

УДК 539.1.074.3:621.383.292

## МИКРОФОННЫЙ ЭФФЕКТ В СЦИНТИЛЛЯЦИОННОМ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРЕ В УСЛОВИЯХ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА БОРТУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

© 2017 г. Вострухин А.А.<sup>1</sup>, Головин Д.В.<sup>1</sup>, Козырев А.С.<sup>1</sup>, Литвак М.Л.<sup>1</sup>,

Малахов А.В.<sup>1</sup>, Митрофанов И.Г.<sup>1</sup>, Мокроусов М.И.<sup>1</sup>,

Томилина Т.М.<sup>2</sup>, Гребенников А.С.<sup>2</sup>, Лактионова М.М.<sup>2</sup>, Бахтин Б.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН)

Ул. Профсоюзная, 84/32, г. Москва, Российская Федерация, 117997, e-mail: iki@cosmos.ru

<sup>2</sup>Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН)

Малый Харитоньевский пер., 4, г. Москва, Российская Федерация, 101990, e-mail: info@imash.ru

*Для задач космической ядерной планетологии по изучению элементного состава планет и их спутников, а также для исследования потоков космического излучения, в т. ч. и вторичного, широкое распространение получили сцинтилляционные детекторы на основе фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). При поглощении ионизирующего излучения в объеме сцинтиллятора излучаются фотоны, которые регистрируются ФЭУ. Известно, что ФЭУ подвержено влиянию микрофонного эффекта, при котором внешнее вибрационное воздействие приводит к появлению электрических шумов. На борту космических аппаратов присутствуют различные источники вибрации: гиродины, насосы, поворотные устройства и пр., которые могут существенно повлиять на результаты измерений.*

*В статье рассмотрено влияние микровибрации на работу ФЭУ, которое приводит к возникновению шумов при измерениях потоков нейтронов и гамма-лучей детекторами на борту космических аппаратов. Приведены результаты испытаний фотоэлектронного умножителя Hamamatsu R1840 на восприимчивость к микровибрации и определены уровни возникновения шумов.*

**Ключевые слова:** микрофонный эффект, фотоэлектронные умножители.

## MICROPHONICS IN SCINTILLATION GAMMA-SPECTROMETER IN VIBRATION ENVIRONMENT ONBOARD SPACECRAFT

Vostrukhin A.A.<sup>1</sup>, Golovin D.V.<sup>1</sup>, Kozyrev A.S.<sup>1</sup>, Litvak M.L.<sup>1</sup>, Malakhov A.V.<sup>1</sup>, Mitrofanov I.G.<sup>1</sup>,

Mokrousov M.I.<sup>1</sup>, Tomilina T.M.<sup>2</sup>, Grebennikov A.S.<sup>2</sup>, Laktionova M.M.<sup>2</sup>, Bakhtin B.N.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI RAS)

84/32 Profsoyuznaya str., Moscow, 117997, Russian Federation, e-mail: iki@cosmos.ru

<sup>2</sup>A. Blagonravov Institute of Machines Science of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAS)

4 Maly Kharitonievskiy per., Moscow, 101990, Russian Federation, e-mail: info@imash.ru

*Scintillation detectors based on photomultiplier tubes (PMT) are widely used for the purposes of space nuclear planetology that studies elemental composition of planets and their moons, as well as cosmic ray fluxes, including secondary radiation. When ionization radiation is absorbed throughout a scintillator, photons are emitted, that is detected by PMT. Measurements with PMT are known for their susceptibility to external vibration that results in electrical noise, known as microphonics. Spacecraft design assumes a number of different vibration sources, like gyros, pumps, rotating devices, etc., that can provide significant effect on measurements.*

*This article describes a study of microvibration effect on performance of the photomultiplier tube, that results in noise generation when neutron and gamma ray fluxes are measured by detectors onboard the spacecraft. Vibration susceptibility test results for Hamamatsu R1840 PMT are provided, and levels of noise generation are determined.*

**Key words:** microphonics, photomultiplier tubes.

ВОСТРУХИН Андрей Александрович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИКИ РАН, e-mail: [vostrukhin@np.cosmos.ru](mailto:vostrukhin@np.cosmos.ru)

VOSTRUKHIN Andrey Alexandrovich — Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior research scientist at IKI RAS, e-mail: [vostrukhin@np.cosmos.ru](mailto:vostrukhin@np.cosmos.ru)

