

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ НЕЙТРОННЫЙ ДЕТЕКТОР С АНТИСОВПАДАТЕЛЬНОЙ ЗАЩИТОЙ

*М. И. Мокроусов¹, И. Г. Митрофанов, М. Л. Литвак, А. Б. Санин,
А. А. Аникин, М. В. Дьячкова, А. Г. Ильин, Н. Е. Карпушкина, А. В. Малахов*

Институт космических исследований РАН, Москва

Вот уже несколько десятилетий метод дистанционной нейтронной и γ -спектрометрии объектов Солнечной системы (Луна, Марс, Меркурий) позволяет оценить ядерный состав этого объекта и степень присутствия водорода в его приповерхностном слое. Для измерения нейтронной компоненты низких энергий чаще всего используются пропорциональные газовые счетчики на основе гелия-3 (^3He), имеющие максимальную эффективность регистрации тепловых и эпитепловых нейтронов. Однако опыт космических экспериментов LEND и FRENД с гелиевыми счетчиками больших объемов и давлений показал зашумление младших каналов нейтронной компоненты за счет чувствительности таких счетчиков к заряженным частицам космического пространства. В статье описывается макет перспективного нейтронного детектора с антисовпадательной защитой, не имеющий данного недостатка.

For several decades now, the method of remote neutron and gamma spectrometry of objects in the Solar System (Moon, Mars, Mercury) has made it possible to estimate the nuclear composition of the object and the hydrogen abundance in its subsurface layer. For measuring the neutron component of low energy, proportional gas counters based on helium-3 (^3He) are most often used, having the maximum efficiency of recording thermal and epithermal neutrons. However, the experience of LEND and FRENД space experiments with helium counters of large volumes and pressures showed the noise in lower channels of the neutron component due to the sensitivity of such counters to space charged particles. The article describes a model of a promising neutron detector with anti-coincidence protection that does not have this disadvantage.

PACS: 07.85.Nc; 29.30.Kv; 29.40.Mc; 29.40.Wk; 29.30.Hs

В 2005–2009 гг. по международному соглашению между Роскосмосом и НАСА в Институте космических исследований Российской академии наук был разработан прибор LEND (Lunar Exploration Neutron Detector) для миссии НАСА LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter). Целью исследований прибора LEND (рис. 1) являлось построение глобальной карты водородосодержащих элементов на поверхности Луны (рис. 2, 3), а также получение достоверных данных о возможном присутствии водяного льда в вечнозатененных зонах на лунных полюсах («холодных ловушках»). Другой целью прибора LEND являлось изучение нейтронного фона Луны, которое имеет огромное значение для планирования будущих пилотируемых лунных миссий. Миссия LRO является очередным

