

## ДРУГИЕ ВОПРОСЫ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-175-183  
UDC 629.5.083.8:621.039.58

Н.Л. Кучин, В.С. Кызьюров, А.И. Лайкин, Ю.В. Михеев, С.М. Рубанов  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

## РАДИАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ И ПОДЪЕМЕ ЗАТОНУВШИХ И ЗАТОПЛЕННЫХ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ

**Объект и цель научной работы.** Объектом научной работы является морской радиационный мониторинг, целью – оценка результатов исследований Крыловского государственного научного центра (КГНЦ) в области морского радиационного мониторинга.

**Материалы и методы.** Анализ перспектив использования измерительных комплексов для проведения радиационного мониторинга.

**Основные результаты.** Получена оценка результатов работ КГНЦ по морскому радиационному мониторингу.

**Закключение.** Выполненные сотрудниками КГНЦ работы по морскому радиационному мониторингу и разработка методов и средств проведения таких работ внесли заметный вклад в решение проблемы реабилитации морских акваторий. Накопленный за несколько десятилетий опыт работ с высокотехнологичным оборудованием и методиками может быть востребован при решении принципиально новых задач, связанных с освоением Арктики, и при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

**Ключевые слова:** радиационный мониторинг, погружной гамма-спектрометр, радионуклиды, ядерно и радиационно опасные объекты.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

## MISCELLANEOUS

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-175-183  
UDC 629.5.083.8:621.039.58

N. Kuchin, V. Kyzurov, A. Laikin, Yu. Mikheev, S. Rubanov  
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

## RADIATION MONITORING IN SURVEY AND RECOVERY OF POTENTIALLY HAZARDOUS SUNKEN MARINE TECHNOLOGY

**Object and purpose of research.** This paper studies marine radiation monitoring in order to assess Krylov State Research Centre (KSRC) achievements in this field.

**Materials and methods.** This paper analyses the prospects of instrumentation systems as radiation monitoring tools.

**Main results.** KSRC achievements in marine radiation monitoring have been assessed.

**Conclusion.** KSRC activities in marine radiation monitoring, as well as development corresponding techniques and hardware, have considerably facilitated the task of water area reclamation. The experience of applying high-tech equipment and techniques accumulated over several decades could be useful in solving totally new tasks of Arctic developments, as well as in aftermath mitigation of various disasters.

**Keywords:** radiation monitoring, immersible gamma-spectrometer, radionuclides, facilities with nuclear and radiation hazard.

*Authors declare lack of the possible conflicts of interests.*

*Для цитирования:* Кучин Н.Л., Кызьюров В.С., Лайкин А.И., Михеев Ю.В., Рубанов С.М. Радиационный мониторинг при обследовании и подъеме затонувших и затопленных потенциально опасных объектов морской техники. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; 1(387): 175–183.

*For citations:* Kuchin N., Kyzurov V., Laikin A., Mikheev Yu. Radiation monitoring in survey and recovery of potentially hazardous sunken marine technology. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019; 1(387): 175–183 (in Russian).

## Введение

### Introduction

Вторая половина XX века характеризовалась усилением антропогенного воздействия на гидросферу в результате загрязнения морей различными веществами техногенного происхождения. Радиоактивное загрязнение морской среды приводит к возникновению потенциальной угрозы радиационного воздействия на человека. В последнее время существенно вырос интерес к деятельности в арктическом регионе Российской Федерации. В связи с этим становится все более актуальной проблема экологической реабилитации акватории арктических морей, где в 1959–1993 гг. затоплялись ядерно и радиационно опасные объекты [9–11]. Решение этой проблемы невозможно без обследования состояния затопленных потенциально опасных объектов с целью выбора оптимальных способов подъема и оценки последствий их транспортировки к месту утилизации. Основным инструментом такого обследования, несомненно, является радиационный мониторинг.

При затоплении указанных объектов нельзя исключить возможность нарушения целостности барьеров безопасности, которые должны препятствовать выходу радионуклидов во внешнюю среду, что приводит к радиоактивному загрязнению моря в районе затопления. С течением времени радиоактивное загрязнение морской среды может возрастать вследствие коррозионного разрушения корпусных конструкций объектов. Мно-



**Рис. 1.** Глубоководной аппарата «МИР» с погружным гамма-спектрометром ЭКО-5

**Fig. 1.** *Mir* deepwater submersible with EKO-5 underwater gamma-spectrometer

гообразии задач, которые необходимо решать при проведении радиационного мониторинга морской среды, требует анализа перспектив использования различных измерительных комплексов и наличия опыта выполнения подобных работ. К таким работам, безусловно, могут быть отнесены уникальные по своему масштабу операции по обследованию состояния атомной подводной лодки (АПЛ) «Комсомолец» и подъему атомного подводного крейсера (АПК) «Курск», в которых авторы статьи принимали непосредственное участие [12].

