

УДК 629.78

## СЕЙСМОМЕТР ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ НА МАРСЕ

© 2021 г. А. Б. Манукин<sup>1,2</sup>, О. С. Казанцева<sup>1, \*</sup>, И. И. Калинин<sup>1</sup>, В. П. Матюнин<sup>1</sup>,  
Н. Ф. Саякина<sup>2</sup>, А. К. Тоньшев<sup>2</sup>, Н. А. Черногорова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

\**o.kazantseva@yandex.ru*

Поступила в редакцию 02.09.2020 г.

После доработки 04.12.2020 г.

Принята к публикации 22.01.2021 г.

В статье приведены результаты разработки и создания трехкомпонентного сейсмометра для измерений на Марсе. В низкочастотной и квазистатической области спектра прибор также выполняет функции наклономера и гравиметра. Приведено описание чувствительного элемента – одноосного датчика. В прибор входят три таких датчика, оси чувствительности которых взаимно перпендикулярны. Пробная масса в каждом датчике удерживается с помощью механической и магнитной жесткости, а собственная частота осциллятора – около 5 Гц. Рассмотрены вопросы предельной чувствительности, определяемой собственными равновесными тепловыми флуктуациями. Приведены способы решения технических проблем – доставки блока чувствительных элементов под защитным кожухом на поверхность Марса, установки прибора по гравитационной вертикали и результаты эталонирования методом наклонов, показавшие, что характеристики прибора близки к запланированным. Чувствительность по амплитуде колебаний основания прибора в окрестности 1 Гц, обусловленная шумами емкостного преобразователя малых перемещений пробной массы в электрический сигнал, составила  $\sim 3 \cdot 10^{-10}$  м.

DOI: 10.31857/S0023420621050083

### ВВЕДЕНИЕ

Первые сейсмические наблюдения на Марсе были проведены уже более 42 лет назад, в конце 70-х годов прошлого столетия.

Опыт земной и внеземной (лунной) сейсмологии позволяет рассчитывать, что и на Марсе сейсмология окажется ведущим методом при изучении внутреннего строения планеты, внесет свой вклад в решение как фундаментальных общепланетарных, так и локальных проблем происхождения планет, закономерности их эволюции, характера тектонической активности, природы магнетизма, проблемы воды и пр.

На поверхности Марса планировалась работа двух сейсмических станции – они и летели на космических аппаратах *Викинг*, однако первый сейсмометр, совершивший мягкую посадку на равнине Хриса, не “распаковался” и не включил питание. Зато второй – на равнине Утопия – работал в течение 19 земных месяцев – с 4.IX.1976 по 3.IV.1978, когда истощились источники питания.

Сейсмологи надеялись оценить фон микросейсм, зарегистрировать местные, а если повезет, то и далекие марсотрясения (задача оказалась затруднительной, поскольку регистрация велась

лишь в одной точке), изучить особенности волновой картины. Это позволило бы установить, на что больше похож Марс – на Землю (где бывают четкие вступления волн от границ разделов) или на Луну (где сейсмограмма имеет большую длительность, а в интерференции трудно выделить фазы, соответствующие отдельным границам). Однако, в одной точке, за полтора года, при сильном ветре выполнить эти задачи оказалось непросто, результаты получены минимальные, но даже они позволяют сделать далеко идущие выводы.

Сейсмические измерения на Марсе аппаратом *Викинг* дали очень много несмотря на то, что получена только одна запись от 6.XI.1976, подобная сейсмической. Получены оценки величин ветровых нагрузок на аппарат, получены величины характерных сейсмических шумов в редкие периоды ветрового затишья. Амплитуды сейсмических колебаний при этом составляли единицы микрон в диапазоне частот 1–8 Гц.

Именно сейсмические исследования позволяют получать информацию о глобальных характеристиках планеты в отличие от многих других приборов, данные с которых имеют локальный характер. В этом смысле сейсмические исследо-

вания являются чрезвычайно важными для изучения Марса.

Очередным этапом в получении сейсмической информации о Марсе явилась успешная реализация программы InSight миссии НАСА. 7.XII.2018 спускаемый аппарат сел на поверхность Марса в нагорье Элизий, а 19.XII.2018 с помощью специальной “руки” сейсмометр SEIS был установлен на расстоянии 1.6 м от посадочного аппарата и начались непрерывные измерения колебаний поверхности планеты.

Сейсмометр предоставлен Национальным центром космических исследований при участии Парижского института геофизики.

Резонансная частота сейсмометра – 4 Гц, затухание – 0.6, частотный диапазон –  $(10^{-3}–10)$  Гц. Максимальный динамический диапазон – 176 дБ. Чувствительность прибора по измеряемому ускорению составляет  $10^{-9}$  м/с<sup>2</sup> (Гц)<sup>0.5</sup>, что соответствует смещениям основания  $\sim 3 \cdot 10^{-8}$  см или 3 ангстрема. Частота опроса – 20 измерений/с. Общая масса прибора – 30 кг [6, 9].

Запланированная продолжительность миссии была 720 дней, НАСА продлило проведение эксперимента еще на 2 года, общий объем информации – 29 ГБ. Результаты сейсмических измерений продолжают обрабатываться. Первые результаты обработки приведены в статьях [7, 8, 10, 11]. Сейсмологами отмечается 3 больших загадки Марса, выявленных за 2 года наблюдений.

1. За это время отмечено более 500 марсотрясений. Удивляет прежде всего их скромная мощность – магнитуда не превышает величины 3.7.

2. Ветровая нагрузка не дает возможности выделить полезный сигнал несмотря на то, что в отличие от измерений по программе *Викинг*, сейсмометр установлен не на спускаемом аппарате, а на поверхности Марса и защищен от ветра корпусом прибора.

3. Удивляет отсутствие в записях поверхностных волн, что может быть связано либо с тем, что планета сейсмически спокойна, либо с тем, что обилие трещин экранирует зонд от большинства волн и до сейсмометра доходят только глубинные толчки

Есть надежда, что свою лепту в объяснение этих загадок внесет сейсмометр, о котором идет речь в настоящей статье, входящий в состав научной аппаратуры проекта ЭкзоМарс.

