

## Анализ характеристик электроохладителей для ОЧГ-детекторов гамма-излучения

Появление на рынке малогабаритных и, в то же время, достаточно мощных электроохладителей различного типа открывает перспективу разработки широкого спектра ядерно-физической аппаратуры на основе ОЧГ-детекторов с применением таких электроохладителей. В статье дан обзор электроохладителей, пригодных для охлаждения ОЧГ-детекторов, анализ их преимуществ и недостатков для решения конкретных задач по созданию гамма-спектрометрической аппаратуры для различных применений. Представлены примеры реализации спектрометрической аппаратуры на основе ОЧГ-детекторов с электроохлаждением и ее характеристики.

Ключевые слова: гамма-спектрометрия, электроохладители, ОЧГ-детекторы.

О. Д. Соколов, А. Б. Пчелинцев, В. В. Гостило

### Аналіз характеристик електроохолоджувачів для ОЧГ-детекторів гамма-випромінювання

Поява на ринку малогабаритних і, водночас, досить потужних електроохолоджувачів різного типу відкриває перспективу розробки широкого спектра ядерно-фізичної апаратури на основі ОЧГ-детекторів із застосуванням таких електроохолоджувачів. У статті наведено огляд електроохолоджувачів, придатних для охолодження ОЧГ-детекторів, аналіз їх переваг і недоліків для вирішення конкретних завдань зі створення гамма-спектрометричної апаратури для різних застосувань. Представлено приклади реалізації спектрометричної апаратури на основі ОЧГ-детекторів з електроохолодженням та її характеристики.

Ключові слова: гамма-спектрометрія, електроохолоджувачі, ОЧГ-детектори.

© А. Д. Соколов, А. Б. Пчелинцев, В. В. Гостило, 2015

Обладея превосходным энергетическим разрешением и высокой эффективностью регистрации гамма-излучения, полупроводниковые детекторы из особо чистого германия (ОЧГ) уже на протяжении десятилетий являются бесспорным лидером среди всех типов детекторов в прецизионной гамма-спектрометрии [1]. На основе ОЧГ-детекторов выпускается широкий спектр аппаратуры для прецизионного анализа радионуклидов с целью решения различных задач атомной энергетики и охраны окружающей среды, медицины и геологии, научных исследований и других применений [2, 3]. Однако для обеспечения своих превосходных характеристик ОЧГ-детекторы должны быть охлаждены до температуры ниже 100 К [1]. В связи с этим сосуд Дьюара с жидким азотом на протяжении многих лет был (и пока остается) незаменимым спутником ОЧГ-детекторов.

Попытки применения других методов охлаждения ОЧГ-детекторов не дали значимых результатов. Используемые для охлаждения кремниевых полупроводниковых детекторов термоохладители Пельтье [4–6] маломощны и для охлаждения достаточно массивных ОЧГ-детекторов абсолютно неприемлемы. Криоаккумуляторы для охлаждения ОЧГ-детекторов эффективны только в уникальных случаях, да и сами криоаккумуляторы нужно охлаждать с помощью того же жидкого азота [7].

На фоне других активных средств охлаждения электроохладители (ЭО), построенные на основе различных термодинамических циклов, выглядят намного перспективней [8]. Первый германиевый детектор (тогда еще германий-литиевый), охлажденный ЭО на цикле Стирлинга, авторы разработали и испытали ещё в 1979 году. Сам ЭО охлаждался водооборотной системой, потреблял более 850 Вт, обеспечивая при этом мощность охлаждения около 2 Вт при температуре 80 К. Масса детектора с системой охлаждения превышала 90 кг.

В 1990-х годах фирмы Canberra, PGT и BSI начали выпуск блоков детектирования гамма-излучения на основе ЭО Cryotiger [9], работавшего на цикле Джоуля–Томсона. Долгое время он оставался единственным на рынке ЭО среди приемлемых для применения с ОЧГ-детекторами. Имея большие габаритные размеры, он позволял создавать стационарные спектрометры, главным образом, индустриального применения. Однако появление на рынке малогабаритных и, в то же время, достаточно мощных ЭО различного типа открывает перспективу разработки широкого спектра ядерно-физической аппаратуры на основе ОЧГ-детекторов с применением таких ЭО [10, 11].