Результаты разработки методов и средств подводного радиационного мониторинга позволили расширить круг задач по экологической реабилитации акваторий, решаемых с помощью радиационных методов. К таким задачам относится возможность неразрушающего контроля подозрительных объектов на морском дне.

## Подводный радиационный мониторинг

### Underwater radiation monitoring

Для подводного радиационного мониторинга оперативные средства являются наиболее востребованными. Это объясняется тем, что другие средства измерений (отбор проб воды и грунта и измерение их в стационарной лаборатории) в данных условиях значительно более трудоемки, а полученные результаты часто возможно только по прошествии большого периода времени (месяц и более). Проблема еще более обостряется при необходимости выявления мест выхода активности через поврежденные защитные оболочки, когда применение других средств требует высоких экономических и временных затрат. К наиболее оперативным и информативным методам подводного радиационного мониторинга относится метод гамма-спектрометрии с использованием погружных гамма-спектрометров. Погружные гамма-спектрометры позволяют оперативно оценить радиационно-экологическую ситуацию, степень разрушения защитных барьеров, отделяющих радиоактивные вещества от внешней среды, масштабы и уровень радиоактивного загрязнения акватории, возможность и степень безопасности проведения подводно-технических работ, а также осуществлять долго-временный мониторинг выхода радиоактивных материалов в акваторию.

ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (КГНЦ) имеет большой опыт разработки



**Рис. 2.** Размещение погружного гамма-спектрометра ЭКО-5 на борту глубоководного аппарата «МИР»

**Fig. 2.** Arrangement of EKO-5 aboard *Mir*



**Рис. 3.** Размещение погружного спектрометра ЭКО-5 на борту спасательного аппарата АС-34

**Fig. 3.** Arrangement of EKO-5 aboard AS-34 rescue vehicle

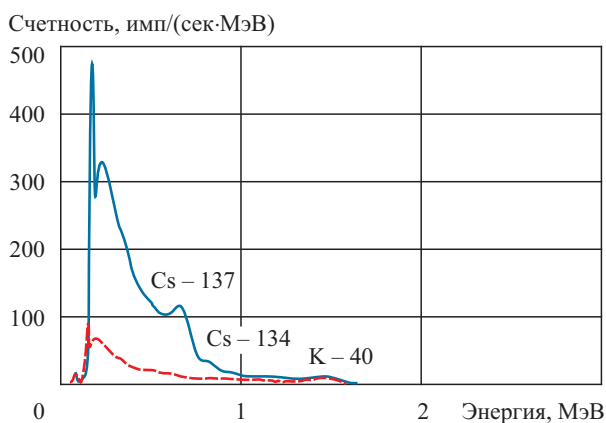
и применения погружных гамма-спектрометров. Так, спектрометр ЭКО-5 был разработан и использован для обследования затонувшей АПЛ «Комсомолец» и при обследовании АПК «Курск» после его гибели [1–4]. Спектрометр устанавливался на глубоководный обитаемый аппарат «МИР». Расположение детектора спектрометра в глубоководной капсуле на аппарате «МИР» показано на рис. 1 и 2. Приемная аппаратура находилась внутри аппарата. Результаты измерений записывались каждые 5 минут. В случае обнаружения радионуклида цезия  $^{137}\text{Cs}$  в морской воде с объемной активностью более  $500 \text{ Бк/м}^3$  пилотам аппарата поступал соответствующий сигнал. На рис. 3 показано размещение спектрометра на глубоководном спасательном аппарате АС-34 при обследовании АПК «Курск» через три недели после его гибели.

В дальнейшем были разработаны более совершенные модели погружных гамма-спектрометров ЭКО-7 и ЭКО-8. Особенностью спектрометра ЭКО-7 является использование углепластиковой капсулы, что делает спектрометр достаточно легким при хороших прочностных характеристиках.