¹E-mail: mokromax@iki.rssi.ru

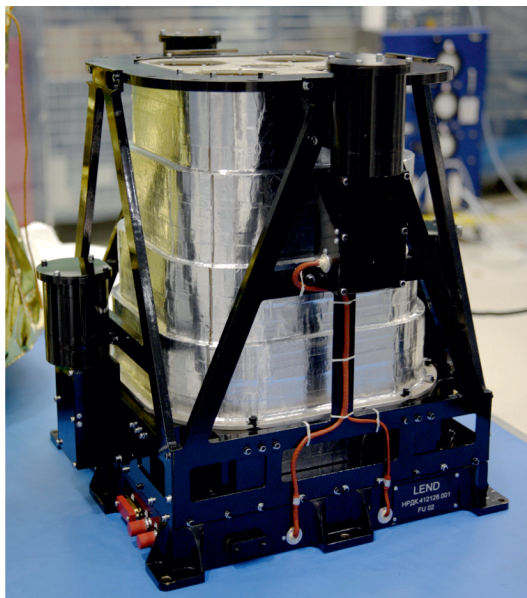


Рис. 1. Прибор LEND

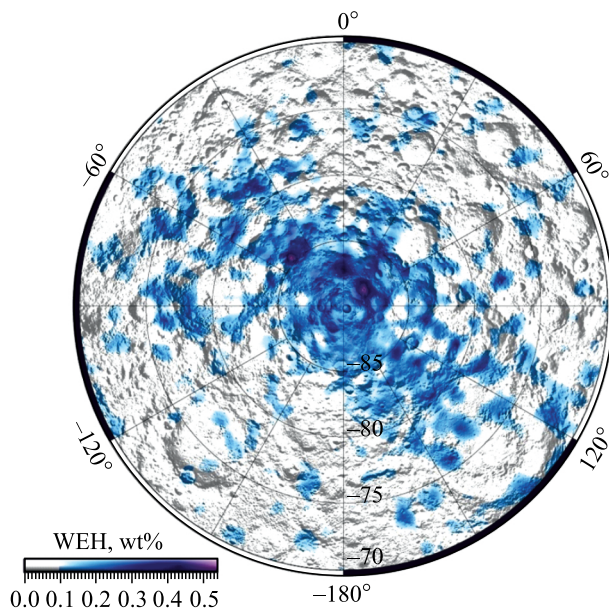


Рис. 2. Карта водородосодержания южного полюса Луны

этапом перед планируемой колонизацией Луны, первым шагом которой должно стать построение постоянной базы на поверхности Луны. Для этого нужно определить местоположение самого значительного ресурса, необходимого для жизнедеятельности, —

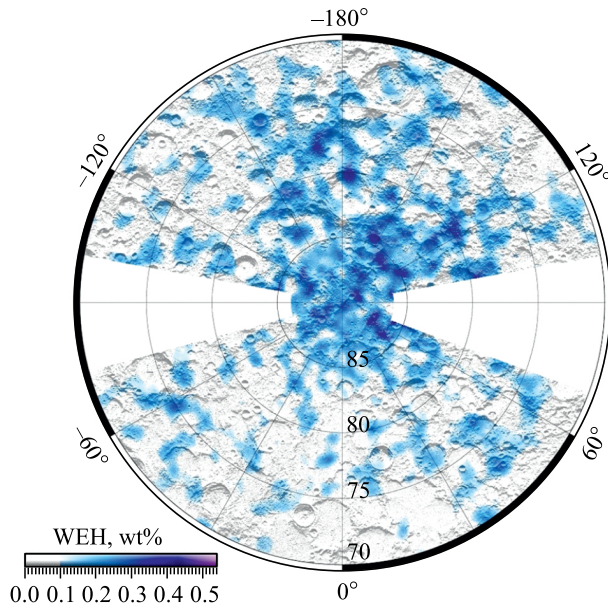


Рис. 3. Карта водородосодержания северного полюса Луны

воды. LEND меряет поток нейтронов с поверхности Луны, включая постоянно затененные места, с пространственным разрешением, сравнимым по значению с диаметром предполагаемых «холодных ловушек». Нейтроны являются очень чувствительными к присутствию водорода в грунте, поэтому уменьшение нейтронного потока тепловых и эпитепловых энергий в каких-либо областях можно трактовать как присутствие водорода, а, возможно, и водяного льда, в данных регионах. Дело в том, что поверхность космического тела с тонкой или без атмосферы постоянно бомбардируется галактическими космическими лучами (ГКЛ), состоящими из 87 % протонов, 12 % α -частиц и 1 % более тяжелых ядер с энергиями от 10 МэВ/нуклон до 1 ТэВ/нуклон [7]. Некоторые из этих частиц, взаимодействуя с веществом приповерхностного грунта космического тела и проникая на глубину до 1 м, порождают вторичные нейтроны, которые, в свою очередь, посредством как упругого, так и неупругого рассеяния продолжают взаимодействовать с ядрами элементов реголита (или могут быть ими поглощены). Часть вторичных нейтронов после замедления выходит из-под поверхности (как правило, с глубин менее 60 см), и их поток и энергия могут быть измерены (в том числе и с орбиты). Водород в этом случае является наиболее эффективным поглотителем энергии нейтрона, поскольку имеет почти равную с ним массу. В среднем нейтрон теряет около половины своей кинетической энергии при упругом взаимодействии с ядром водорода. Остальные ядра имеют гораздо большие массы по отношению к нейтрону, и как результат, нейтрон теряет меньшую кинетическую энергию в процессе реакции упругого взаимодействия с такими ядрами. Именно поэтому энергетический спектр альбедных нейтронов крайне чувствителен к количеству водорода в приповерхностном слое грунта.