В статье представлен обзор ЭО, пригодных для охлаждения ОЧГ-детекторов, анализ их преимуществ и недостатков для решения задач по созданию гамма-спектрометрической аппаратуры для различных применений.

**Анализ характеристик электроохладителей.** Несмотря на кажущееся обилие ЭО на рынке, выбор их для задач ядерной спектрометрии весьма ограничен. Еще более ограничен список фирм, выпускающих электроохладители, потенциально пригодные для решаемых задач. Для предварительного отбора ЭО мы использовали следующие критерии: холодильная мощность не менее 1 Вт при температуре 77–80 К; низкий уровень вибраций (менее 10 Н); большое время наработки на отказ (свыше 25000 ч) при непрерывном режиме работы; стабильность параметров в широком диапазоне условий окружающей среды; минимальные габаритные размеры.

Таблица 1. Параметры электроохладителей различных фирм

Параметры	Название компании, страна, охладитель									
	Brooks, США PCC Compact Cooler	QDrive, США 2S102K	SunPower, США			Cobham, США LC1066	Fuji Electric Systems, Япония Cryocooler	Rigor, Израиль K535	Thales Cryogenics, Франция LPT9310	AIM Infracool- Module, Германия SF400-PT
			CryofelMT	CryofelCT	CryofelSGT					
Тип охладителя	Цикл Джоуля—Томсона	Цикл Стирлинга с импульсной трубкой	Цикл Стирлинга			Цикл Стирлинга с импульсной трубкой		Цикл Стирлинга		Цикл Стирлинга с импульсной трубкой
Макс. размеры компрессора, мм	365×311×454	D 140×300	D 73×243	D 83×261	D 83×280	D 65×125	D 261×263	329×274×139	D 90×204	D 75×160
Макс. масса охладителя, кг	40	15	2.1	3.1	3.1	2,5	10	9	8	5
Макс. мощность охлаждения при 80 К, Вт (при 23 °С окружающей среды)	3	6	16	16	16	1	2,5	7	5	1,5
Макс. потребляемая мощность, Вт	800	300	80	160	240	80	120	240	200	80
Макс. уровень вибрации хладопровода, Н	2	2	5	10	15	0,7	1	3	0,5	—
Макс. уровень вибрации компрессора, Н	10	10	10	10	10	10	10	10	6	—

По результатам поиска (табл. 1) проанализированы особенности, преимущества и недостатки конкретных типов ЭО.

*Brooks, США* [9]. Как уже упоминалось, один из первых ЭО, на котором были созданы спектрометры на основе ОЧГ-детекторов, — это ЭО Cryotiger, работавший на цикле Джоуля—Томсона. Модернизированная версия такого ЭО позже получила название PCC Compact Cooler. При массе около 40 кг и потребляемой мощности 600 Вт (в режиме максимального охлаждения — до 800 Вт) реальная мощность охлаждения обеспечивается на уровне 2,5—3,0 Вт. Отметим, что в головке охладителя нет движущихся частей, и влияние микрофонного эффекта на параметры детектора минимально: как правило, оно не превышает нескольких процентов энергетического разрешения детектора, охлаждаемого азотом. Время выхода на рабочую температуру составляет 10—12 ч в зависимости от объема чувствительной области детектора.

Фирма BSI выпустила более 25 ОЧГ-спектрометров на основе данных ЭО, которые до сих пор надежно работают на многих АЭС в различных странах. На рис. 1

представлен спектрометр фирмы BSI, включающий ОЧГ-детектор в криостате на основе охлаждающей головки, компрессор, многоканальный анализатор на базе компьютера с программным обеспечением. В настоящее время производство данных спектрометров прекращено в связи с появлением более современных ЭО, однако сервисная поддержка осуществляется до сих пор.

*QDrive, США* [12]. ЭО 2S102K при потребляемой мощности 250—300 Вт и массе менее 15 кг обеспечивает мощность охлаждения около 6 Вт, при этом время выхода на рабочую температуру существенно меньше, чем в PCC Compact Cooler, — не более 4 ч. Несмотря на применение гибкого сильфонного шланга для соединения компрессора и охлаждающей головки, ощущается влияние вибраций от компрессора; при этом удаётся получить приемлемые значения энергетического разрешения (на 10—15% хуже, чем значения, достигаемые при охлаждении жидким азотом).

