

Лабораторная модель гидроакустического приемника

А. Е. ИСАЕВ, И. В. ЧЕРНИКОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: isaev@vniiftri.ru

При выполнении метрологических работ предложено создавать исчерпывающую лабораторную модель гидроакустического приемника с тем, чтобы на ее основе получать частные метрологические характеристики, адекватные целям и условиям применения приемника по назначению.

Ключевые слова: гидроакустический приемник, подводный шум, градуировка, реверберационное звуковое поле.

During carrying out the metrological works it was proposed to create a comprehensive laboratory model of underwater receiver to obtain on its basis the receiver metrological characteristics adequate to purposes and conditions of receiver intended application.

Key words: underwater receiver, underwater noise, calibration, reverberant sound field.

Обеспечение единства измерений уровней подводного шума обусловило высокие требования к точности контроля характеристик гидроакустического приемника. В этой ситуации от первичного эталона требовалось с максимально возможной точностью воспроизводить единицу акустического давления на нормированном наборе частот и передавать ее ограниченной номенклатуре измерительных гидрофонов. При совершенствовании эталонной базы предполагали расширение частотного диапазона и повышение точности воспроизведения и передачи единицы на третьоктавных частотах. Тем самым проблема метрологического обеспечения гидроакустических измерений сводилась к проблеме допускового контроля при изготовлении и эксплуатации гидрофона. Для решения этих задач исчерпывающая модель гидроакустического приемника была избыточной, вследствие чего оказались невостребованными измерения фазовой характеристики приемника, подробной частотной характеристики, чувствительности в полосах частот по свободному и диффузному полю, переходной характеристики и др. Так продолжалось до тех пор, пока не стало очевидным, что достигнуты такие точности эталона и градуировки гидрофона, которые перестали сказываться на инструментальной погрешности натурных измерений. Чтобы приблизиться к требованиям современных стандартов по точности измерений излучаемого кораблем подводного шума, единицу необходимо передавать не гидрофону, а всему гидроакустическому приемнику в том виде, как его применяют в море, и не на третьоктавной частоте, а в третьоктавной полосе частот, при этом частотный диапазон градуировки по полю следует по возможности продлить в сторону низких частот. Оказалось, что тонально-импульсный метод градуировки плохо подходит для этих целей [1, 2].

Проблемы использования стандартизированной процедуры градуировки. На начальном этапе стандартизации гидроакустических измерений каждая точка на частотной характеристике гидрофона стоила больших затрат и третьоктавный ряд считали достаточно подробным для градуиров-

ки и измерений. Сегодня стало очевидным, что такая «бедная» характеристика не может удовлетворить современным запросам.

При забивании свай в морское дно технические регламенты предполагают нормирование и измерение таких характеристик излучаемого в воду акустического сигнала, как выраженные в децибелах пиковое p_p , и пик-пиковое p_{p-p} акустические давления, SPL — среднеквадратическое акустическое давление в импульсе относительно 1 мкПа; SEL — уровень экспозиции как сумма квадратов акустического давления в импульсе относительно 1 мкПа²·с.

Если измерения двух последних шумовых характеристик можно выполнить гидрофоном, отградуированным традиционным способом, то измерения первых двух характеристик требуют точного определения формы акустического сигнала. Чтобы ее получить, необходимо знать точную импульсную характеристику измерительной системы, включая гидроакустический приемник. В настоящее время отсутствуют стандарты на методы измерений такой характеристики, как и понимание того, насколько подробно ее нужно измерять и нормировать.

В гидроакустике существуют только два международных стандарта на эталонный гидрофон и его калибровку [3, 4], которыми руководствуются во всех случаях, хотя они ограничивают возможности метрологических работ калибровками на частотах третьоктавного ряда.

Измерение шума корабля по сути является обратной задачей, решение которой требует знания полной динамической характеристики приемника: отклика на δ -импульс либо комплексной частотной характеристики. Сложность получения полной динамической характеристики вынуждает пользоваться на практике частными динамическими характеристиками, которые определяют в результате градуировки. Типичный пример — чувствительность гидрофона на ограниченном наборе частот третьоктавного ряда. Эта характеристика весьма удобна для использования в условиях метрологических лабораторий, однако явно недостаточна для

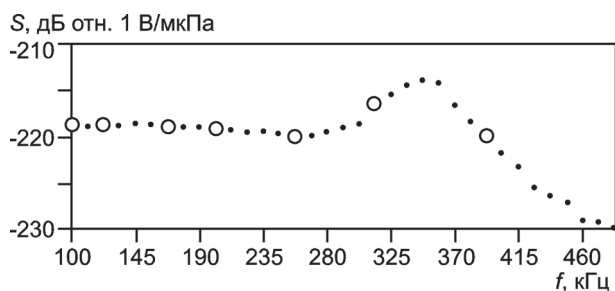


Рис. 1. Частотная характеристика чувствительности гидрофона ТС4034

измерений подводного шума корабля в третьоктавных полосах частот.