## СТЕПЕНЬ НОВИЗНЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Отличительной особенностью предлагаемого прибора является то, что с его помощью можно получать информацию также глобального характера из наблюдений в низкочастотной области спектра (наклоны, вариации ускорения свобод-

ного падения) за приливными эффектами, деформационными процессами. Из них можно добыть данные об упругих свойствах планеты, вязкости и т.д.

Главная задача – создать прибор, чувствительность которого была бы близка к предельной чувствительности, определяемой собственными тепловыми равновесными флуктуациями.

Однако опыт проекта *Викинг* и программы InSight показал, что основным источником шумов при сейсмических наблюдениях являются переменные ветровые нагрузки, воздействующие на аппарат и создающие инерционный фон, существенно превышающий собственные тепловые шумы сейсмометра.

Идеальным вариантом установки прибора является его заглубление для исключения или, по крайней мере, существенного уменьшения влияния ветровых нагрузок.

Однако для выполнения заглубления прибора требуется разработка и изготовление специальных устройств, что влечет за собой существенное увеличение общей массы. Поэтому предлагается установить прибор непосредственно на поверхности Марса под специальным кожухом, защищающим прибор от прямых воздействий ветровых нагрузок. Необходимо отметить, что в соответствии с требованиями проекта ЭкзоМарс масса прибора не должна превышать 1.7 кг в отличие от сейсмометра проекта InSight с массой 30 кг.

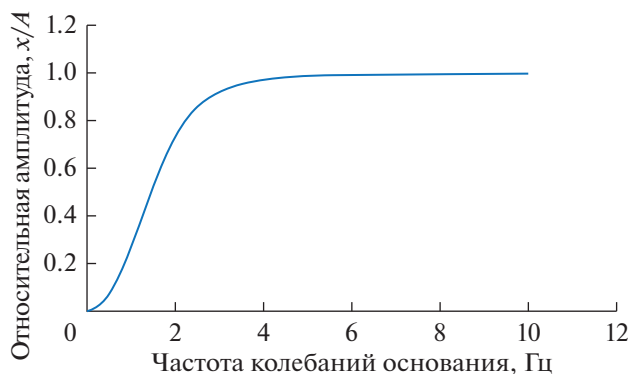
## ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Любой гравиинерциальный прибор, к которому относится и сейсмометр, представляет собой пробную массу, связанную с корпусом прибора упругим и диссипативным элементами, и преобразователь механических перемещений пробной массы относительно корпуса в электрический сигнал. Термин “гравиинерциальный” отражает существование известного принципа эквивалентности, т.е. невозможности отличить инерционное воздействие от гравитационного в одном частотном диапазоне без привлечения дополнительной независимой информации.

Рассмотрим, например, вертикальную составляющую сейсмических колебаний. При вертикальных колебаниях основания на частоте  $p$  с амплитудой  $A$  на пробное тело массы  $m$  действует сила инерции с амплитудой

$$F_{\text{и}} = mA_p^2. \quad (1)$$

Из-за наличия вертикального гравитационного градиента  $W = 2\gamma M/R^3 = 2g/R$  ( $\gamma$  – гравитационная постоянная,  $M$  – масса планеты,  $R$  – ее радиус,  $g$  – ускорение свободного падения) при вертикальных колебаниях основания с амплитудой  $A$



**Рис. 1.** График зависимости амплитуды вынужденных колебаний чувствительной системы сейсмометра от частоты колебаний основания.

изменяется и сила гравитационного притяжения с амплитудой

$$F_{\text{тр}} = mAW = mA2g/R. \quad (2)$$

Из соотношений (1) и (2) можно получить частоту колебаний основания, ниже которой гравитационное воздействие превышает инерционное:  $p < \sqrt{2g/R}$ .

Для Марса это значение  $p \approx 0.00148$  град/с, что соответствует периоду  $\sim 4240$  с. Это означает, что при уменьшении частоты наблюдения начиная с этого порогового значения величина силы, воздействующей на пробную массу не будет уменьшаться в соответствии с (1) пропорционально  $p^2$ , а в соответствии с (2) будет пропорциональна амплитуде  $A$  колебаний основания прибора. Таким образом с помощью этого прибора имеется возможность “залезть” в область ультранизких частот, вплоть до квазистатических, и измерять, наряду с классическими сейсмическими процессами (0.1–10 Гц), явления, связанные с деформационными процессами, включая наклоны, вариации гравитационного поля планеты.

## СХЕМА ПОСТРОЕНИЯ СЕЙСМОМЕТРА

Прибор, разрабатываемый для сейсмических измерений на Марсе в рамках проекта ЭкзоМарс получил название СЭМ (Сейсмометр ЭкзоМарс).

Прибор СЭМ предназначен для измерений микроколебаний поверхности Марса, ее квазистатических движений и вариаций гравитационного поля Марса.

Прибор проводит измерения медленных наклонов основания и вариаций ускорения свободного падения в диапазоне величин от минус  $3 \cdot 10^{-3}$  до  $3 \cdot 10^{-3}$  град с чувствительностью  $3 \cdot 10^{-9}$  град в диапазоне периодов от 100 с до месяцев для наклонов основания и в диапазоне  $1.7 \cdot 10^{-2}$  м/с<sup>2</sup> с

чувствительностью  $\sim 10^{-9}$  м/с<sup>2</sup> для вариаций ускорения свободного падения.

Колебания поверхности по трем взаимно-перпендикулярным осям измеряется в диапазоне частот от 0.1 до 10 Гц с чувствительностью по амплитуде колебаний основания прибора в окрестности 1 Гц около  $4 \cdot 10^{-11}$  м.

Прибор СЭМ устанавливается на поверхности Марса с помощью узла управления доставкой защитного кожуха с прибором на поверхность Марса и должен быть пригоден к эксплуатации в температурном диапазоне от минус 130 до плюс 60°С.

Потребляемая прибором мощность не более 3.5 Вт.

Прибор СЭМ представляет собой моноблок, содержащий три идентичных одноосных акселерометра [3], установленных под углом 90° симметрично относительно гравитационной вертикали.