ГОЛОВИН Дмитрий Васильевич — инженер ИКИ РАН, e-mail: [golovin@np.cosmos.ru](mailto:golovin@np.cosmos.ru)

GOLOVIN Dmitry Vasilyevich — Engineer at IKI RAS, e-mail: [golovin@np.cosmos.ru](mailto:golovin@np.cosmos.ru)

КОЗЫРЕВ Александр Сергеевич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИКИ РАН, e-mail: [kozyrev@mx.iki.rssi.ru](mailto:kozyrev@mx.iki.rssi.ru)

KOZYREV Alexander Sergeevich — Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior research scientist at IKI RAS, e-mail: [kozyrev@mx.iki.rssi.ru](mailto:kozyrev@mx.iki.rssi.ru)

ЛИТВАК Максим Леонидович — доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией ИКИ РАН, e-mail: [mlitvak.iki@gmail.com](mailto:mlitvak.iki@gmail.com)

LITVAK Maksim Leonidovich — Doctor of Science (Physics and Mathematics), Head of Laboratory at IKI RAS, e-mail: [mlitvak.iki@gmail.com](mailto:mlitvak.iki@gmail.com)

МАЛАХОВ Алексей Владимирович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИКИ РАН, e-mail: [malakhov@iki.rssi.ru](mailto:malakhov@iki.rssi.ru)

MALAKHOV Aleksey Vladimirovich — Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior research scientist at IKI RAS, e-mail: [malakhov@iki.rssi.ru](mailto:malakhov@iki.rssi.ru)

МИТРОФАНОВ Игорь Георгиевич — доктор физико-математических наук, начальник отдела ИКИ РАН, e-mail: [mitrofanov@np.cosmos.ru](mailto:mitrofanov@np.cosmos.ru)

MITROFANOV Igor Georgievich — Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Head of Department at IKI RAS, e-mail: [mitrofanov@np.cosmos.ru](mailto:mitrofanov@np.cosmos.ru)

МОКРОУСОВ Максим Игоревич — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией ИКИ РАН, e-mail: [mokromax@iki.rssi.ru](mailto:mokromax@iki.rssi.ru)

MOKROUSOV Maksim Igorevich — Candidate of Science (Physics and Mathematics), Head of Laboratory at IKI RAS, e-mail: [mokromax@iki.rssi.ru](mailto:mokromax@iki.rssi.ru)

ТОМИЛИНА Татьяна Михайловна — кандидат технических наук, заведующая лабораторией ИМАШ РАН, e-mail: [tatiana@imash.ac.ru](mailto:tatiana@imash.ac.ru)

TOMILINA Tatiana Mikhaylovna — Candidate of Science (Engineering), Head of Laboratory at IMASH RAS, e-mail: [tatiana@imash.ac.ru](mailto:tatiana@imash.ac.ru)

ГРЕБЕННИКОВ Александр Степанович — старший научный сотрудник ИМАШ РАН, e-mail: [grebennikov@imash.ac.ru](mailto:grebennikov@imash.ac.ru)

GREBENNIKOV Alexander Stepanovich — Senior research scientist at IMASH RAS, e-mail: [grebennikov@imash.ac.ru](mailto:grebennikov@imash.ac.ru)

ЛАКТИОНОВА Мария Михайловна — научный сотрудник ИМАШ РАН, e-mail: [laktionova@imash.ac.ru](mailto:laktionova@imash.ac.ru)

LAKTIONOVA Maria Mikhaylovna — Research scientist at IMASH RAS, e-mail: [laktionova@imash.ac.ru](mailto:laktionova@imash.ac.ru)

БАХТИН Борис Николаевич — научный сотрудник ИМАШ РАН, e-mail: [bakhtin@imash.ac.ru](mailto:bakhtin@imash.ac.ru)

BAKHTIN Boris Nikolaevich — Research scientist at IMASH RAS, e-mail: [bakhtin@imash.ac.ru](mailto:bakhtin@imash.ac.ru)

## Введение

Для регистрации элементарных частиц и гамма-квантов в научных исследованиях и промышленности широко используются сцинтилляционные детекторы. При прохождении элементарной частицы через регистрирующий объем сцинтилляционного детектора возникает световая вспышка в видимом или ультрафиолетовом диапазоне. Регистрация вспышки производится вакуумными фотоэлектронными умножителями (ФЭУ), полупроводниковыми фотодиодами или так называемыми полупроводниковыми ФЭУ на основе лавинного фотодиода. На данный момент, несмотря на значительный прогресс в разработке полупроводниковых ФЭУ, в исследованиях по космической гамма- и нейтронной спектроскопии наиболее распространенными являются традиционные вакуумные ФЭУ.