Вместе с тем, при исследовании характеристик 12 данных ЭО нами была обнаружена их временная нестабильность, полностью исключающая их применение



Рис. 1. ОЧГ-спектрометр на базе электроохладителя Джоуля—Томсона



Рис. 2. Миниатюрный ОЧГ гамма-спектрометр для космических применений

с ОЧГ-детекторами: в процессе испытаний через 200—300 ч работы мощность охлаждения падала на 50%, а температура охлаждения повышалась на 7—8 градусов.

*SunPower, США* [13]. Данная фирма производит несколько типов охладителей, приемлемых для применения с ОЧГ-детекторами и относящихся к группе ЭО CryoTel DS2.4; это ЭО по циклу Стирлинга с уникальным КПД, но он нам не был доступен. При потребляемой мощности всего 35 Вт он обеспечивает мощность охлаждения более 2,4 Вт. Остальные ЭО с различной мощностью охлаждения на уровне 77 К (CryoTelGT — 16 Вт; CryoTelCT — 8 Вт; CryoTelMT — 4...5 Вт) могут быть использованы с ОЧГ-детекторами различного объема. Все охладители имеют гасители вибраций — пассивную балансировку, настроенную на 60 Гц, — и поглощают энергию колебаний на этой частоте. Таким образом, влияние вибраций на энергетическое разрешение детекторов минимально и не превышает 10—11%.

Мы изготовили и испытали четыре ОЧГ-спектрометра с ЭО CryoTelGT. После этого фирма-производитель была куплена фирмой Ametek/Ortec, США [11], и мы, являясь конкурентом фирме Ametek, потеряли возможность дальнейшей закупки данных ЭО.

*Cobham, США* [14]. Охладитель LC1066 имеет небольшие габариты, масса всего 2,5 кг, при этом обеспечивает 1—1,5 Вт и более мощности охлаждения при потребляемой мощности менее 80 Вт. Обладает очень малым уровнем вибраций хладопровода — всего 0,7 Н. Для сравнения, значение этого параметра модели охладителя CryoTelGT (SunPower) составляет 8...10 Н. Компрессор охладителя отделен от головки тонким герметичным (на сварке) трубопроводом, хорошо сбалансирован и имеет малый уровень вибраций, не более 5 Н. Это преимущество дает возможность обеспечить низкое (5—6% и менее) влияние

на энергетическое разрешение детекторов. Конечно, относительно малая мощность охлаждения не позволяет охладить детекторы с эффективностью регистрации более 20%, и при этом время выхода на температуру 80 К составляет более 20 ч.

*Fuji Electric Systems, Япония* [15]. ЭО Cryocooler при потребляемой мощности 120 Вт обеспечивает не менее 2,5 Вт охлаждающей мощности при температуре 80 К. Масса охладителя — не более 10 кг. Вибрации хладопровода — на уровне 1 Н, а компрессора — порядка 10 Н. По своим характеристикам этот охладитель подходит для применения с ОЧГ-детекторами, однако на наш заказ электроохладителя производитель ответил, что не может поставлять данный охладитель в страны Евросоюза.

*Ricor, Израиль* [16]. ЭО K535 — охладитель совмещенного типа с двумя разнесенными компрессорами, работающими в противофазе с целью компенсации вибраций хладопровода. При потребляемой мощности 240 Вт он обеспечивает около 7 Вт мощности охлаждения на уровне 80 К. Фирма Ortec, USA [11], создала на его базе спектрометр для портальных мониторов с эффективностью ОЧГ-детекторов 45% и влиянием вибраций не более 10%. Однако со стабильностью работы в непрерывном режиме отмечались некоторые проблемы, и изделие в 2011 году было снято с производства.