В каждом канале используется емкостный преобразователь малых механических перемещений пробной массы в электрический сигнал. Изменение емкости связано с изменением координаты пробного тела относительно корпуса прибора. Решение классической задачи о вынужденных колебаниях осциллятора, входящего в состав сейсмометра, под действием внешней силы, силы инерции, дает возможность связать амплитуду  $A$  колебаний основания прибора с амплитудой  $X$  колебаний пробного тела.

$$X = Ap^2 / \left[ (p^2 - w^2)^2 + w^2 p^2 Q^{-2} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где  $w$  – собственная частота осциллятора,  $p$  – частота внешнего воздействия,  $Q$  – добротность осциллятора.

В качестве иллюстрации на рис. 1 приведен график зависимости относительной амплитуды вынужденных колебаний механической чувствительной системы сейсмометра в зависимости от частоты колебаний основания. Параметры осциллятора близки к реальным:  $w = 2$  Гц,  $Q = 0.7$ .

Частотная область работы классического сейсмометра – область, где  $X \approx A$ , т.е. область  $p \geq w$ . Этим объясняется желание создать механическую систему сейсмометра с низкой собственной частотой для того, чтобы измерять колебания основания прибора на более низкой частоте. Однако с использованием современной радиоэлектроники для схем преобразователей малых механических колебаний пробных масс в электрический сигнал, острота необходимости создания очень низкочастотных механических систем отпала.

Применение радиофизических преобразователей с малым уровнем собственных шумов позволяет получать информацию о низкочастотных сейсмических колебаниях и для механических систем относительно высокочастотных. Отлича-

ются разные приборы только величиной параметров используемых элементов, которые определяют основные характеристики прибора: частотный диапазон, затухание, предельное разрешение, динамический диапазон и т.п.

**ОДНОКООРДИНАТНЫЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ПРИБОРА**

Чувствительная механическая система для прибора СЭМ отличается тем, что в ней одноосность обеспечивается самими элементами механической жесткости. Схема такой системы представлена на рис. 2.

Пробное тело *1* в форме цилиндра удерживается по оси *Z* (ось чувствительности), а также по осям *X* и *Y* с помощью двух блоков растяжек *5*, установленных вблизи двух торцов цилиндра. Каждый блок растяжек представляет собой три тонких стержня (нити) или три ленты из тонкой фольги, размещенных под углом 120° и соединенных одним концом с пробной массой, а другим — с корпусным элементом *7* прибора, имеющим форму полого цилиндра, соосного с пробной массой. Движения пробного тела *1* по оси *Z* измеряются с помощью емкостного преобразователя. На рис. 2 показана только роторная пластина *2* измерительной дифференциальной емкости, соединенная с пробной массой, и неподвижные пластины *3* и *4* измерительной емкости.

Если диаметр каждой растяжки *D*, а длина *l*, то коэффициент жесткости такого подвеса по оси *Z* будет [4]:

$$K = 9\pi ED^4 / 32l^3, \tag{4}$$

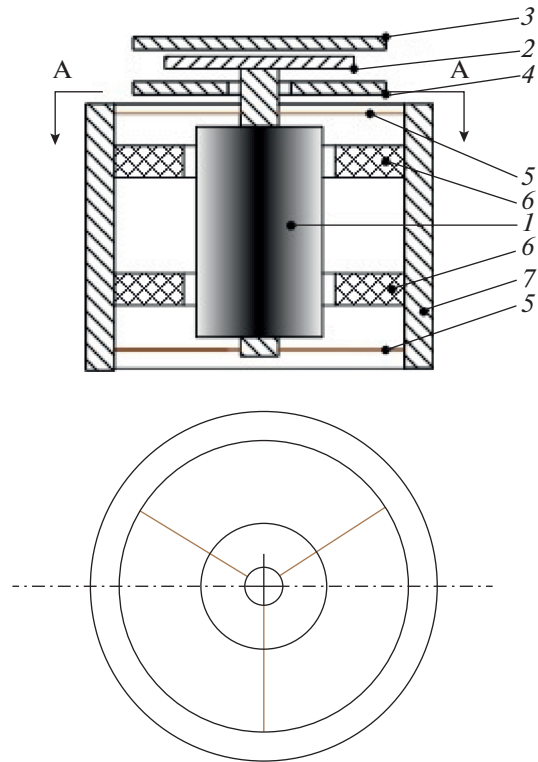
где *E* — модуль Юнга материала растяжки. При величине пробной массы *m*, собственная частота такой колебательной системы

$$\omega_0 = \sqrt{9\pi ED^4 / m32l^3}. \tag{5}$$

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

$$a_{\min} \approx \omega_0 \sqrt{\Theta / m}, \tag{6}$$

для этих двух случаев составит от 4.2 · 10<sup>-9</sup> м/с<sup>2</sup> до 8 · 10<sup>-12</sup> м/с<sup>2</sup> (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. На первый взгляд настораживает применение тонких растяжек диаметром от 0.1 до 0.01 мм. Чтобы растяжки выдержали большие



**Рис. 2.** Схема чувствительной механической системы прибора СЭМ.

вибрационные и ударные нагрузки при выведении КА на орбиту, в конструкции прибора предусмотрены специальные элементы *б* (см. рис. 1). Зазор между ними и пробной массой составляет величину *d*. Удлинение Δ*x* растяжки диаметром *D* под действием ускорения *a* в плоскости *X**Y* составит величину  $\Delta x = aml / SE = 4aml / \pi D^2 E$ . Для случая, когда Δ*x* = *d*, соответствующее ускорение

$$a = d\pi D^2 E / 4ml. \tag{7}$$

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

Сравнивая это напряжение с максимальным разрывным напряжением *T<sub>p</sub>* для материала растяжки, получим максимальное ускорение, которое выдержит растяжка:

$$a_{\max} = T_p \pi D^2 / 4m. \tag{8}$$

При воздействии ускорения на акселерометр растяжка начнет упруго растягиваться, и пробная масса упрется в элементы *б* конструкции прибора. Чтобы не было разрыва растяжек, необходимо, чтобы *a*, определяемое (7), было много меньше *a<sub>max</sub>* (8), например,  $a = a_{\max} / 10$  (10-кратный запас по прочности). Из последнего равенства определяется требование к величине зазора *d*:

$$d \approx T_p l / 10E. \tag{9}$$

Как правило  $T_p/E \approx 10^{-2}$  и формулу (9) можно приближенно переписать в виде:

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

Зависимость от величины массы  $m$  и диаметра растяжки  $D$  в (10), естественно, выпала. Так, при  $l = 10$  мм,  $d = 10\text{--}20$  мкм.