При измерениях подводного шума среднеквадратическое значение (СКЗ) звукового давления в третьоктавной полосе частот вычисляют по результатам измерений выходного напряжения гидрофона в той же полосе. Для частотных полос, в которых неравномерность частотной характеристики приемника пренебрежимо мала в сравнении с погрешностью измерений, СКЗ звукового давления получают делением СКЗ выходного напряжения на чувствительность гидрофона на номинальной частоте третьоктавной полосы. Если неравномерность значительна, то использование чувствительности на номинальной частоте становится некорректным, однако и в этой ситуации вынужденно используют эту характеристику, поскольку при градуировке гидроакустического приемника определяют только набор чувствительностей на третьоктавном ряде частот. При таком подходе задача валидации (проверки соответствия характеристик средств измерений (СИ) решаемой измерительной задаче) приемника подводного шума остается нерешенной, поскольку при градуировке решают задачу, которую научились решать, а не ту, которую нужно решить на полигоне [2].

Для измерений подводного шума больше подходит другая характеристика гидрофона — набор чувствительностей в третьоктавных полосах частот [5]. Конечно, эта характеристика не позволяет решать задачу восстановления входного сигнала, но дает возможность получить требуемые численные оценки СКЗ шума. Отметим, что для измерений под-

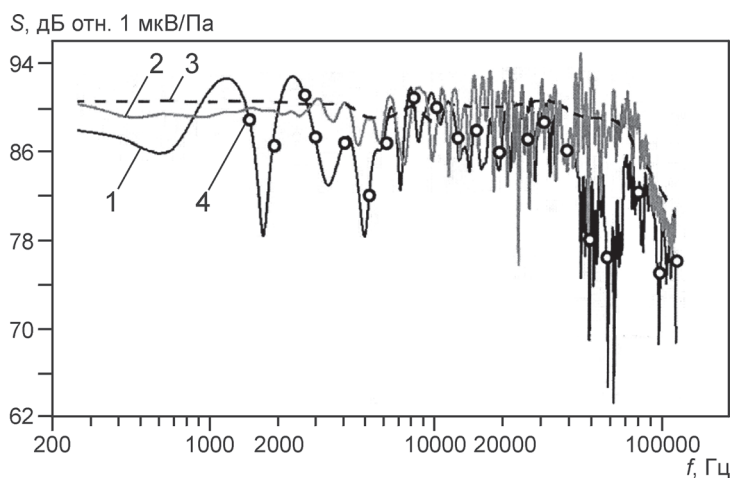


Рис. 2. Результаты градуировки гидрофона ГИ 54, установленного штатно на носителе (1, 4), при снятом обтекателе (2) и собственная частотная характеристика гидрофона (3)

водного шума от удара гидравлического молота морского копра чувствительность в третьоктавной полосе частот может оказаться неподходящей настолько же, насколько и чувствительность на третьоктавной частоте.

На рис. 1 приведена частотная характеристика чувствительности измерительного гидрофона, полученная при международных сличениях результатов калибровок гидрофонов COOMET 561/RU/12. Для восстановления формы акустического сигнала значений на частотах третьоктавного ряда (светлые точки на рис. 1) явно недостаточно. Их мало даже для того, чтобы правильно оценить неравномерность частотной характеристики самого гидрофона. Если градуировку гидрофона ТС 4034 выполнить с шагом 10 кГц (темные точки на рис. 1), то неравномерность частотной характеристики можно оценить с большей достоверностью, но это не меняет ситуации с решением задачи восстановления акустического сигнала.

Для морского копра требуется оценивать ударную энергию, преобразованную в подводный звук, и воздействие этого звука на морских животных. Уже сегодня очевидны экономические последствия неправильного измерения уровня звуковой экспозиции или восстановления формы акустического сигнала для оценки пикового значения акустического сигнала копра, для которого энергия удара гидравлического молота при забивании стальной сваи в дно по разным источникам может превышать 1400 кДж.