Перед нами не стояла задача, в которой нужно было бы использовать Ricor K535. Однако мы использовали другой тип ЭО — K508 — данной фирмы в разработке миниатюрного гамма-спектрометра для дистанционных космических применений [17]. Спектрометр (рис. 2) сконструирован на основе ОЧГ-детектора N-типа с 30%-й эффективностью регистрации, охлаждаемого до рабочих температур активным миниатюризированным ЭО Стирлинга Ricor K508. Масса спектрометра с основанием

составила 2,9 кг, потребляемая мощность — менее 10 Вт. Термоизолированный блок спектрометра, включающий ОЧГ-детектор с системой отжига и ЭО со встроенным контроллером и предварительной электроникой, были испытаны в специально сконструированной вакуумной камере, имитирующей условия космоса. Энергетическое разрешение составило около 4 кэВ по энергии 1,33 МэВ при выключенном охладителе Стирлинга и около 5,9 кэВ — при включенном. Энергетическое разрешение по энергии 122 кэВ составило приблизительно 2,0 кэВ при выключенном охладителе Стирлинга и 4,0 кэВ — при включенном. Результаты испытаний показали, что механическая вибрация Ricor K508 и особенно электромагнитные помехи (шумы) его встроенного контроллера были основными причинами ухудшения энергетического разрешения спектрометра. В течение всего времени тестирования характеристики спектрометра имели хорошую временную стабильность.

*Thales Cryogenics, Франция* [18]. Параметры охладителя LPT9310 очень многообещающие: малые вибрации, небольшие масса и габариты, достаточная мощность охлаждения при потребляемой мощности порядка 190 Вт. В приобретении этого охладителя нам было отказано, так как лицензия на все охладители Стирлинга с технологией «пульсирующей трубки» была продана фирме Canbega [10]. Вместо этих охладителей нами были приобретены охладители типа LSF9340, выполненные по технологии без импульсной трубки и работающие по стандартному циклу Стирлинга. При входной мощности 170 Вт охладитель обеспечивает до 7 Вт мощности охлаждения при 80 К. Компрессор двухцилиндровый, с противофазной балансировкой, максимальный уровень вибраций 6 Н. Уровень вибраций на хладопроводе — менее 1,5 Н, что обеспечивается с помощью встроенного в головку специального компенсатора.

На базе данного охладителя нами был разработан спектрометрический модуль для применения в составе портальных радиационных мониторов (рис. 3). Спектрометр с ОЧГ-детектором 45%-й эффективности на основе этого охладителя обеспечивает энергетическое разрешение менее 2,0 кэВ для энергии 1,33 МэВ и не более 1,0 кэВ для энергии 122 кэВ. Ухудшение энергетического разрешения — не более 6%. Изготовитель оценивает среднее

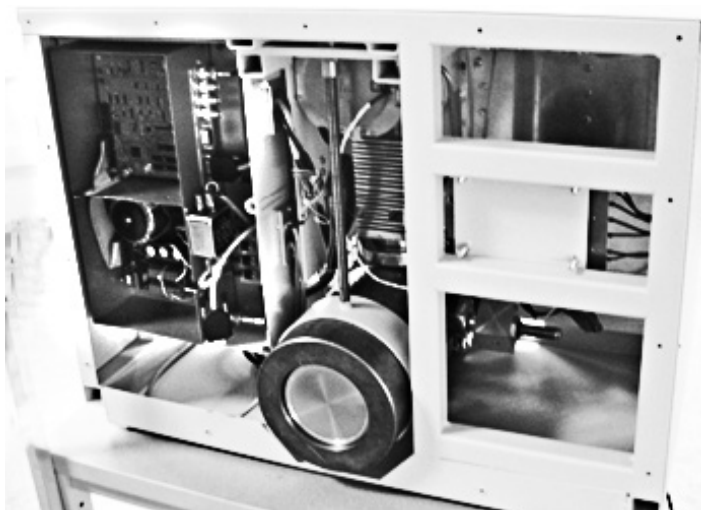


Рис. 3. Спектрометрический модуль для портальных радиационных мониторов (без передней стенки)