Конструктивно ФЭУ представляет собой вакуумный корпус, внутри которого расположены фотокатод, анод и диноды. При попадании фотона от световой вспышки на фотокатод происходит испускание электрона, который ускоряется в электрическом поле и образует лавинный эффект при прохождении через диноды. На единичный фотон от вспышки в ФЭУ образуется лавина из  $\sim 10^7$  электронов, которые регистрируются как электрический сигнал отсчета.

Одним из недостатков ФЭУ является его чувствительность к механическим и вибрационным нагрузкам. С точки зрения прочности, промышленность выпускает «усиленные» ФЭУ, которые не разрушаются при воздействии вибрационной нагрузки до 15g и ударной нагрузки до 200g. Однако некоторые применения, особенно в космических приборах, предусматривают работу детекторов в условиях постоянных вибрационных нагрузок, для чего обычные и даже усиленные ФЭУ могут быть не предназначены. При воздействии вибрационных нагрузок на работающий ФЭУ в нем может возникать переменное ускоряющее электрическое поле, что, как следствие, может приводить к возникновению электронного шума в измеряемом сигнале (так называемый микрофонный эффект). Более того, внутренняя конструкция ФЭУ каждого типа имеет собственные резонансные частоты механических колебаний. На этих частотах даже незначительные уровни внешней вибрации могут существенно повлиять на результаты измерений.

В данной статье рассмотрен конкретный пример влияния микровибрации на работу ФЭУ *Hamamatsu R1840* в составе прибора *HEND (High Energy Neutron Detector)*, и определены уровни возникновения электронных шумов в измеряемом сигнале вследствие микрофонного эффекта. С учетом полученных результатов предложены конкретные пути решения этой проблемы при разработке перспективных приборов с ФЭУ для космического применения.

## Микрофонный эффект в детекторах приборов *HEND* и БТН-М1

В отделе ядерной планетологии ИКИ РАН разработан ряд ядерно-физических приборов для научных космических аппаратов. С их помощью регистрируются нейтроны, заряженные частицы и гамма-излучение от поверхности планет и их спутников для определения элементного состава и наличия воды. Эти приборы были разработаны как для пилотируемой Международной космической станции (МКС), так и для автоматических межпланетных аппаратов и посадочных платформ [1, 2].

Особенностью работы орбитальных приборов является непрерывное измерение гамма-лучей и нейтронов для планетных исследований и наблюдения за солнечной активностью. Для измерения потока нейтронов и гамма-излучения используются сцинтилляционные детекторы на основе различных кристаллов (CsI, стильбен, LaBr<sub>3</sub> и CeBr<sub>3</sub>) и с последующей регистрацией световых вспышек при помощи вакуумного ФЭУ. В то же время на борту любого космического аппарата имеются различные источники вибрационного шума (вентиляторы, гироскопы, механизмы поворота направленных антенн, солнечных батарей и пр). Если шумы от микрофонного эффекта в ФЭУ, вносимые бортовыми механизмами в условиях эпизодической работы, можно исключить в ходе наземной отработки с некоторой потерей объема научных данных, то источникам постоянного вибрационного воздействия, которыми являются вентиляторы и гироскопы, необходимо уделить особое внимание.

Для изучения микрофонного эффекта был проведен цикл экспериментальных работ по воздействию слабой вибрационной нагрузки на работающий ФЭУ. В качестве первого образца был выбран ФЭУ *Hamamatsu R1840* в составе прибора *HEND* [2]. Этот тип ФЭУ хорошо зарекомендовал

себя в условиях космического полета и имеет хорошие характеристики для регистрации сцинтилляционного излучения [3]. Прибор *HEND* был установлен на борту аппарата *NASA Mars Odyssey* в составе научного комплекса *GRS* и предназначен для измерения потока нейтронов от Марса в разных энергетических диапазонах. После успешного запуска этого космического аппарата в апреле 2001 г. второй летный образец прибора *HEND* было решено использовать в качестве блока детектирования аппаратуры БТН-М1, которая в настоящий момент установлена на Российском сегменте МКС [1]. Блок детектирования установлен на внешней стороне служебного модуля «Звезда» и позволяет получать экспериментальные данные, необходимые для изучения нейтронного альbedo верхней атмосферы Земли с учетом эффектов долготы и широты точки измерения, высоты орбиты, времени суток, условий солнечной активности и состояния атмосферы.