Роль элементов  $b$  конструкции прибора при механических нагрузках, ускорениях по оси  $Z$  выполняют неподвижные пластины дифференциальной измерительной емкости, между которыми находится подвижная пластина, связанная с пробной массой акселерометра. Приведем простые оценки величины механического напряжения в растяжке при воздействии ускорения по оси  $Z$ .

Воспользуемся формулой (4) для жесткости подвеса на растяжках. Если зазоры между подвижной и неподвижными пластинами конденсатора  $d$ , то относительное удлинение растяжки, когда подвижная пластина коснется неподвижной, составит:

$$\Delta l/l \approx \frac{1}{2}(d/l)^2.$$

Механическое напряжение в растяжке при этом из закона Гука:

$$T = E(\Delta l/l) \approx E \frac{1}{2}(d/l)^2.$$

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  $a_m \sim 2 \cdot 10^{-2}$  м/с<sup>2</sup>. При ускорениях, превышающих  $a_m$ , подвижная пластина просто прижмется к одной из неподвижных пластин и нагрузки на растяжки не будет.

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

Упругий элемент — растяжка представляет собой стержень кругового сечения либо тонкую ленту и является важнейшей частью датчика. Для его изготовления требуется материал, для 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 счет 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 закаленном 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 минус 200 до плюс 600°C практически линейно для бериллиевой бронзы, термоупругий коэффициент  $\sim -2.4 \cdot 10^{-4}$  1/К. Поэтому в приборе в качестве упругих элементов — растяжек — желательно использовать тонкие стержни или ленты из бериллиевой бронзы.

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.

Для металлических пружин соответствующая величина дрейфа составляет обычно  $\sim 10^{-7}a_{\max}/\text{сут}$ .

При посадке на планету солнечной системы в присутствии силы тяжести механической жесткости подвеса из растяжек может не хватить, необходимо ещё одно, независимое силовое воздействие на пробную массу датчика. Эта проблема решается использованием двух постоянных магнитов, один из которых устанавливается в корпусе прибора, другой — на пробной массе, так что на пробную массу будет действовать дополнительная сила, направленная вверх, поскольку магниты повернуты друг к другу одноименными полюсами.

Если намагниченность магнитов  $J_1$  и  $J_2$  (магниты цилиндрической формы установлены соосно), объемы магнитов  $V_1$  и  $V_2$  соответственно, а расстояние между магнитами  $z$ , то сила, действующая на пробную массу будет [5]

$$F \approx 3\mu_0 J_1 V_1 J_2 V_2 / 2\pi z^4. \quad (11)$$



Параметры магнитной системы необходимо подобрать так, чтобы  $F \approx mg_1$ , где  $g_1$  – проекция вектора ускорения свободного падения на ось чувствительности датчика. Поскольку магнитное поле цилиндрических магнитов неоднородно и  $F$  есть функция расстояния  $z$  (11), то в механическую систему датчика вносится дополнительная жесткость  $K_{\text{магн}} = dF/dz = 6\mu_0 J_1 V_1 J_2 V_2 / \pi z^5$ , и квадрат собственной частоты осциллятора, определяемый взаимодействием магнитов  $\omega^2 = 4g_1/z$ . Эта жесткость вместе с механической жесткостью растяжек  $K_{\text{мех}}$  и определяет собственную частоту колебаний пробного тела и предельную чувствительность датчика на фоне собственных тепловых шумов.

Простые расчеты, подтвержденные реализацией датчиков, показали, что при условии полной компенсации веса пробной массы силой взаимного отталкивания магнитов, магнитная жесткость не зависит от намагниченности магнитов, а зависит только от расстояния между магнитами  $z$  и величины проекции ускорения свободного падения  $g_1$  на ось чувствительности датчика:  $k_m = 4mg_1/z$ . Здесь  $m$  – величина пробной массы. Соответствующая частота собственных колебаний пробной массы, определяемая магнитной жесткостью,  $\omega = 2\sqrt{g_1/z}$ . В условиях наземной лаборатории при  $z = 2$  см, собственная частота механического осциллятора составляет  $\sim 5$  Гц, а на поверхности Марса  $\sim 3$  Гц.

Рис. 3 (вид сбоку (а) и вид сверху (б)) поясняет геометрию установки однокоординатных датчиков в приборе.

Каждый датчик установлен под углом  $\phi = \arctg\sqrt{2} \approx 0.955$  град или 54.736 град дуги. Если датчики ориентированы так, что (рис. 3б) 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, причем горизонтальная составляющая направлена под углом  $\beta$  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:

$$\begin{aligned} a_1 &= a_r \cos\beta \sin\phi + a_v \cos\phi, \\ a_2 &= a_r \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \beta\right) \sin\phi + a_v \cos\phi, \\ a_3 &= -a_r \cos\left(\beta - \frac{\pi}{3}\right) \sin\phi + a_v \cos\phi. \end{aligned} \quad (12)$$