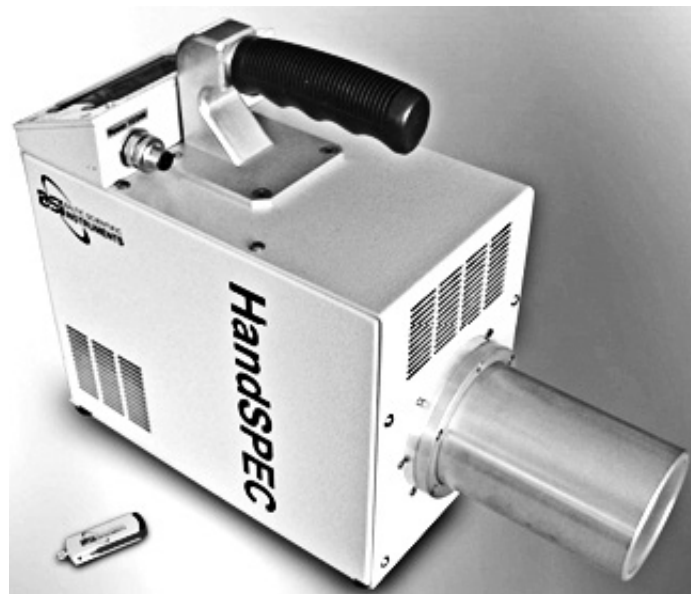


Рис. 4. Портативный ОЧГ-спектрометр на базе электроохладителя фирмы AIM Infrarot-Module

время наработки на отказ (МВТФ) данного ЭО порядка 40 000 ч, что должно обеспечить пять-шесть лет непрерывной работы.

*AIM Infrarot-Module, Германия* [19]. ЭО SF400-PT выполнен по стандартному циклу Стирлинга без технологии «пульсирующей трубки»; в этой связи его КПД достаточно высок. При потребляемой мощности 80 Вт он обеспечивает мощность охлаждения более 3 Вт (на уровне 80 К). Это позволяет устанавливать в криостат спектрометра коаксиальные ОЧГ-детекторы с эффективностью регистрации до 40% и планарные детекторы с чувствительной площадью до 3000 мм<sup>2</sup>. Время охлаждения детектора — не более 8 ч.

Данный тип ЭО использован нами для охлаждения ОЧГ-детектора с эффективностью регистрации 10% в портативном спектрометре для полевых применений (рис. 4) [20]. Полученное энергетическое разрешение спектрометра составило менее 1,0 и 2,0 кэВ по энергиям 122 и 1332 кэВ, соответственно. Изготовитель не приводит в документации значений уровня вибраций, однако, по нашим результатам, влияние вибраций на энергетическое разрешение не превышает 10%. Очевидно, введение в головку специального балансира дает хороший эффект.

**Результаты и их обсуждение.** Применение ЭО для охлаждения ОЧГ-детекторов гамма-излучения является побочным для производителей этих охладителей. Поэтому многие характеристики ЭО, которые важны для прецизионной гамма-спектрометрии, разработчикам данной аппаратуры приходится исследовать самим.

Безусловно, самым важным параметром, определяющим применимость ЭО с ОЧГ-детекторами, является влияние их вибраций на энергетическое разрешение детекторов. Вышеприведенные оценки ухудшения энергетического разрешения ОЧГ детекторов с ЭО различных типов по сравнению с теми значениями, которые детекторы имеют при охлаждении жидким азотом, обобщены в виде гистограммы распределений по типам электроохладителей (рис. 5).

Как видно из гистограммы, наименьший вклад в ухудшение энергетического разрешения обеспечивают

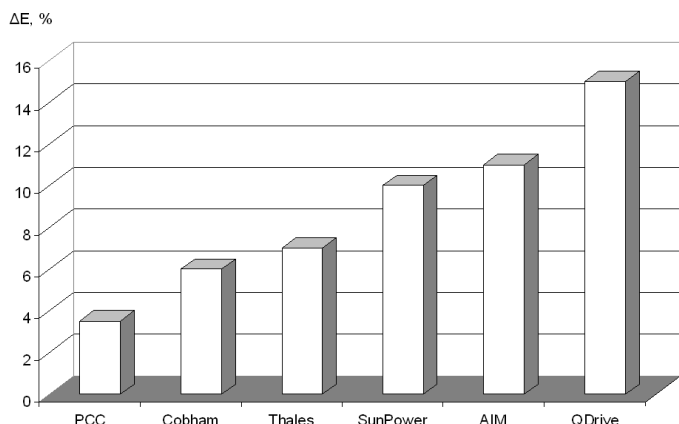


Рис. 5. Степень влияния вибрации различных ЭО на энергетическое разрешение ОЧГ-детекторов

охладители PCC — до 5%. Охладители фирм Cobham и Thales ухудшают данный показатель на 6...7%, SunPower и AIM Infrarot-Module — на 10...11%.