Приборы *HEND* и БТН-М1 содержат спектрометр с четырьмя независимыми детекторами нейтронов. Три детектора эпитепловых нейтронов (*SD*, *MD*, *LD*) представляют собой пропорциональные газовые счетчики на основе  $^3\text{He}$ . В качестве четвертого детектора нейтронов высоких энергий *IN/SC* используется детектор на основе органического сцинтиллятора из стиблена. Этот сцинтиллятор регистрирует нейтроны высоких энергий по вспышкам света от протонов отдачи.

При наземных испытаниях прибора *HEND* на борту космического аппарата *Mars Odyssey* было обнаружено, что в сцинтилляционном детекторе присутствуют шумы, которые многократно превышают уровень полезного сигнала. В результате анализа источника возникновения этого шума было выяснено, что он возникает вследствие микрофонного эффекта от слабых вибраций гиродин космического аппарата, находящегося в непосредственной близости от прибора. Время, оставшееся до запуска миссии, не позволяло произвести доработку прибора или смену его местоположения на борту. Также не было возможности подробно изучить условия возникновения шумов в зависимости от частоты вибрации. Поэтому было принято решение срочно изготовить и испытать специальные амортизирующие стойки по местам крепления прибора, которые демпфируют вибрационные воздействия на прибор в широком диапазоне

частот. При реализации проекта БТН-М1 на борту Российского сегмента МКС блок детектирования также был установлен с использованием аналогичных амортизирующих стоек.

Однако потребности разработок перспективных приборов для будущих космических аппаратов поставили перед исследователями задачу по выяснению возможностей дальнейшего применения хорошо зарекомендовавших себя образцов ФЭУ *Hamamatsu R1840* в условиях микровибраций на борту. В связи с этим были проведены лабораторные исследования устойчивости образцов сцинтилляционных детекторов с указанным типом ФЭУ к возникновению микрофонного эффекта.

### Лабораторные измерения устойчивости детекторов к микрофонному эффекту

Вибрационные испытания проводились на базе контрольно-испытательной станции в ИКИ РАН на вибростенде УВЭП-16000, а также на специально созданном стенде вибромеханических испытаний узлов бортовых космических детекторов в ИМАШ РАН. Вибростенд УВЭП-16000 имеет номинальный рабочий диапазон частот 5...2 500 Гц и при номинальной испытательной массе нагрузки 64 кг позволяет прилагать вибрационное воздействие амплитудой до 20g. При синусоидальном воздействии аппаратура управления стенда позволяет задавать программу испытаний с необходимыми параметрами уровня воздействия, диапазона частот и времени испытания, которые выдерживаются автоматически. Основное отличие вибростенда ИМАШ РАН в номинальной нагрузке, которая составляет 5 кг, что позволяет точно выдерживать сверхмалые нагрузки (<0,1g). Для крепления прибора к вибростенду использовалась технологическая оснастка, изготовленная для вибрационных испытаний на этапе разработки приборов *HEND* и БТН-М1.

Аппаратура подвергалась синусоидальному вибрационному воздействию в диапазоне частот 100...1 000 Гц с разными уровнями нагрузок: 0,05g, 0,1g, 0,2g и 0,3g. Диапазон частот 100...1 000 Гц проходил по частоте несколько раз с временем одного прохода 30 мин. Прибор обладает собственной амплитудно-частотной характеристикой для передаточной функции вибраций, и поэтому уровень вибраций воздействия на плите стенда не соответствует уровню воздействия на испытываемом ФЭУ.

Чтобы учесть этот фактор, контрольный датчик амплитуды вибрационного стенда был установлен на приборе в непосредственной близости к ФЭУ (рис. 1).

Для испытаний был использован конструкторско-доводочный образец прибора HEND, подключенный к штатной контрольно-испытательной аппаратуре (КИА), которая обеспечивает прибор питанием и информационным обменом. Прибор был включен в научный режим работы и каждые 10 с передавал в КИА накопленные 16-канальные спектры отсчетов с детекторов. В ходе испытаний каждому спектру отсчетов, измеренному прибором, соответствовала текущая частота вибрационного воздействия.

В результате испытаний были получены результаты для уровней амплитуд вибраций 0,05g, 0,1g, 0,2g и 0,3g. (рис. 2).