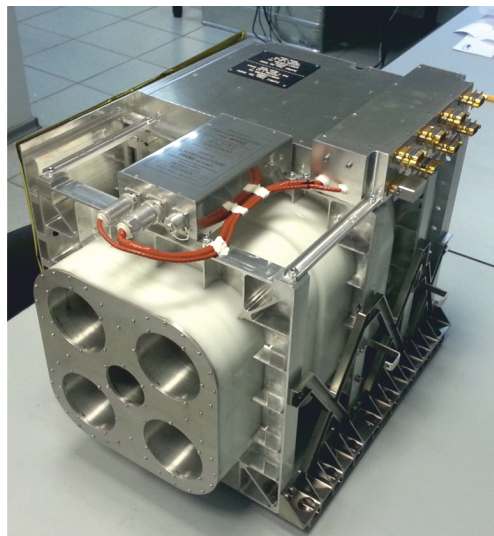


Рис. 4. Прибор FREN

Результаты работы прибора были опубликованы в [1–3] и в значительной мере определили последующую программу освоения Луны Российской Федерацией (миссии Луна-25, Луна-26 и Луна-27). Прибор LEND получил развитие в 2007–2016 гг., когда по заказу Роскосмоса для российско-европейской миссии ExoMars-2016 для размещения на аппарате TGO (Trace Gas Orbiter) был разработан и изготовлен прибор FREN (Fine Resolution Epithermal Neutron Detector, рис. 4), предназначенный для получения карты водородосодержания поверхности Марса с высоким пространственным разрешением. Первые результаты работы прибора показали очень хорошую корреляцию результатов с предыдущими измерениями прибора HEND (High Energy Neutron Detector) [4] миссии Mars Odyssey, которые до этого были получены с пространственным разрешением 300 км (рис. 5).

В обоих случаях для измерения нейтронного альbedo от поверхности космических тел в приборах использовались цилиндрические нейтронные газовые счетчики с наполнением газом. До сих пор именно эти детекторы обладают максимальной чувствительностью к нейтронам малых энергий, которые так важны для параметризации водородосодержа-

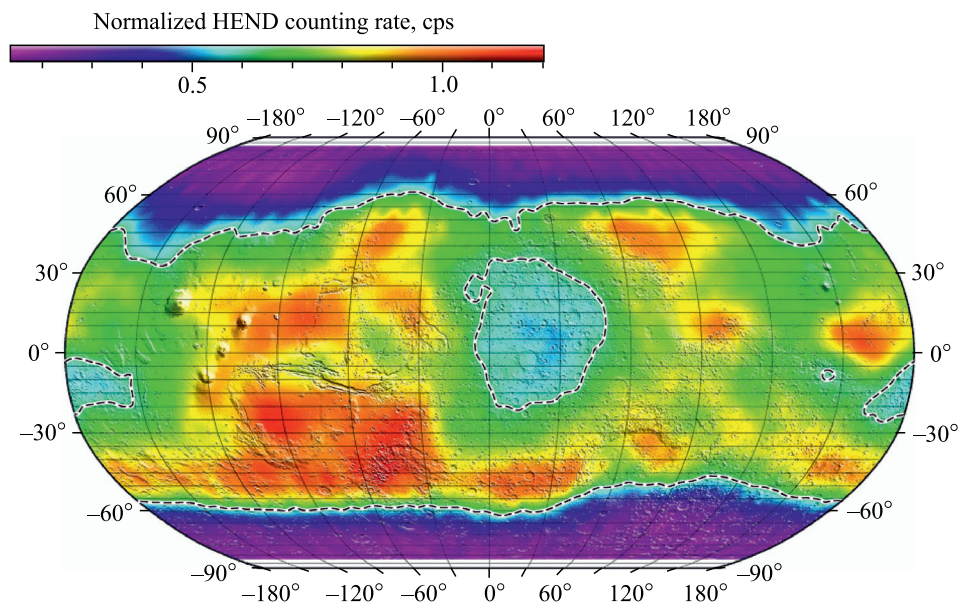
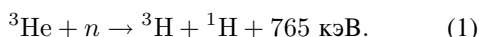


