.D., & Lifshits, E.M. (1965). *Teoriia uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 202 p. (In Russ.).
- Landau, L.D., & Lifshits, E.M. (1992). *Elektrodinamika sploshnykh sred* [Electrodynamics of continuous media]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 621 p. (In Russ.).
- Manukin, A.B., Gorshkov, O.N., Andreev, O.N., & Shlyk, A.F. (2010). Compact high-sensitivity accelerometer-seismometer. *Cosmic Research*, 48(4), 346-351. doi: [10.1134/S0010952510040076](https://doi.org/10.1134/S0010952510040076). EDN: MXICDL
- Manukin, A.B., Kazantseva, O.S., & Kalinnikov, I.I. (2019). New version of a highly sensitive uniaxial sensor for seismic accelerometers. *Seismic Instruments*, 55(4), 404-409. doi: [10.3103/S0747923919040091](https://doi.org/10.3103/S0747923919040091)
- Manukin, A.B., Kazantseva, O.S., Kalinnikov, I.I., Matyunin, V.P., Sayakina, N.F., Ton'shev, A.K., & Chernogorova, N.A. (2021). Seismometer for observations on Mars. *Cosmic Research*, 59(5), 366-375. doi: [10.1134/S0010952521050087](https://doi.org/10.1134/S0010952521050087). EDN: CTGQTI
- Mikhailov, P.S., Zheleznyak, L.K., Koneshov, V.N., & Solovyov, V.N. (2017). [Methodological methods for improving accuracy when performing gravimetric surveys at sea]. In *Morskii issledovaniia i obrazovanie (MARESEDU – 2017). Trudy VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference “Marine Research and Education (MARESEDU - 2017)”: collection] (pp. 332-337). Moscow, Russia: LLC “PoliPRESS” Publ. (In Russ.). EDN: YPCZEH
- Shnirman, G.L. (1982). *Astazirovanie maiatnikov* [Astasis of pendulums]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 168 p. (In Russ.).
- Smithles, K.J. (1980). *Metally: Spravochnik* [Metals: A Handbook. Russian translation]. Moscow, Russia: Metallurgy Publ., 447 p. (In Russ.).
- Zheleznyak, L.K., Kazantseva, O.S., Popov, E.I., & Safronov, V.V. (1980). [GGM small-sized gyro-stabilized gravimeter]. In *Razrabotka i issledovanie graviinertial'noi apparatury* [Development and research of graviinertial equipment] (pp. 3-14). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).

Information about authors

Manukin Anatoly Borisovich, Dr., Professor, Chief Researcher of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (IPE RAS), Moscow, Russia. E-mail: amanukin@yandex.ru

Kalinnikov Igor Ivanovich, PhD, Leading Researcher of the IPE RAS, Moscow, Russia. E-mail: I-kalinn@yandex.ru

Kazantseva Olga Sergeevna, PhD, Leading Researcher of the IPE RAS, Moscow, Russia. E-mail: o.kazantseva@yandex.ru

Matyunin Valery Petrovich, Senior Researcher of the IPE RAS, Moscow, Russia. E-mail: matyunin.valerii@yandex.ru