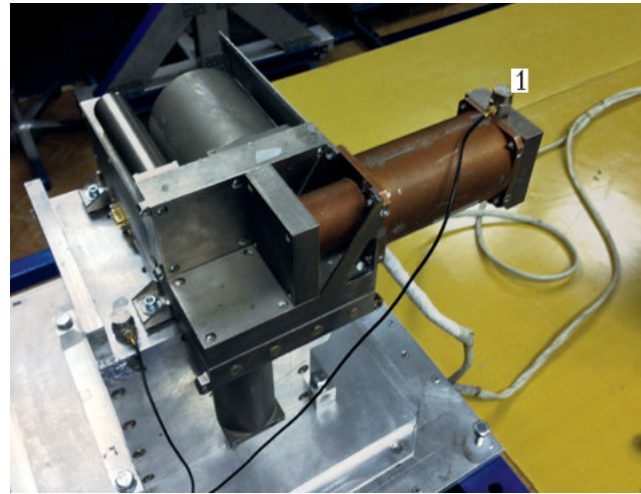


Рис. 1. Конструкторско-доводочный образец прибора HEND на стенде вибрационных испытаний для изучения условий возникновения микрофонного эффекта. Указано место установки вибродатчика, определяющего амплитуду вибрации (1)

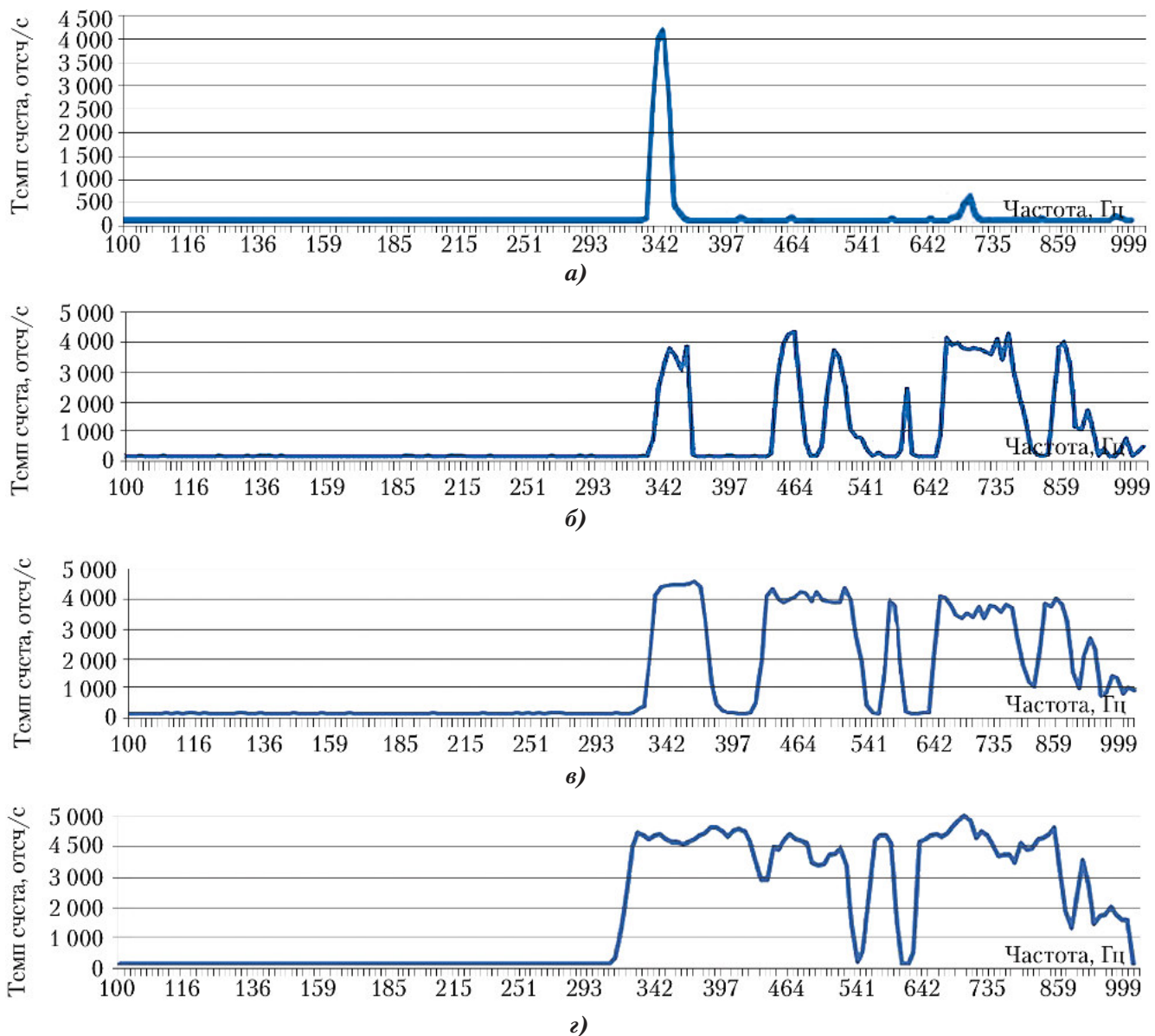


Рис. 2. Темп счста фотоэлектронного умножителя Hamamatsu R1840 прибора HEND в зависимости от частоты вибрации в диапазоне частот 100...1000 Гц с амплитудами: а – 0,05g; б – 0,1g; в – 0,2g; з – 0,3g

Темп счета гамма-квантов соответствует нижнему уровню на графиках и составляет ~140 отсчетов в секунду. Из графиков видно, что ФЭУ *Hamamatsu R1840* уже при самом низком уровне вибрационного воздействия 0,05g имеет значительное увеличение темпа счета на частоте в районе 340 Гц. Предположительно, данная частота связана с основной модой колебаний внутренней структуры ФЭУ. Эффект от второй гармоники этой частоты можно заметить в районе 700 Гц (рис. 2, а). Очевидно, что на этих частотах даже незначительный уровень вибрационного воздействия <0,05g приводит к значительным шумам, делая практически невозможными измерения гамма-лучей. Также при вибрационном воздействии с амплитудой 0,05g заметно появление дополнительных резонансов в районе 400 и 450 Гц. При увеличении амплитуды от 0,05g до 0,1g и выше шумы от микрофонного эффекта не позволяют проводить измерения при частотах вибрационного воздействия, превышающих 300 Гц.