Рис. 5. Карта водородосодержания HEND

ния в грунте исследуемой планеты: так, например, для счетчика диаметром 1 дюйм при давлении 4 атм для тепловых нейтронов (0,025–0,030 эВ) эффективность счетчика составляет 77%. Также особенностями приборов LEND и FREND являлось применение коллиматора на основе слоев полиэтилена и порошка бора-10 (^{10}B) для подавления ядерного излучения с паразитных направлений и получения узкой диаграммы направленности на поверхности исследуемого объекта ([5], см. рис. 3). Очевидно, что при «затенении» подавляющей части сферы вокруг детекторов коллиматором темп счета (и, как следствие, скорость набора статистики) резко падает. В обоих случаях было принято решение об увеличении объема детекторов и повышении в них давления рабочего газа ^3He . Дело в том, что повышение давления в пропорциональных счетчиках фактически увеличивает количество атомов газа-наполнителя в фиксированном рабочем объеме счетчика, что ведет к увеличению вероятности взаимодействия нейтронов низких энергий, влетающих в объем счетчика, и, как следствие, к увеличению набираемой статистики измерений за фиксированный промежуток времени (за время жизни космического аппарата). А поскольку срок активного существования аппарата, габариты прибора и достоверность определения водородосодержания в поверхности жестко заданы в техническом задании на аппаратуру, то единственным методом увеличения точности измерений является повышение давления в детекторах.

Классическим спектром счетчика на основе ^3He в пропорциональном режиме является спектр, представленный на рис. 6. Этот спектр отражает ядерную реакцию регистрации нейтрона внутри рабочего объема счетчика, наполненного ^3He :



Результатом этой реакции является распад ядра ^3He на тритон и протон с выделением энергии 765 кэВ, разделенной между двумя частицами. Нужно заметить, что спектр на рис. 7 не отражает спектр измеренных нейтронов, а показывает спектр результирующей реакции взаимодействия тепловых нейтронов и ^3He . Так, точка А на спектре рис. 7 показывает регистрацию события, когда обе частицы (тритон и протон) оставили всю свою кинетическую энергию внутри счетчика (пик полного поглощения), и эта точка соответствует 765 кэВ. Если одна или другая частица частично вышли из рабочего объема счетчика и оставили не всю свою кинетическую энергию внутри детектора, то мы получаем «хвост» слева от точки А (пристеночные эффекты).

Тем не менее, летные комплексные испытания приборов LEND и FREND показали неприятную особенность функционирования гелиевых счетчиков больших диаметров в условиях космического полета, а именно, различие спектров работы во время наземных отработок и спектров, полученных с борта космических аппаратов. Причиной этого является чувствительность

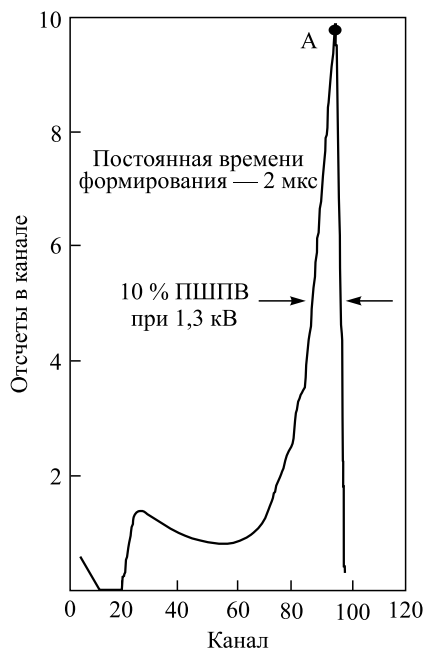


Рис. 6. Классический спектр нейтронного детектора на основе ^3He

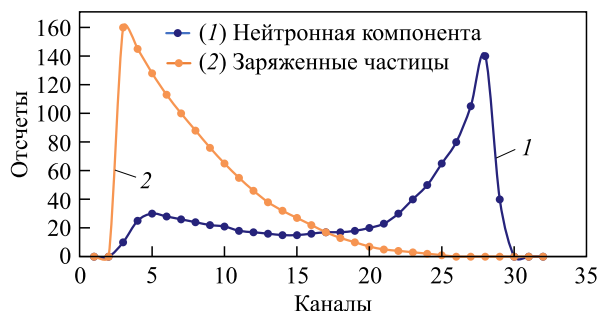


Рис. 7 (цветной в электронной версии). Спектры регистрации нейтронов и заряженных частиц в нейтронных счетчиках ${}^3\text{He}$ большого объема