При измерениях в море гидрофон устанавливают в специальную конструкцию, которую за рубежом называют системой вывешивания [6], в отечественных источниках — носителе. Носитель, как правило, имеет большие габаритные размеры и помимо обеспечения плавучести и ориентирования гидрофона содержит контейнер с периферийной аппаратурой, обтекатель и другие герметичные узлы, выполнить которые акустически прозрачными не удается.

На рис. 2 приведены результаты градуировки гидроакустического приемника — гидрофона, установленного в экспериментальный образец носителя. Кривая 3 представляет собственную частотную характеристику гидрофона, кривые 1, 2 — то же для гидрофона, установленного штатно в экспериментальном образце и со снятым обтекателем. Кругами 4 на кривой 1 обозначены значения чувствительности на третьоктавных частотах. Размах и частота осцилляций зависимостей 1 и 2 показывают, что градуировка такого приемника на третьоктавных частотах не имеет смысла, так же значения в этих точках, с какой бы высокой точностью они ни были получены, не позволяют сколько-нибудь достоверно оценить неравномерности кривых.

Приведенный пример с крайне неудачной конструкцией носителя выбран умышленно, чтобы отметить следующие проблемы. Первая — неудачная конструкция носителя, которую можно улучшить, если детально знать, насколько конструкция неудачна. Вторая — невозможность получить представление на рис. 2 зависимости, используя временную селекцию тонально-импульсного сигнала. Третья проблема — невозможность использовать чувствительность на третьоктавных частотах для измерений шума в третьоктавных полосах. Кроме того, если по кривой 3 (гидрофон без носителя) можно оценить пиковое значение шума морского копра хотя бы грубо, то рис. 2 в целом показывает бесполезность использования для этой цели всей конструкции приемника.

Метрологическая модель гидроакустического приемника. Схема эталонных лабораторных измерений подразумевает ориентирование градуируемого гидрофона опорным направлением на излучатель либо известный относительно опорного направления угол падения звуковой волны. Опорное направление принято обозначать риской на гидрофоне. Риски, частотная характеристика и характеристика направленности в совокупности определяют лабораторную модель гидрофона.

Как только гидрофон покидает пределы лаборатории, схема эталонных лабораторных измерений исчезает. Когда гидрофон устанавливают в носитель и погружают в море, где его невозможно ориентировать по отношению к источнику шума, утрачивается и лабораторная модель гидрофона, полученная в результате его градуировки. Это становится очевидным при переходе к оценке погрешности измерений, например, к учету влияния направленности. Точность измерений характеристик гидрофона при градуировке обесценивается из-за большой неравномерности диаграммы направленности приемника, которая зависит от свойств конструкции приемника. В этой ситуации высокая точность эталонных измерений оказывается нужной лишь для того, чтобы понять насколько плох приемник. Другими словами, выбранная при градуировке лабораторная модель гидрофона при измерениях в море не передает единицу акустического давления с той точностью, с которой она была определена в метрологической лаборатории. Избежать этой ситуации невозможно, поскольку ни реальный гидроакустический приемник, ни гидрофон не являются идеальными приемниками.

Лабораторную модель приемника можно приблизить к потребностям натурных измерений, если при градуировке вместо отдельных значений, полученных на редкой сетке частот и углов, использовать непрерывные зависимости. Такую модель нельзя применять в море, однако на ее основе можно рассчитать необходимые заказчику метрологические характеристики, например, требуемую при измерении шума корабля чувствительность в третьоктавных частотных полосах и сделать вывод о пригодности гидроакустического приемника для таких измерений [2]. Использование лабораторной модели также позволяет уточнить оценку погрешности измерений в натурных условиях.

В ситуации, когда преимущественное направление прихода звуковых волн отсутствует (например, по опыту NPL при измерениях фонового шума морской акватории), правильнее использовать чувствительность гидрофона по диффузному полю [7]. Таким образом, для гидроакустического рабочего СИ, применяемого в натурных условиях, востребованность характеристик не исчерпывается одной лишь чувствительностью по полю на частоте в опорном направлении. Такие характеристики, как чувствительность и направленность в полосе частот измерений подводного шума, чувствительности в телесном угле и по диффузному полю уже востребованы; характеристики, необходимые для измерений пиковых значений звукового давления только предстоит стандартизовать. На этапе выработки подходов к их стандартизации нужна большая экспериментальная работа, требующая избыточных данных о модели приемника.