Дальнейшие исследования были направлены на поиск уровня вибрационного воздействия, при котором шумы на резонансной частоте 340 Гц полностью пропадают. При удержании частоты вибрации 340 Гц ее амплитуда постепенно уменьшалась до полного исчезновения шумов (рис. 3). Эксперимент показал, что шумы от микрофонного эффекта для ФЭУ *Hamamatsu R1840* при воздействии на резонансной частоте 340 Гц пропадают при уровне вибрации 0,03g.

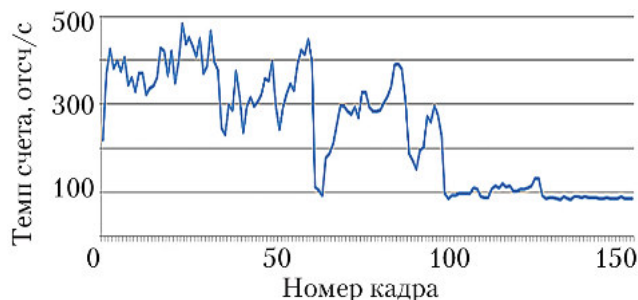


Рис. 3. Темп счета фотозлектронного умножителя *Hamamatsu R1840* прибора *HEND* при воздействии вибрации с частотой 340 Гц и амплитудами 0,082g (кадры 1–33); 0,067g (кадры 34–60); 0,051g (кадры 61–86); 0,049g (кадры 88–96); 0,042g (кадры 100–122); 0,03g (кадры 125–145)

## Заключение

В настоящее время идет бурное развитие полупроводниковых ФЭУ, которые по своему принципу работы лишены такого недостатка вакуумных ФЭУ, как микрофонный эффект. Однако проблема получения

высокого энергетического разрешения на полупроводниковых ФЭУ при большой площади кристалла и необходимость применения быстродействующей электроники для обработки сигнала еще позволяют классическим электронно-вакуумным ФЭУ удерживать занятые позиции для широкого применения в промышленности и науке.

ИКИ РАН ведет разработку перспективного прибора БТН-М2, в котором для регистрации нейтронов и гамма-лучей будет использоваться электронно-вакуумный ФЭУ. Созданная в представленном исследовании методика будет применяться для оптимального выбора образцов электронно-вакуумных ФЭУ для прибора БТН-М2, которые будут обладать необходимым уровнем устойчивости к вибрационным воздействиям для исключения возникновения микрофонного эффекта при работе на борту МКС.