Несмотря на недостаточную статистику по некоторым типам ЭО, этот график достаточно наглядно представляет качество электроохладителей с точки зрения их влияния на энергетическое разрешение детекторов. Безусловно, степень влияния механических вибраций на энергетическое разрешение детекторов зависит и от примененных в конкретных приборах конструктивных решений (демпферы, компенсаторы и т. д.). Однако мы применяем такие технические решения в любой аппаратуре, стараясь максимально ослабить влияние вибраций на энергетическое разрешение детекторов.

Согласно полученным временным графикам выхода на рабочую температуру (operation  $t^0$ ) ОЧГ-детекторов с 30%-й эффективностью (т. е. с реально одинаковой тепловой нагрузкой примерно 2 Вт) с различными типами ЭО (рис. 6), время выхода детектора на режим хорошо коррелирует с мощностью охлаждения ЭО: чем больше мощность охлаждения, тем быстрее достигается рабочая температура детектора порядка 80 К. Видно, что охладитель Cobham LC1066, имеющий мощность охлаждения приблизительно

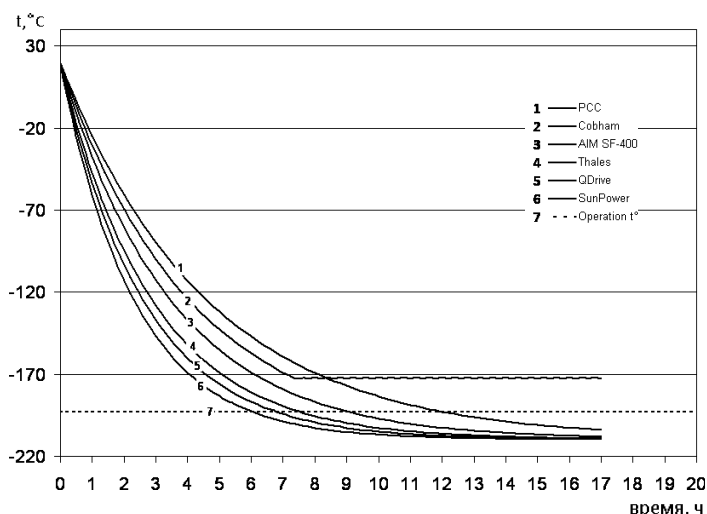


Рис. 6. График выхода на рабочую температуру различных типов ЭО с ОЧГ-детектором 30 %-й эффективности регистрации

1,5 Вт, достиг за 20 ч температуры только  $-172$  °C (91 K), и это предел его возможности для ОЧГ-детектора данного объема. Мощные охладители типа CryoTelGT (SunPower), 2S102K (QDrive) достигают 80 K за 4...5 ч. Отметим высокую стабильность поддержания температуры охладителями фирмы Thales Cryogenics и SunPower на уровне  $\Delta T = \pm(0,5...0,6)$  °C.

## Выводы

Выбор электроохладителей для применения в ядерно-физической аппаратуре в настоящее время невелик. Основной проблемой охлаждения ОЧГ-детекторов является уровень вибраций электроохладителей, приводящий к ухудшению энергетического разрешения детекторов. Тем не менее, даже имеющиеся на рынке электроохладители позволяют создавать аппаратуру с приемлемыми для решения многих технических задач характеристиками. Дальнейшее же развитие рынка малогабаритных и, в то же время, достаточно мощных электроохладителей различного типа открывает перспективу разработки широкого спектра ядерно-физической аппаратуры на основе ОЧГ-детекторов с применением таких электроохладителей.

\*\*\*

Представленные результаты получены в рамках исследовательского проекта No. 1.8 «Разработка унифицированного спектрометрического модуля для портальных радиационных мониторов», поддержанного Европейским фондом регионального развития (контракт No. L-KC-11-0002 между Центром компетенции транспортного машиностроения (<http://tmkc.lv/>) и Латвийским агентством инвестиций и развития ([www.liaa.gov.lv](http://www.liaa.gov.lv)). Авторы выражают свою благодарность указанным организациям за поддержку исследований и разработок.