В зависимости от назначения один и тот же измерительный микрофон градуируют по давлению, свободному либо диффузному полю. При градуировке по давлению интерес представляют частотная и фазовая характеристики, а также

акустический импеданс. В свободном поле определяют амплитудно- и фазочастотную характеристики акустического центра микрофона, в диффузном поле — чувствительность в стандартизованных полосах частот. С расширением круга гидроакустических измерительных задач перечисленные выше характеристики окажутся востребованными и для измерительного гидрофона, поскольку одно и то же определение термина «чувствительность» вряд ли подойдет для измерений импульсного подводного шума морского копра и стационарного шума корабля. Однако существует только одно международно признанное определение чувствительности гидрофона и оно жестко связано с понятиями частоты и свободного поля. Если градуировать гидрофон в соответствии с этим определением, то таким гидрофоном нельзя будет измерять ни шум копра, ни шум корабля, поскольку будет нарушен принцип валидации СИ. Результаты градуировки, выполненной в строгом соответствии с действующим стандартом, привязаны к частоте и бесполезны при измерениях пиковых значений шума либо СКЗ шума в третьоктавных полосах частот.

Казалось бы, сложившееся положение можно преодолеть, следуя известному принципу — градуировать СИ необходимо на том сигнале, который будут измерять. Это означает, что в качестве тестовых сигналов следует использовать аналоги полосового шума корабля, удара копра, шума ветрогенератора, бурильной платформы и т. п. и градуировать гидроакустический приемник необходимо в том поле, в котором будут выполнять измерения, т. е. свободном, реверберационном или диффузном звуковом. Тем самым задача валидации при градуировке гидрофона будет решена «в лоб».

Этот путь неизбежно приведет к необозримому множеству комбинаций полей и сигналов, для каждой из которых придется разрабатывать и стандартизовать соответствующие понятия, нормы, методики градуировки и измерений и т. д. Не исключено, что в некоторых случаях придется идти этим путем: вибродатчики градуируют на вибростенде тональным и импульсным сигналами с помощью падающего шарика. Примером из гидроакустики может служить принцип «золотого» фьорда, использованный в стандарте Норвегии по измерению шума судов для их классификации [8].

Более рациональным представляется подход, когда звуковое поле при градуировке создают излучением эталонного тестового сигнала, который может учитывать реальные условия измерений, например, реверберацию или влияние свойств морского дна. Такой подход предполагает использование идеальных условий, в частности, акустической либо радиобезэховой камеры [9], измерения в которых по полю не требуют особой изобретательности. В гидроакустическом бассейне в условиях, отягощенных реверберацией звуковой волны, решение задачи валидации «в лоб» (использование шума в третьоктавной полосе частот для градуировки приемника — измерителя уровней подводного шума), дает составляющую погрешности градуировки, обусловленную неравномерностью поля в 2—2,5 дБ, на что указано в [10].

В качестве альтернативы можно предложить другое решение. Не пытаться воспроизводить в бассейне с помощью эталонных сигналов натурные условия для прямых измерений, а на основе единого понимания соотношения условий градуировки и измерений обеспечить единый подход к построению оптимальной, с точки зрения метрологии, модели гидроакустического приемника и ее использованию. Под метрологической моделью здесь понимается набор харак-

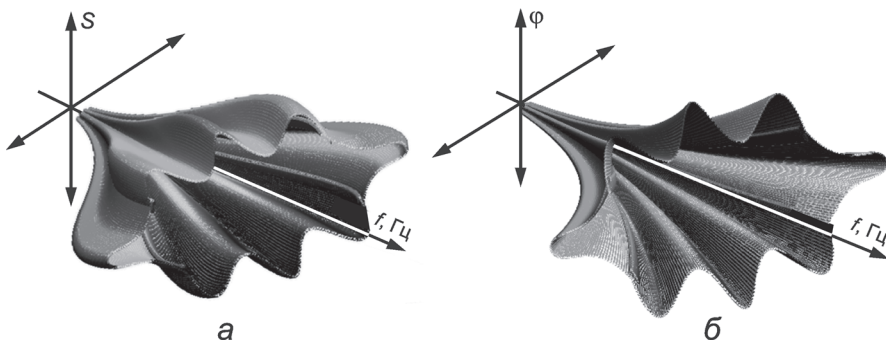


Рис. 3. 3D-модели амплитудно- (а) и фазочастотной (б) характеристик гидроакустического приемника

теристик, измеряемых при градуировке приемника, достаточный, чтобы расчетным методом получать любые метрологические параметры, требуемые для решения той или иной измерительной задачи. Поскольку любая исчерпывающая модель рано или поздно достигнет границ своей применимости, авторы считают, что полноту модели наращивать продуктивнее, чем число комбинаций сигналов и полей.