нейтронных счетчиков большого объема к заряженным частицам галактических космических лучей (ГКЛ) и фоновым заряженным частицам от самого аппарата. Дело в том, что в детекторах на основе ${}^3\text{He}$ с большим рабочим объемом энерговыделение трека ионизации от заряженной частицы является сопоставимым с энергией, выделяемой при регистрации нейтрона. В этом случае результирующим измеренным спектром становится суперпозиция классического спектра регистрации нейтронов и спадающего спектра регистрации заряженных частиц (см. рис. 7) и, как следствие, зашумление полезного нейтронного сигнала в младших энергетических каналах. Общая форма результирующего спектра зависит не только от соотношения энергетических спектров и интенсивностей потока нейтронов и заряженных частиц, но и от формы детектора, давления газа в регистрирующем объеме и количества гасящих примесей (Ar , CO_2 , CH_4 и пр.). Спектры на рис. 7 получены путем численного моделирования выделения энергии в объеме газонаполненного пропорционального счетчика в результате взаимодействия с нейтронами или заряженными частицами ГКЛ. Энерговыделение в детекторе от взаимодействия с ГКЛ обусловлено в основном ионизационными потерями указанных частиц и складывается из удельных ионизационных потерь, описываемых для одной частицы с заданной энергией формулой Бете–Блоха. При численном моделировании была учтена геометрия используемого детектора и спектральная плотность потока ГКЛ, изотропно падающего на него. Известно, что спектр ГКЛ имеет максимум плотности потока частиц на энергиях 100–1000 МэВ/нуклон и модулируется уровнем солнечной активности в течение 11-летнего цикла. Причем спектральная плотность потока частиц ГКЛ падает примерно по степенному закону с ростом энергии частиц. Поэтому основной вклад в темп счета вносят частицы ГКЛ относительно низких энергий ~ 1 ГэВ/нуклон. Их энерговыделение приводит к появлению спектра отсчетов (показан на рис. 7 оранжевым цветом, 2), максимум которого приходится на младшие спектральные каналы, но простирается до старших каналов, существенно пересекаясь со спектром нейтронов (показан на рис. 7 синим цветом, 1). Таким образом теряется часть статистического сигнала от нейтронной компоненты, и для результирующих расчетов приходится использовать только старшие спектральные каналы, где нейтронный сигнал остается незашумленным.

Для обеспечения перспективных приборов космической нейтронной спектроскопии детекторами следующего поколения, не имеющими описанных недостатков, было принято решение о создании макета детектора с антисовпадательной защитой на основе

сцинтиллятора. Это позволит улучшить такой ключевой параметр, как отношение сигнал/шум в детекторе, и приведет к значительному повышению достоверности результата за то же время измерения.

Принцип антисовпадения в космическом приборостроении используется достаточно давно для отсекаания регистрации нежелательных частиц в активном объеме детектора: один детектор частиц А (внутренний, в нашем случае детектор, чувствительный к нейтронам и заряженным частицам) окружается другим детектором Б (внешний, чувствительный только к заряженным частицам), и обработка сигналов от обоих детекторов бортовой электроникой ведется одновременно. Так, при возникновении события только во внешнем детекторе Б или одновременно в обоих объемах А и Б (в некотором временном окне) это событие игнорируется, а событие, произошедшее только во внутреннем объеме А, признается полезным сигналом и подвергается дальнейшей обработке и хранению. В некоторых случаях подобный метод можно использовать даже для коллимирования полезного сигнала (регистрации частиц с выбранного сектора сферы): для этого антисовпадатальный детектор Б закрывает внутренний детектор А не полностью. В космической ядерной спектроскопии это бывает очень полезно для, например, отсекания паразитного фона от конструкций космического аппарата (эта полусфера защищена детектором антисовпадений), в то время как ядерное излучение от исследуемого объекта полностью проходит в основной детектор.

На рис. 8 приведен разрез конструкции макета детектора с антисовпадатальной защитой. В нашем случае основным регистрирующим объемом А (поз. 4) является пропорциональный гелиевый счетчик LND-25169 диаметром 2 дюйма с рабочим напряжением 1700–2000 В, а антисовпадатальная защита (поз. 1) выполнена из органического пластика толщиной 10 мм и просматривается с помощью трехдюймового усиленного ФЭУ Hamamatsu R1307-13 (поз. 3), который показал хорошую надежность при отработках и использовании в других летных приборах. Поскольку обработку данного детектора планируется проводить на ускорителе заряженных частиц в ОИЯИ (Дубна), была посчитана эффективность регистрации протонов с энергией 180 МэВ (максимум интенсивности потока), которая составила 78 % и вполне достаточна для проверки эффективности работы всего антисовпадатального детектора в сборе. Поскольку в нашем случае местоположение выхода пучка протонов будет известно, то для облегчения отработок и изготовления антисовпадатальной защита в макете закрывает детектор не полностью, а выполнена в виде незакрытого цилиндра. Регистрирующая электроника позволяет обрабатывать сигналы