Основная информация, содержащаяся в результатах измерений, заключена в энергетических спектрах гамма-излучения. На рис. 4 приведен энергетический спектр гамма-излучения вблизи корпуса затонувшей АПЛ «Комсомолец». Пики в зависимости счетности от энергии гамма-квантов свидетельствуют о поступлении радиоактивного теплоносителя во внешнюю среду, что подтверждается наличием радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Информация о чувствительности детектора позволяет опреде-

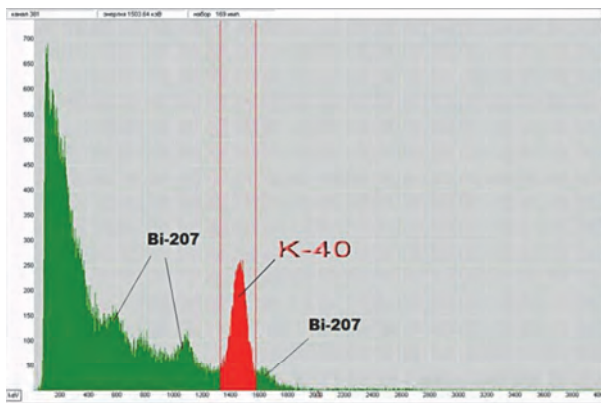
лить величину активности, поступившей во внешнюю среду, а соотношение между пиками – установить время прекращения работы реактора.

На основе полученного опыта разработок и применения погружных гамма-спектрометров сотрудниками КГНЦ совместно с группой предприятий «Грин Стар» (г. Москва) был разработан современный универсальный гамма-спектрометр СЕГ-ЭКО-10 [13]. Он создан для выполнения оперативных измерений радиоактивного загрязнения мор-



**Рис. 4.** Энергетический спектр гамма-излучения под водой в районе затопления АПЛ «Комсомолец» (около корпуса АПЛ рядом с трубой вентиляции реакторного отсека)

**Fig. 4.** Power spectrum of underwater gamma-radiation at the sinkage site of Komsomolets submarine (near the hull, near vent duct of reactor compartment)



**Рис. 5.** Энергетический спектр гамма-излучения в морской воде (измерения выполнены в заливе Цивольки в 2013 г. на глубине 30 м при глубине дна 60 м, время измерения – 3 ч)

**Fig. 5.** Power spectrum of underwater gamma-radiation in sea water (measurements taken at Tsvolki Bay in 2013, at the depth of 30 m in 60-m deep water area, measurement time 3 hours)

ской среды, воды других естественных акваторий, а также воды в различных резервуарах и бассейнах. Спектрометр включен в Государственный реестр средств измерения Российской Федерации.

В качестве детектора в спектрометре используется сцинтилляционный кристалл ортогерманата висмута ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ , сокращенное наименование – ВГО). Спектрометр способен работать в двух режимах: автономном (при питании забортной части от собственных аккумуляторов и накоплении информации в оперативной памяти) и on-line (при питании по кабелю от внешнего источника и постоянной передаче информации с датчика на бортовой компьютер). СЕГ-ЭКО-10 может быть использован для решения следующих основных задач:

- измерение объемной активности гамма-излучающих радионуклидов в воде, как в природной среде, так и в различного вида технологических емкостях: бассейнах, цистернах, трубопроводах;
- обнаружение и идентификация в подводных объектах гамма-излучающих радиоактивных веществ;
- радиационное и радиоэкологическое обследование затопленных потенциально опасных объектов.

Основные технические характеристики спектрометра:

- минимально измеряемое значение объемной активности гамма-излучающих радиоактивных

веществ, растворенных в морской воде, при времени экспозиции 30 мин. –  $500 \text{ Бк/м}^3$  (для  $^{137}\text{Cs}$ );