## Список использованной литературы

1. Knoll, G. (2000), Radiation Detection and Measurements. 3rd ed., John Wiley&Sons, 720 p.
2. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов : Пер. с англ. ВНИИА / Д. Райлли, Н. Энслин, Х. Смит мл, С. Крайнер. — М. : ЗАО «Изд-во Бином», 2000. — 820 с.
3. Gilmore, G. (2008). Practical Gamma-Ray Spectrometry. 2nd edition., ISBN 978-0-470-86196-7.
4. Sokolov, A., Pchelintsev, A., Loupilov, A., Gostilo, V. (2006). Electrically Cooled SiLi Detectors for Application in X-Ray Equipment, Mikrochimica Acta, 155, p. 285.
5. Sokolov, A., Loupilov, A., Gostilo, V. (2004). Semiconductor Peltier-cooled detectors for X-ray fluorescence analysis, X-Ray Spectrometry, Vol. 33, p. 462.
6. Анатычук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства : Справочник. — К. : Наук. думка, 1979. — 385 с.
7. Sokolov, A., Danengirsh, S., Popov, S., Pchelintsev, A., Gostilo, V., Druzhinin, A., Maximov, M., Lebedev, N., Shapovalov, V. Autonomous Deep-Water Gamma Spectrometer Based on HPGe Detector. Proc. of 21st Annual Symposium on Safeguards and Nuclear Material Management. Sevilla, Spain, 4-6 May, 1999.
8. Холодильная техника и технология / С. А. Большаков, В. Ф. Лебедев, А. В. Локтев, А. В. Руцкий; под ред. А. В. Руцко-го. — М. : ИНФРА-М, 2000. — 286 с.
9. PCC Compact Coolers — Next Generation CryoTiger, Available at: <http://www.brooks.com/products/cryopumps-cryochillers/cryochillers/pcc-compact-coolers>
10. Canberra Industries. Measurement Solutions for Nuclear Safety, Security and Environment, Available at: [www.canberra.com](http://www.canberra.com)

11. ORTEC homepage. Available at [www.ortec-online.com](http://www.ortec-online.com)
12. Cryocoolers 2S102K. Available at: <http://www.chartindustries.com/Industry/Industry-Products/Gas-Systems/Qdrive/Qdrive-Products/Cryocoolers/Cryocoolers-2S102K>
13. Cryotel Cryocoolers. Available at: Sunpower <http://sunpowerinc.com/cryocoolers/cryotel-family/>
14. Cryogenic cooling systems. Available at: <http://www.cobham.com/about-cobham/mission-systems/tactical-control-systems/products-and-services/cryogenic-cooling-systems.aspx>
15. Cryocoolers. Available at: <http://www.fujielectric.co.jp/products/cryocooler/index.html>
16. Cryocoolers for scientific instruments. Dual Opposed Linear Stirling Cryocooler K535. Available at: <http://www.ricor.com/products/cryocoolers-for-scientific-instruments/k535/>
17. Pchelintsev, A., Sokolov, A., Shorohov, M., Gostilo, V. Performance of a miniature Gamma Spectrometer for remote sensing planetary applications and perspective of its improvement. CD Proceedings of the 4th International Scientific Conference “Baltic Applied Astroinformatics and Space data Processing”, 20–21 August, 2015, Ventspils, Latvia.
18. LPT Pulse-tube coolers. Available at: <http://www.thales-cryogenics.com/product-category/coolers/lpt/>
19. Cryocoolers. Available at: <http://www.aim-ir.com/en/main/products/cryocoolers.html>
20. Результаты разработки портативного ОЧГ-спектрометра с электроохлаждением для полевых применений / В. Ф. Кондратьев, Э. Л. Лошевич, А. Б. Пчелинцев, А. Д. Соколов, В. В. Гостило // Ядерна та радіаційна безпека. — 2015. — Вып. 3(67). — С. 54.