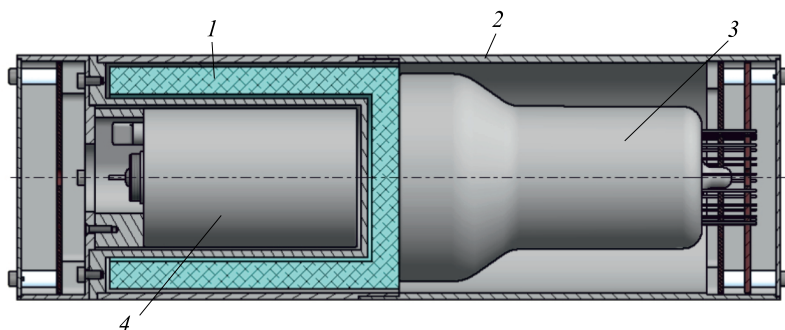


Рис. 8. Конструкция детектора с антисовпадатальной защитой

с двух детекторов (пропорциональный счетчик и ФЭУ) независимо (два канала регистрации) с последующей математической пофотонной обработкой фактов совпадения и построения результирующих спектров.

Первичная регистрирующая электроника макета изначально собрана из радиационно-стойких летных комплектующих, хорошо зарекомендовавших себя в предыдущих приборах ИКИ РАН и прошедших летные комплексные испытания в других космических миссиях (МКС, LRO, MSL, ExoMars-2016). Тем самым необходимость адаптации электроники макета к летным условиям эксплуатации отсутствует. Для обеспечения макета прочими сторонними напряжениями (в том числе и высоким напряжением) используются готовые блоки модулей NIM фирмы ORTEC. Блок-схема регистрирующей электроники и макета в сборе приведена на рис. 9.

Нужно отметить, что в условиях жесткого дефицита масс и объемов, характерного для космического приборостроения, несмотря на лучшие научные показатели, детектор будет обладать одним немаловажным недостатком: давлением дополнительных 600–700 г на детектор к массовой сводке всего прибора, из которых около половины приходится на массу корпуса ФЭУ за счет большого объема трехдюймового ФЭУ R1307-13. Минимизировать данный недостаток впоследствии планируется путем использования другого типа устройств снятия сигнала: планируется замена громоздкого ФЭУ на перспективный малогабаритный полупроводниковый ФЭУ (SiPM), подробно описанный в [6]. В этом случае накладные массовые расходы на антисовпадательную защиту будут максимально