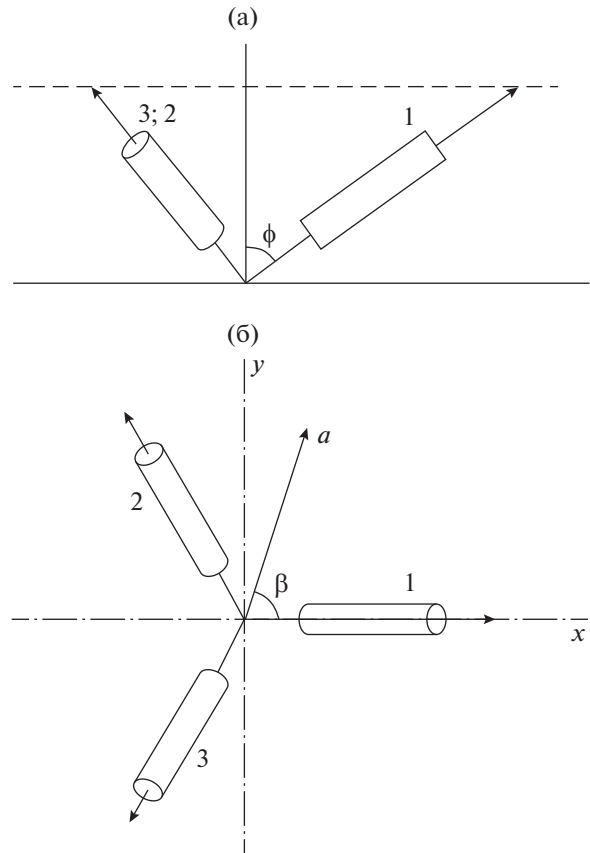


Рис. 3. Схема установки однокоординатных датчиков в приборе СЭМ.

Из системы 3-х уравнений (12) по измеренным  $a_1, a_2, a_3$  можно найти  $a_v, a_r$  и угол  $\beta$ , т.е. вектор мгновенного ускорения основания прибора.

*Предельная чувствительность, определяемая тепловыми шумами*

Основные характеристики прибора, предназначенного для регистрации микроколебаний приповерхностных структур Марса – чувствительность измерения амплитуды смещений поверхности в районе частоты 1 Гц –  $4 \cdot 10^{-11}$  м. Предельная чувствительность прибора определяется собственными тепловыми флуктуациями чувствительного элемента – механического осциллятора. Это вытекает из теоремы о равномерном распределении энергии по степеням свободы. В соответствии с теоремой Найквиста наличие в механическом осцилляторе диссипативного элемента, характеризующегося коэффициентом трения  $h$ , означает, что на пробную массу осциллятора действует флуктуационная сила со спектральной плотностью мощности  $F_p^2 = 4kTh$  ( $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура). Условие обнаружения малой силы  $F(t)$  имеет вид [1]:

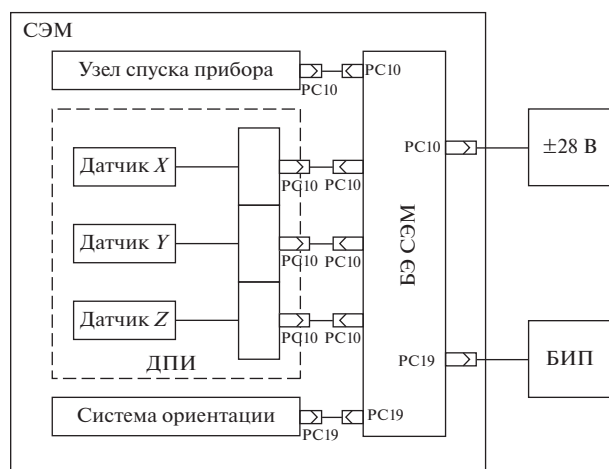


Рис. 4. Блок-схема прибора СЭМ.

$F(t) \geq \sqrt{4\kappa T h \Delta f}$ , где  $\Delta f$  – полоса частот, внутри которой лежит основная часть спектра  $F(t)$ . При колебании основания прибора вследствие сейсмического воздействия амплитуды  $A$  и круговой частоты  $p$ , амплитуда силы инерции, действующей на пробную массу,  $F(t) = mA\rho^2$ . Следовательно, минимально обнаружимая на фоне собственных тепловых шумов амплитуда сейсмических колебаний  $A_{\min} = (2/p^2) \sqrt{\kappa T \omega_0 \Delta f / mQ}$ , где  $\omega_0$  – собственная частота осциллятора,  $m$  – величина пробной массы,  $Q$  – добротность осциллятора. Для  $m = 50$  г,  $\omega_0 = 4\pi$  град/с,  $Q = 1$  и  $\Delta f = 1$  Гц,  $A_{\min} = 3 \cdot 10^{-9}$  см при  $p = 2\pi$  град/с. При  $p = 20\pi$  град/с,  $A_{\min} \approx 3 \cdot 10^{-11}$  см =  $3 \cdot 10^{-13}$  м.

Динамический диапазон измеряемых смещений –  $10^{-5}$  м.

Частотный диапазон измеряемых сейсмических колебаний марсианской поверхности –  $10^{-1}$ – $10$  Гц. Выбранный частотный и динамический диапазоны обеспечивают возможность наблюдения разнообразных сейсмических событий.

### СОСТАВ ПРИБОРА

Прибор СЭМ представляет собой моноблок, устанавливаемый на боковую поверхность восьмигранного корпуса посадочной платформы (ПП) КА. После посадки для проведения непрерывных измерений прибор СЭМ устанавливается непосредственно на поверхность Марса. Прибор предохранен от прямого воздействия ветровых нагрузок защитным кожухом, доставляемым на поверхность специальным устройством.

Блок-схема прибора СЭМ представлена на рис. 4.

На этой схеме ДПИ – блок датчиков первичной информации, включающий три однокоординатных чувствительных элемента (на схеме условно обозначены как датчик  $x, y, z$ ) с емкостными преобразователями перемещений пробной массы в электрический сигнал. С трех емкостных преобразователей сигналы поступают в блок электроники БЭ СЭМ для передачи информации по высокоскоростному интерфейсу в блок интерфейсов и памяти БИП, который обслуживает все приборы, входящие в комплекс научной аппаратуры посадочной платформы.

Узел спуска прибора необходим для доставки сейсмометра в защитном корпусе-кожухе на поверхность Марса. Он представляет собой пантограф с укрепленным на нем защитным кожухом с блоком датчиков внутри. Пантограф раскрывается после подачи команды, открывающей специальный замок, удерживающий пантограф в сложенном состоянии во время перелета КА и его посадки.