В случае, если для обеспечения требуемой надежности в приборе БТН-М2 будут использоваться образцы ФЭУ *Hamamatsu R1840*, при разработке его механической конструкции будет предусмотрено условие эффективного демпфирования внешнего вибрационного воздействия на ФЭУ в диапазоне частот ~340 Гц. Это позволит исключить возникновение микрофонного эффекта в приборе при вибрационном воздействии на него с амплитудами 0,3–0,5g.

Данная работа выполнена в рамках гранта 14-22-00249 Российского Научного Фонда.

## Список литературы:

1. Третьяков В.И., Митрофанов И.Г., Бобровицкий Ю.И., Вострухин А.В., Гунько Н.А., Козырев А.С., Крылов А.В., Литвак М.Л., Лопез-Алегррия М., Лягушин В.И., Коновалов А.А., Коротков М.П., Мазуров П.В., Мокроусов М.И., Малахов А.В., Нурждин И.О., Пономарева С.Н., Пронин М.А., Санин А.Б., Тимошенко Г.Н., Томилина Т.М., Турин М.В., Цыган А.И., Швецов В.Н. Первый этап космического эксперимента «БТН-Нейтрон» на борту Российского сегмента Международной космической станции // Космические исследования. 2010. Т. 48. № 4. С. 293–307.

2. *Boynton W.V., Feldman W.C., Mitrofanov I.G., Evans L.G., Reedy R.C., Squyres S.W., Starr R., Trombka J.I., d'Uston C., Arnold J.R., Englert P.A.J., Metzger A.E., Wänke H., Brückner J., Drake D.M., Shinohara C., Fellows C.*

Hamara D.K., Harshman K., Kerry K., Turner C., Ward M., Barthe H., Fuller K.R., Storms S.A., Thornton G.W., Longmire J.L., Litvak M.L., Ton'chev A.K. *The Mars Odyssey gamma-ray spectrometer instrument suite* // *Space Science Reviews*. 2004. Vol. 110. Issue 1. P. 37–83.

3. HAMAMATSU PHOTONICS K.K. *Hamamatsu PMT Handbook*. Vol. 3. Режим доступа: [http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT\\_handbook\\_v3aE-Chapter13.pdf](http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v3aE-Chapter13.pdf) (дата обращения 15.11.2015 г.).  
Статья поступила в редакцию 02.12.2016 г.

## Reference

1. Tret'yakov V.I., Mitrofanov I.G., Bobrovnikskii Yu.I., Vostrukhin A.V., Gun'ko N.A., Kozyrev A.S., Krylov A.V., Litvak M.L., Lopez-Alegriya M., Lyagushin V.I., Kononov A.A., Korotkov M.P., Mazurov P.V., Mokrousov M.I., Malakhov A.V., Nuzhdin I.O., Ponomareva S.N., Pronin M.A., Sanin A.B., Timoshenko G.N., Tomilina T.M., Tyurin M.V., Tsygan A.I., Shvetsov V.N. *Pervyi etap kosmicheskogo eksperimenta «BTN-Neutron» na bortu Rossiiskogo segmenta Mezhdunarodnoi kosmicheskoi stantsii* [The first phase of space experiment BTN-Neutron onboard the Russian Segment of the International Space Station]. *Kosmicheskie issledovaniya*, 2010, vol. 48, no. 4, pp. 293–307.
2. Boynton W.V., Feldman W.C., Mitrofanov I.G., Evans L.G., Reedy R.C., Squyres S.W., Starr R., Trombka J.I., d'Uston C., Arnold J.R., Englert P.A.J., Metzger A.E., Wänke H., Brückner J., Drake D.M., Shinohara C., Felloes C., Hamara D.K., Harshman K., Kerry K., Turner C., Ward M., Barthe H., Fuller K.R., Storms S.A., Thornton G.W., Longmire J.L., Litvak M.L., Ton'chev A.K. *The Mars Odyssey gamma-ray spectrometer instrument suite*. *Space Science Reviews*, 2004, vol. 110, issue 1, pp. 37–83.
3. HAMAMATSU PHOTONICS K.K. *Hamamatsu PMT Handbook*. Vol. 3. Available at: [http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT\\_handbook\\_v3aE-Chapter13.pdf](http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v3aE-Chapter13.pdf) (accessed 15.11.2015).