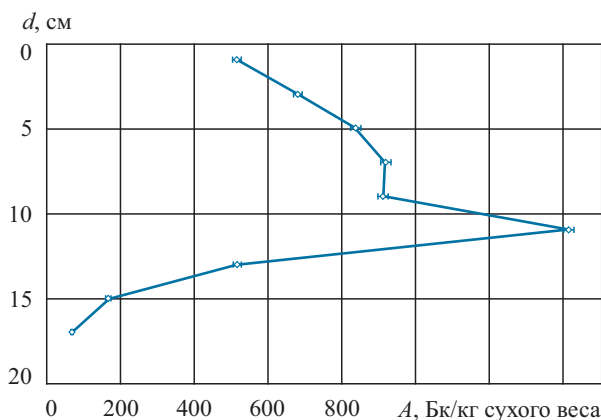
- минимально обнаружимая активность точечных гамма-излучающих источников в подводных объектах на расстоянии до 30 см –  $10^4 \text{ Бк}$  (без специальной экранирующей защиты для  $^{137}\text{Cs}$ );
- диапазон измерения эквивалентной мощности дозы гамма-излучения под водой –  $1 \text{ нЗв/час}$  –  $10 \text{ мкЗв/час}$ ;
- диапазон измерения объемной активности радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в морской воде (при солёности 35 ‰) –  $5 \cdot 10^2$ – $3 \cdot 10^7 \text{ Бк/м}^3$  при времени измерения 1000 сек.;
- рабочая глубина для забортной части устройства – до 2000 м;
- требуемое количество свободных жил в кабеле подводного телеуправляемого аппарата при работе в режиме on-line – 4 (плюс общая шина корпуса аппарата);
- рабочая температура для забортной части спектрометра – от  $-2$  до  $+30 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- масса забортной части спектрометра – 8 кг (для глубин 2000 м);
- габаритные размеры забортной части спектрометра:
  - наружный диаметр – 113 мм в титановой капсуле;
  - длина не более 468 мм.

Пример энергетического спектра гамма-излучения, полученного с помощью спектрометра СЕГ-ЭКО-10, представлен на рис. 5. На рисунке видно, что помимо излучения естественного радионуклида калий-40 в спектре присутствуют гамма-излучения еще трех энергий. Анализ данного факта свидетельствует о наличии загрязнения материала детектора изотопом висмут-207 (две линии и их каскадная сумма), что необходимо учитывать при анализе результатов долговременных измерений.

Следует подчеркнуть, что оценка состояния экосистемы не может считаться полной без получения информации о радиоактивном загрязнении донных осадков в районах, где происходили инциденты с радиационными объектами морской техники или производилось их затопление. В этом случае задача решается путем измерения радиоактивности проб грунта.

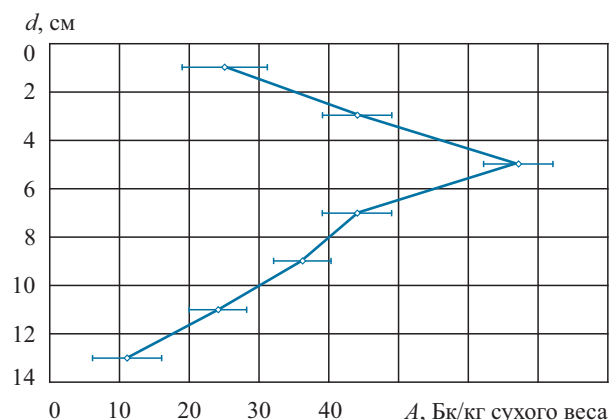
Особое значение имеет радиоактивное загрязнение бухт и заливов Новой Земли, в которые в 1965–1988 гг. сбрасывались элементы конструкций судовых ядерных реакторов и контейнеры с твердыми радиоактивными отходами. Наиболь-





**Рис. 6.** Распределение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  по глубине донных осадков в бухте Абросимова, 2006 г. (станция 81-4/10)

**Fig. 6.** Distribution of  $^{137}\text{Cs}$  specific activity by the depth of bottom sediments in Abrosimov Bay. Year 2006 (Station 81-4/10)



**Рис. 7.** Распределение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  по глубине донных осадков в заливе Степового, 2006 г. (станция 81-7/3)

**Fig. 7.** Distribution of  $^{137}\text{Cs}$  specific activity by the depth of bottom sediments in Stepovoy Bay. Year 2006 (Station 81-7/3)

шие объемы отходов были сброшены в заливах Цивольки, Абросимова, Степового и Течений. Последние данные о загрязнении этих акваторий получены при участии сотрудников КГНЦ в экспедициях МЧС в 2005–2006 гг. В экспедициях были отобраны пробы в ряде точек заливов Абросимова, Степового и Цивольки (с помощью грунтоотборной трубки, не нарушающей верхнего слоя донных осадков) и измерены профили распределения величины удельной активности радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  по глубине донных осадков. Измерения проб проводились на низкофоновом полупроводниковом детекторе на основе сверхчистого германия (типа GEM35 фирмы ORTEC, США). Результаты измерений приведены на рис. 6, 7.