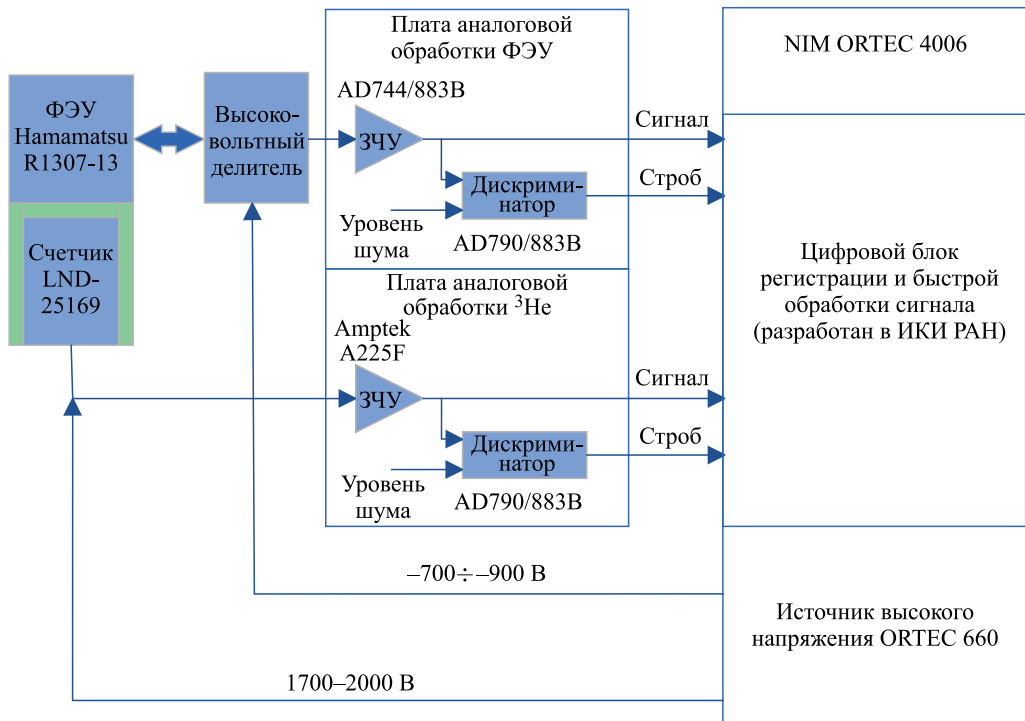


Рис. 9. Блок-схема регистрирующей электроники

приближены к массе самого антисовпадетельного детектора. Причем основной недостаток полупроводникового детектора — чувствительность самого SiPM к заряженным частицам — в данном случае не будет играть никакой роли: спонтанное срабатывание SiPM на заряженную частицу будет приравняться к такому же срабатыванию в объеме сцинтиллятора и игнорироваться электроникой. Поскольку при снятии сигнала с антисовпадетельной защитой не требуется спектрометрии, но важен сам факт регистрации заряженной частицы, то для минимизации массы детектора возможно применение и более традиционных малогабаритных устройств снятия сигнала со сцинтиллятора (например, фотодиоды, PIN-диоды и т. д.), что и будет реализовано в следующих этапах разработки перспективного детектора нейтронов с антисовпадением. Финальной целью лабораторных отработок является получение макета детектора с минимальными массовыми и габаритными показателями, имеющими летную квалификацию, поэтому на финальном этапе отработок планируется провести с макетом полный цикл приемоиспытаний (вибрационные, климатические, термовакуумные и т. д.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mitrofanov I. G., Sanin A. B., Boynton W. V., Chin G., Garvin J. B., Golovin D., Evans L. G., Harshman K., Kozyrev A. S., Litvak M. L., Malakhov A., Mazarico E., McClanahan T., Milikh G., Mokrousov M., Nandikotkur G., Neumann G. A., Nuzhdin I., Sagdeev R., Shevchenko V., Shvetsov V., Smith D. E., Starr R., Tretyakov V. I., Trombka J., Usikov D., Varenikov A., Vostrukhin A., Zuber M. T.* // *Science*. 2010. V. 330, No. 6003. P. 483–486.
2. *Митрофанов И. Г., Санин А. Б., Литвак М. Л.* // Докл. РАН. 2016. Т. 466, № 6. С. 660–663.
3. *Sanin A. B., Mitrofanov I. G., Litvak M. L., Malakhov A., Boynton W. V., Chin G., Droege G., Evans L. G., Garvin J., Golovin D. V., Harshman K., McClanahan T. P., Mokrousov M. I., Mazarico E., Milikh G., Neumann G., Sagdeev R., Smith D. E., Starr R. D., Zuber M. T.* // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. E00H26.
4. *Sanin A. B., Mitrofanov I. G., Litvak M. L., Bakhtin B. N., Bodnarik J. G., Boynton W. V., Chin G., Evans L. G., Harshman K., Fedosov F., Golovin D. V., Kozyrev A. S., Livengood T. A., Malakhov A. V., McClanahan T. P., Mokrousov M. I., Starr R. D., Sagdeev R. Z., Tretyakov V. I., Vostrukhin A. A.* // *Icarus*. 2017. V. 283. P. 20–30.
5. *Litvak M. L., Mitrofanov I. G., Sanin A. B., Bakhtin B. N., Bodnarik J. G., Boynton W. V., Chin G., Evans L. G., Golovin D., Harshman K., Livengood T. A., Malakhov A., Mokrousov M. I., McClanahan T. P., Sagdeev R., Starr R., Vostrukhin A.* // *Planet. Space Sci.* 2016. V. 122. P. 53–65.
6. *Мокроусов М. И., Вострухин А. А., Малахов А. В., Карпушкина Н. Е.* // *ЯФ*. 2016. Т. 79, № 5. С. 468–474.
7. *Simpson J. A.* // *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 1983. V. 33. P. 323–382.

Получено 11 октября 2018 г.