После установки кожуха с помощью узла спуска прибора на поверхность Марса, блок датчиков, укрепленный внутри кожуха, по команде программы спуска сбрасывается на поверхность с высоты в  $\sim 5$  мм. Работа датчиков в режиме мониторинга начинается после установки блока датчиков по местной гравитационной вертикали с помощью “системы ориентации”. Для этого блок датчиков сначала с помощью электромагнита вывешивается на кардановом подвесе по местной гравитационной вертикали, а затем, после снятия напряжения с электромагнита, опускается на опору и фиксируется на ней. Эту операцию при необходимости можно повторить, если деформационные процессы на поверхности Марса нарушат первоначальную установку прибора по вертикали.

На рис. 5 изображен кожух, защищающий прибор от прямых ветровых нагрузок с блоком датчиков внутри него.

### Емкостный преобразователь

Для измерения колебаний и механических смещений пробной массы предназначен емкостный преобразователь, построенный на основе использования микросхемы AD7746. Данная микросхема позволяет измерять дифференциальную емкость в диапазоне  $\pm 8$  пФ с разрешением в несколько аФ ( $1$  аФ =  $10^{-6}$  пФ). Проведенные измерения с макетом прибора в лабораторных помещениях ИКИ РАН, показали, что шумы составляют несколько аФ и определяются в основном уровнем техногенных шумов в здании. При замене измерительной емкости на постоянную шумов падают до нескольких аФ, что свидетельствует о возможности регистрации гравиинерционных сигналов на уровне  $\sim 10^{-8}$  м/с<sup>2</sup> в условиях малого уровня техногенных шумов.

**ФИЗИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ  
ПРИБОРА СЭМ**

Для проверки характеристик созданных макетов и штатного образца прибора СЭМ были проведены его функциональные, физические испытания.

Целью проведения испытаний является:

- определение крутизны преобразования датчиков первичной информации по реакции на наклоны основания блока датчиков первичной информации;
- определение предельной чувствительности датчиков по уровню собственных флуктуаций емкостного преобразователя.

Для проведения испытаний прибор был установлен на наклонномерную плиту из дюралюминия толщиной 30 мм. Схематичное изображение плиты с тремя резьбовыми отверстиями *A*, *B* и *C* винтами М8 представлено на рис. 6.

На плите точка *C* – неподвижна (винт в этой точке законтрен), точки *A* и *B* – подвижны. С помощью винтов с шагом резьбы  $h = 1.25$  мм можно наклонять плиту вокруг осей *BC* и *AC* соответственно. Поскольку расстояние от точек *A* и *B* до соответствующих осей равно  $b = 343$  мм, то величина угла наклона  $\Delta\beta$  плиты при повороте винта на один оборот составит  $\Delta\beta = h/b = 1.25/343 = 3.6 \cdot 10^{-3}$  град.

*Определение крутизны преобразования датчиков первичной информации по реакции на наклоны основания блока датчиков первичной информации*

Прибор СЭМ устанавливается на плите таким образом, чтобы проекции осей чувствительности датчиков располагались так, как показано на рис. 6 (проекция оси чувствительности датчика 1 прибора 4 – вдоль линии наклона вокруг *BC*, а оси чувствительности датчиков 2 и 3 под углом  $\pm 60^\circ$  к линии наклона).

Пусть задаваемый наклон составляет  $\Delta\beta$  град (случай опускания точки *A* – изображен стрелкой вдоль линии наклона). Для датчика 1 – это отрицательное направление. При этом наклоны для датчиков 2 и 3 составят  $\Delta\beta/2$  в положительном направлении.

Каждый датчик наклонен в вертикальной плоскости так, что угол между его осью чувствительности и гравитационной вертикалью составляет  $\beta$ , и проекция вектора ускорения свободного падения на ось чувствительности каждого датчика составляет

$$a = g \cos \beta; (\cos \beta = 1/\sqrt{3}; \sin \beta = \sqrt{2}/\sqrt{3}).$$

Изменение проекции ускорения свободного падения на ось чувствительности датчика при наклоне плиты на угол  $\Delta\beta$

$$\Delta a = -g \sin \beta \Delta \beta = -g \cdot 0.8165 \Delta \beta.$$

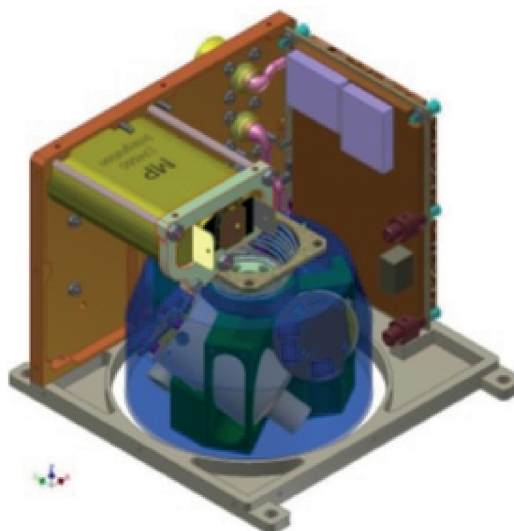


Рис. 5. Блок датчиков в защитном кожухе.

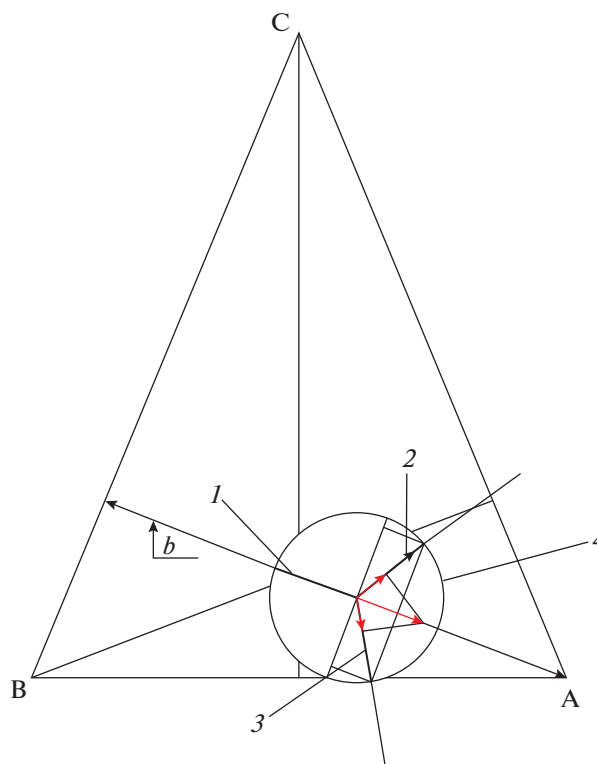


Рис. 6. Наклономерная плита (схематичное изображение).