Осознавая, что буквальное понимание правила — передавать единицу необходимо на том сигнале и в тех условиях, в которых средство измерений будут применять по назначению, — плохо применимо к гидроакустическому приемнику, авторы предлагают воспользоваться свойством линейной системы: возможностью исчерпывающе описать ее во временной либо частотной области. Такое описание гидроакустического приемника можно использовать для построения всевозможных метрологических характеристик и параметров, в том числе и тех, которые надеялись получить прямыми измерениями «в лоб».

Так как точность измерений в свободном поле безэховой камеры выше, чем в диффузном поле, в воздушной акустике стандартизован пересчет характеристик по полю в характеристики по диффузному полю [11]. При использовании результатов пересчета современный шумомер позволяет одновременно измерять десятки параметров шума как в диффузном, так и свободном поле, причем некоторые из них требуют восстановления формы акустического сигнала. Конечно, и в воздушной акустике продолжается процесс стандартизации, однако накопленный опыт позволяет четко разделять параметры шумомера, определяемые при его градуировке, в зависимости от вида измеряемых звуковых полей и сигналов. Аналогичную задачу предстоит решать в гидроакустике.

Уже сегодня понятны требования к модели гидроакустического приемника, которая позволит измерять уровень звукового давления шума корабля с заданным частотным взвешиванием, для акустического импульса — измерять уровень звуковой экспозиции, среднеквадратическое и пиковые значения. Такую модель можно построить на основе измерений подробной частотной характеристики приемника по полю. Такие характеристики, измеренные в зависимости от угла падения звуковой волны, позволяют рассчитать характеристику направленности в полосе частот по полю, чувствительность в диффузном поле и другие метрологические характеристики приемника. Чувствительность в полосе частот можно вычислить как СКЗ в полосе частот подробной частотной характеристики гидрофона [5]. Совокупность подробной частотной и фазовой характеристик обеспечивает пра-

вильное измерение пикового значения импульсного акустического сигнала.

Отметим, что построение такой модели требует больших объемов измерительной информации, которые не может дать тонально-импульсный метод. Для измерений подробной амплитудно-фазовой частотной зависимости предпочтительно использовать сигналы с распределенной по частоте мощностью. Например, линейно-частотно-модулированный сигнал в условиях, отягощенных реверберацией звука, позволяет выполнить измерения по полю в гидроакустическом бассейне с эталонной точностью [12]. Измерив подробную частотную харак-

теристику при различных углах падения звуковой волны, можно построить исчерпывающую лабораторную 3D-модель гидроакустического приемника (рис. 3).

Закключение. Под калибровочными и измерительными возможностями метрологической лаборатории более правильно понимать не строки в SMS-данных на сайте BIPM, а способность лаборатории строить как можно более полные метрологические модели СИ и с их помощью получать как можно более широкий спектр частных сокращенных метрологических характеристик с тем, чтобы обеспечить решение возможно более широкого круга измерительных задач. Такие модели позволяют не только наглядно представить метрологические свойства приемника, но и использовать ее для сокращения объема экспериментальных исследований. Например, выполнив измерения характеристик направленности в «меридиональных» направлениях, можно не измерять, а увидеть и определить характеристики приемника в «широтных» направлениях. Напомним, что основная задача исчерпывающей лабораторной модели — получить упомянутые выше частные метрологические характеристики для решения конкретной измерительной задачи.

Л и т е р а т у р а

1. **Исаев А. Е.** Лабораторная градуировка приемника для измерений уровней подводного шума корабля // Измерительная техника. 2015. № 1. С. 53—58.
2. **Исаев А. Е., Поликарпов А. М.** Проблемы валидации при градуировке приемников подводного шума // Альманах современной метрологии. 2014. № 1. С. 119—160.
3. **IEC 60500.** IEC standard hydrophone. Publication date: 1974-1-1.
4. **IEC 60565 (2006).** Underwater acoustic — Hydrophones — calibration in the frequency range 0,01 Hz to 1 MHz.
5. **Исаев А. Е.** Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево: Изд-во ВНИИФТРИ, 2008.
6. **ANSI S12.64—2009.** Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships. Part 1: General Requirements.
7. **Robinson S.** Review of methods for low frequency transducer calibration in reverberant tanks // PL Report CMAM 034. ISSN 1369-6785. 1999.
8. **Det Norske Veritas AS.** Rules for classification of ships. Part 6 Chapter 24. Newbuildings, Special Equipment and Systems Additional Class. Silent class notation. 2011.