## References

1. Knoll, G. (2000), “Radiation Detection and Measurements”, 3rd ed., John Wiley&Sons, 720 p.
2. Reilly, D., Ensslin, N., Smith Jr., H., Kreiner, S. (2000), “Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials” [Passivnyi nerazrushaiushchii analiz yadernykh materialov], Translated from English, Moscow, Binom Pub., 820 p. (Rus)
3. Gilmore, G. (2008). “Practical Gamma-Ray Spectrometry”, 2nd edition, ISBN 978-0-470-86196-7.
4. Sokolov, A., Pchelintsev, A., Loupilov, A., Gostilo, V. (2006), “Electrically Cooled SiLi Detectors for Application in X-Ray Equipment”, Mikrochimica Acta, 155, 285 p.
5. Sokolov, A., Loupilov, A., Gostilo, V. (2004). “Semiconductor Peltier-Cooled Detectors for X-ray Fluorescence Analysis”, X-Ray Spectrometry, Vol. 33, 462 p.
6. Anatychuk, L. I. (1979), “Thermoelements and Electrical Devices” [Termoelementy i termoelektricheskiye ustroystva], Reference Book, Kyiv, Naukova Dumka, 1979, 385 p. (Rus)

7. Sokolov, A., Danengirsh, S., Popov, S., Pchelintsev, A., Gostilo, V., Druzhinin, A., Maximov, M., Lebedev, N., Shapovalov, V. (1999), “Autonomous Deep-Water Gamma Spectrometer Based on HPGe Detector”, Proc. of 21st Annual Symposium on Safeguards and Nuclear Material Management, Sevilla, Spain, 4–6 May.
8. Bolshakov, S. A., Lebedev, V. F., Loktev, A. V., Rutsikii, A. V. (2000), “Cooling Machines and Technology” [Kholodilnaia tekhnika i tekhnologii], Moscow, INFRA-M, 286 p. (Rus)
9. PCC Compact Coolers — Next Generation CryoTiger, available at: <http://www.brooks.com/products/cryopumps-cryochillers/cryochillers/pcc-compact-coolers>
10. Canberra Industries. Measurement Solutions for Nuclear Safety, Security and Environment, available at: [www.canberra.com](http://www.canberra.com)
11. ORTEC homepage, available at [www.ortec-online.com](http://www.ortec-online.com)
12. Cryocoolers 2S102K, available at: <http://www.chartindustries.com/Industry/Industry-Products/Gas-Systems/Qdrive/Qdrive-Products/Cryocoolers/Cryocoolers-2S102K>
13. Cryotel Cryocoolers, available at: Sunpower <http://sunpowerinc.com/cryocoolers/cryotel-family/>
14. Cryogenic Cooling Systems, available at: <http://www.cobham.com/about-cobham/mission-systems/tactical-control-systems/products-and-services/cryogenic-cooling-systems.aspx>
15. Cryocoolers, available at: <http://www.fujielectric.co.jp/products/cryocooler/index.html>
16. Cryocoolers for scientific instruments. Dual Opposed Linear Stirling Cryocooler K535, available at: <http://www.ricor.com/products/cryocoolers-for-scientific-instruments/k535/>
17. Pchelintsev, A., Sokolov, A., Shorohov, M., Gostilo, V. (2015), “Performance of a Miniature Gamma Spectrometer for Remote Sensing Planetary Applications and Perspective of its Improvement”, CD Proceedings of the 4th International Scientific Conference “Baltic Applied Astroinformatics and Space data Processing”, 20–21 August, Ventspils, Latvia.
18. LPT Pulse-Tube Coolers, available at: <http://www.thales-cryogenics.com/product-category/coolers/lpt/>
19. Cryocoolers, available at: <http://www.aim-ir.com/en/main/products/cryocoolers.html>
20. Kondratiev, V. F., Loshevich, E. L., Pchelintsev, A. B., Sokolov, A. D., Gostilo, V. V. (2015), “Development Results of Portable Gamma-Radiation HPGe Spectrometer with Electric Cooling for Field Applications” [Rezultaty razrabotki portativnogo OChG-spektrometra s elektroohlazhdeniim dlia polevykh primeneni], Nuclear and Radiation Safety, No. 3(67), 54 p. (Rus)

Получено 17.06.2015.