Таким образом, при наклоне плиты на угол  $\Delta\beta$  получаем:

для датчика 1 –  $\Delta a_1 = g \sin \beta \Delta \beta$ ; для датчика 2 –  $\Delta a_2 = -g \sin \beta \Delta \beta / 2$ ;

для датчика 3 –  $\Delta a_3 = -g \sin \beta \Delta \beta / 2$ .

С учетом  $\Delta\beta = 3.6 \cdot 10^{-3}$  град, полученное при одном обороте регулировочного винта, измене-



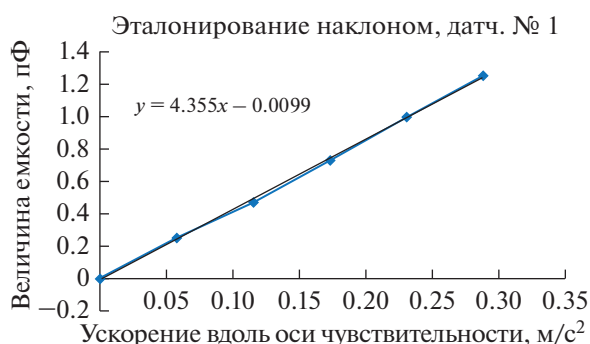


Рис. 7. Результаты эталонирования датчика 1.

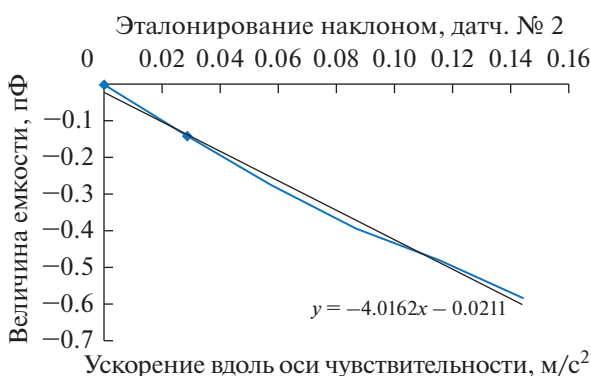


Рис. 8. Результаты эталонирования датчика 2.

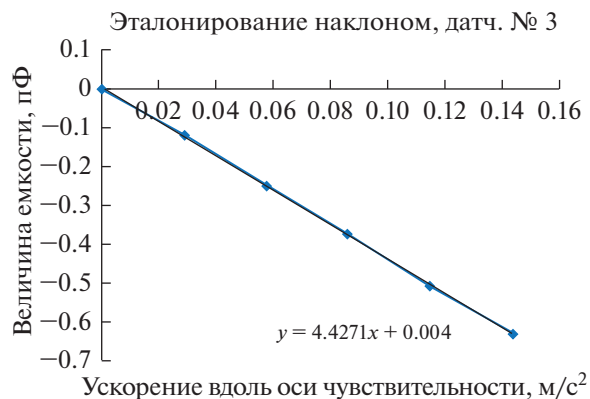


Рис. 9. Результаты эталонирования датчика 3.

ние проекций ускорения свободного падения на оси чувствительности датчиков:

$$\Delta a_1 \approx 2.88 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2; \Delta a_2 = \Delta a_3 \approx -1.44 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2.$$

После установки наклономерной плиты в горизонтальное положение с точностью 10 угл. с помощью оптического квадранта КО-10, было проведено эталонирование прибора СЭМ методом наклонов.

Датчик 2 прибора СЭМ расположен вдоль линии наклона, изменение проекции ускорения свободного падения на ось чувствительности датчика 2 на один оборот регулировочного винта плиты – 0.0288 м/с<sup>2</sup>.

Изменение ускорений для датчиков 1 и 3 на один оборот регулировочного винта плиты – 0.0144 м/с<sup>2</sup> с обратным знаком.

На рис. 7, 8 и 9 приведены результаты эталонирования прибора СЭМ (один шаг наклона плиты – два оборота регулировочного винта плиты).

Среднее значение крутизны преобразования:

$$\text{для датчика 1. } K_{\text{ср1}} = \Sigma Ki_1/n \approx 4.27 \text{ пФ/м/с}^2.$$

$$\text{для датчика 2. } K_{\text{ср2}} = \Sigma Ki_2/n \approx 4.45 \text{ пФ/м/с}^2.$$

$$\text{для датчика 3. } K_{\text{ср3}} = \Sigma Ki_3/n \approx 4.33 \text{ пФ/м/с}^2.$$

Среднее значение крутизны преобразования по трем одноосным датчикам СЭМ составляет  $K_{\text{ср}} = 4.35 \text{ пФ/м/с}^2$ .

Уход крутизны преобразования всех датчиков не превышает 10% относительно величины среднего значения  $K_{\text{ср}}$ .

*Определение предельной чувствительности датчиков по уровню собственных тепловых флуктуаций механического осциллятора и флуктуаций емкостного преобразователя*

Величина предельной чувствительности прибора определяется собственными тепловыми равновесными флуктуациями механического осциллятора каждого чувствительного элемента – датчика. При этом минимально обнаружимое ускорение определяется соотношением (4):

$a_{\text{min}} = \omega_0 \sqrt{kT/m}$ , где  $\omega_0$  – собственная частота механического осциллятора,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $m$  – величина пробной массы осциллятора. Для реальных  $\omega_0 \approx 2\pi \cdot 4$  град/с,  $k = 1.38 \cdot 10^{-16}$  эрг/гр,  $T = 300$  К,  $m \approx 20$  г,

$$a_{\text{min}} \approx 1 \cdot 10^{-6} \text{ см/с}^2 = 1 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2.$$

В условиях наземной лаборатории величина шумов определяется всевозможными техногенными воздействиями и составляет  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  м/с<sup>2</sup>, в зависимости от времени суток, когда проводятся измерения. Поэтому получить прямую экспериментальную оценку влияния тепловых равновесных флуктуаций на фоне шумов в основном техногенного происхождения не удастся.