9. Тищенко В. А. О радиобезэховой камере // Альманах современной метрологии 2014. № 1. С. 338—341.

10. Лопашев Д. З. Исследование звукового поля в большом измерительном бассейне // Исследования в области акустических и гидроакустических измерений: Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР, 1963. Вып. 73(133). С. 31—40.

11. ГОСТ Р 53188.2—2010. ГСИ. Шумомеры. Ч. 2. Методы испытаний.

12. Chen Yi, Isaev A. E., Wang Yuebing, Enyakov A. M., Fei Teng Matveev, A. N. The COOMET Pilot Comparison 473/RU-a/09: Comparison of hydrophone calibrations in the frequency range 250 Hz to 200 kHz // Metrologia Tech. Suppl. 2011 48 09004.

Дата принятия 06.02.2015 г.

ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

539.124:539.125.4:539.1.074.5:53.082

Спектрометрический алмазный детектор потоков ионизирующего излучения для транспортных космических систем

К. В. ЗАХАРЧЕНКО¹, А. Ф. КАПЕРКО², В. А. КОЛЮБИН¹, В. П. КУЛАГИН²,
С. А. ЛЬВОВ¹, П. Г. НЕДОСЕКИН¹, Е. Н. ЧУМАЧЕНКО²

¹ ООО Производственно-технологический центр «УралАлмазИнвест»,
Москва, Россия, e-mail: nanophys@mail.ru

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва,
Россия, e-mail: akaperko@hse.ru

Рассмотрены принципиальные подходы к построению спектрометрического алмазного детектора потоков ионизирующего излучения. Прибор предназначен для непрерывного контроля радиационной обстановки на борту космических аппаратов с целью оперативного принятия мер по активной защите и прогнозирования остаточного ресурса работы транспортных космических систем.

Ключевые слова: спектрометрический алмазный детектор, космическое излучение, электрон, протон, тяжелый ион.

The principal approaches to construction of spectrometric diamond detector of ionizing radiation fluxes has been considered. The instrument is intended for continuous monitoring of the spacecraft onboard radiation safety for prompt taking measures for active protect and to prediction of the residual life time of space transportation systems.

Key words: spectrometric diamond detector, space radiation, electron, proton, heavy ion.

Прогнозирование неблагоприятной радиационной обстановки и использование активных способов радиационной защиты космических аппаратов являются важными направлениями увеличения их сроков функционирования. Для этого космические аппараты снабжают измерительными приборами непрерывного мониторинга космического излучения. Увеличение ресурсов работы таких аппаратов до 10—15 лет приводит к необходимости использования детекторов, способных сохранять работоспособность при значениях поглощенной дозы до 200 Мрад.

Алмазные детекторы ионизирующего излучения обладают требуемой радиационной стойкостью [1, 2]. Однако их применение для построения аппаратуры мониторинга космического излучения имеет ряд специфических аспектов [3, 4]. При создании многоцелевых приборов измерения потоков ионизирующего и космического излучений, обеспечивающих контроль энергетических характеристик, таких как корпускулярные потоки электронов, протонов, измерения линейной

передачи энергии (ЛПЭ) тяжелых ионов, т. е. тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), недостаточная радиационная стойкость кремниевых, газоразрядных и сцинтилляционных детекторов является обычной проблемой. Приборы остаются работоспособными на орбите около 3—4 лет [3—5]. Использование алмазных детекторов ионизирующего излучения позволяет создавать измерительные приборы, в том числе спектрометрические, с ресурсом работы до 20 лет и более, что особенно важно при создании транспортных космических систем. Малые габаритные размеры, температурная стойкость, отсутствие высоковольтных источников питания, сравнительно простые схемы преобразования сигналов — эти свойства алмазных детекторов позволяют создавать спектрометры высокого разрешения. Такие спектрометры могут быть построены по принципу многодетекторных систем с применением селективных фильтров — поглотителей ионизирующего излучения [6].