Существует еще один источник шумов, также ограничивающий предельную чувствительность прибора по измеряемым ускорениям. Это – емкостный преобразователь малых механических смещений пробной массы, построенный, в данном случае, на основе микросхемы AD7747, с помощью которого измеряется величина дифференциальной емкости.

Минимальная величина емкости, измеряемой с помощью этой микросхемы, составляет  $\Delta C_{\text{min}} \approx 1$  аФ (или  $10^{-6}$  пФ). С помощью этой величины и возможно оценить минимально обнаружимое

ускорение, используя значение крутизны преобразования  $K$  каждого датчика, полученное при эталонировании методом наклонов. Оно определяется соотношением:

$$a_{\min} = \Delta C_{\min}/K. \quad (13)$$

Используя (13) для датчиков 1, 2 и 3, рассчитаем минимально обнаружимое ускорение:  $a_{\min 1} \approx \approx 2.34 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2$ ;  $a_{\min 2} \approx 2.25 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2$ ;  $a_{\min 3} \approx \approx 2.31 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2$ .

При эталонировании методом наклонов задавалось несколько значений углов наклона плиты с установленным на ней прибором и несколько соответствующих значений ускорений вдоль оси чувствительности датчиков. Величина динамического диапазона определяется тем значением изменения проекции ускорения свободного падения на ось чувствительности датчика, при котором отступление от линейной зависимости показаний емкостного преобразователя от воздействующего ускорения будет более 10%.

Ни в одном случае, по результатам эталонирования, отступление от линейности графика показаний емкостного преобразователя не достигает 10%. Поэтому в качестве мажорирующей оценки величины динамического диапазона прибора можно принять  $a_{\text{дл}} = 1.4 \cdot 10^{-1} \text{ м/с}^2$ .

Величины минимальных измеряемых наклонов основания прибора несложно получить из результатов эталонирования, поскольку оно осуществляется методом наклонов. Учитывая, что один оборот регулировочного винта плиты соответствует наклону корпуса прибора на угол  $3.6 \cdot 10^{-3}$  град, очевидно, что минимальный угол наклона основания, который можно измерить с помощью этого прибора, составляет  $2.9 \cdot 10^{-8}$  град в диапазоне  $\pm 1.7 \cdot 10^{-2}$  град.

Величина минимально обнаружимых углов наклона прибора  $2.9 \cdot 10^{-8}$  град определяет величину минимально обнаружимых изменений ускорения свободного падения, которая составляет  $2.4 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2$  в динамическом диапазоне  $1.4 \cdot 10^{-1} \text{ м/с}^2$ .

Чувствительность по амплитуде вертикальных  $A_{\text{в}}$  и горизонтальных  $A_{\text{г}}$  колебаний основания прибора в окрестности  $f = 1$  Гц определяется из простых соотношений:  $A_{\text{в}} = a_{\min}/(2\pi f)^2 \cos \beta$ ;  $A_{\text{г}} = a_{\min}/(2\pi f)^2 \sin \beta$ .

Для  $a_{\min} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2$ , определяемого тепловыми флуктуациями механического осциллятора, получаем:  $A_{\text{в}} \approx 4.4 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ;  $A_{\text{г}} \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ .

## ВЫВОДЫ

Исследования, проведенные в ходе разработки и создания прибора СЭМ, и результаты испытаний, в первую очередь физических испытаний, по-

казали, что основные принципы, заложенные при создании этого устройства, оправдались. В результате проведенных работ получен прибор, основные характеристики которого близки к запланированным. Выявлены возможности усовершенствования сейсмометра, являющегося одновременно гравиметром и наклономером, связанные с внесением изменений в конструкцию емкостного преобразователя и уменьшением зазоров в измерительных дифференциальных емкостях, внесением изменений в технологию сборки “растяжек” и применением лент из бериллиевой бронзы меньшей толщины, увеличением расстояния между постоянными магнитами для снижения собственной частоты колебаний пробной массы.

Разработанный прибор может найти применение при измерениях на Земле для получения не только сейсмической информации, но и информации о геодинамических и деформационных процессах в области сверхнизких частот, вплоть до квазистатических вариаций наклонов и ускорения свободного падения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брагинский В.Б., Манукин А.Б. Измерение малых сил в физических экспериментах. М.: Наука, 1974.
2. Гусев Г.А., Манукин А.Б. Предельная чувствительность гравиинерциальных приборов при измерении квазистатических процессов // Физика Земли. 1985. № 9. С. 90–95.
3. Манукин А.Б., Казанцева О.С., Калинин И.И. Новый вариант высокочувствительного одноосного датчика сейсмоакселерометра // Сейсмические приборы. 2018. Т. 54. № 4. С. 66–76. <https://doi.org/10.21455/si2018.4-5>
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1987.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1992.
6. Lognonné P. Planetary seismology // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2005. V. 33. № 1. P. 571–604.
7. Golombek M., Grott M., Kargl G. et al. Geology and Physical Properties Investigations by the InSight Lander // Space Sci. Rev. 2018. V. 214. № 84. Article number 84. <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0512-7>
8. Smrekar S.E., Lognonné P., Spohn T. et al. Pre-Mission InSights on the Interior of Mars // Space Sci. Rev. 2019. V. 215. № 3. P. 1–72.
9. Knapmeyer-Endrun B., Kawamura T. NASA’s InSight mission on Mars—first glimpses of the planet’s interior from seismology // Nat. Commun. 2020. V. 11. № 1. P. 1451. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15251-7>
10. Giardini D., Lognonné P., Banerdt W.B. et al. The seismicity of Mars // Nat. Geosci. 2020. V. 5. P. 205–212. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0539-8>
11. Pan L., Quantin C., Tauzin B. et al. Crust heterogeneities and structure at the dichotomy boundary in western Elysium Planitia and Implications for InSight lander // Icarus. 2020. V. 338. P. 113511. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.113511>