## Метрологическое обеспечение погружной гамма-спектрометрии

Metrological support of underwater gamma-spectrometry

Для погружной гамма-спектрометрии наряду с созданием новой аппаратуры и программных средств обработки информации имеет большое значение метрологическая калибровка и поверка погружных средств измерения. Для решения этой задачи в КГНЦ создан специальный стенд – «ГРАД-М». Методическое и метрологическое сопровождение работ по калибровке и поверке погружной радиометрической и спектрометрической аппаратуры на

стенде «ГРАД-М» осуществляет ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

Для приготовления образцовых растворов в состав стенда входят два больших бака объемом по  $48\text{ м}^3$  и два малых бака объемом по  $3,5\text{ м}^3$ . Большие баки показаны на рис. 8.



**Рис. 8.** Стенд «ГРАД-М» для калибровки и поверки погружных радиометров и спектрометров

**Fig. 8.** GRAD-M test rig for calibration and verification of immersible radiometers and spectrometers

По результатам испытаний выдается протокол измерений с указанием чувствительности аттестуемой аппаратуры в заданном энергетическом диапазоне для определенного гамма-излучающего радионуклида, погрешность определения этой чувствительности и диапазон измерений объемной активности данного радиоактивного изотопа. На основании протокола измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» выдает либо сертификат калибровки, либо свидетельство о поверке аттестуемой аппаратуры.

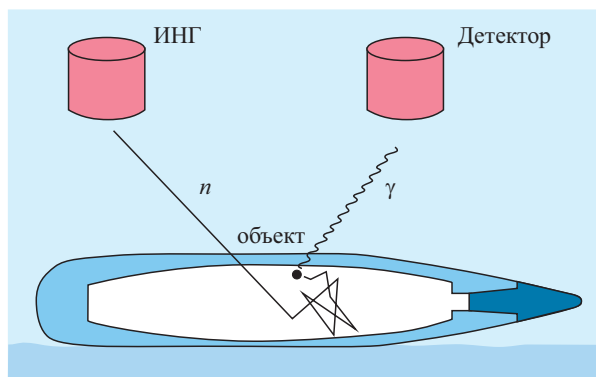


Рис. 9. Принцип работы подводного комплекса  
Fig. 9. Operation principle of underwater system

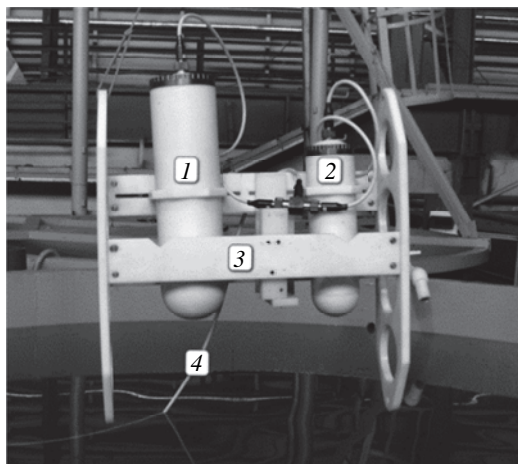


Рис. 10. Забортная часть комплекса «Лангуст»:  
1 – нейтронный генератор в капсуле;  
2 – блок детектирования в капсуле; 3 – рама;  
4 – подводный кабель

Fig. 10. Outboard part of *Langust* system:  
1 – neutron generator (in capsule); 2 – detection unit  
(in capsule); 3 – frame; 4 – underwater cable

## Разработка погружного комплекса для обнаружения взрывчатых, отравляющих и радиоактивных веществ

Development of immersible detection system for explosive, poisonous and radioactive substances

Большинство современных методов неразрушающего контроля подозрительных объектов на морском дне (электромагнитные, химические, акустические, органолептические, рентгенографические) не позволяют получить достоверную информацию об элементном (химическом) составе содержимого таких объектов. Практически единственным решением данной задачи является использование методов нейтронного анализа, основанных на исследовании вторичного гамма-излучения, возникающего при взаимодействии нейтронов с ядрами вещества [6, 8].

Высокая проникающая способность нейтронов, их способность вступать в ядерные реакции с веществом, сопровождающиеся испусканием гамма-излучения, позволяют получить информацию об элементной структуре обследуемых объектов. Для каждого элемента и каждого его изотопа существует специфический набор энергетических линий вторичного гамма-излучения, что обуславливает возможность обнаружения опасного вещества в подозрительном предмете за счет определения элементного состава облучаемого нейтронами предмета.

Обнаружение взрывчатых и отравляющих веществ подводным комплексом может быть проведено путем анализа характерного гамма-излучения, испускаемого ядрами азота и серы. Это обусловлено тем, что все промышленно производимые взрывчатки имеют высокое содержание азота (в основном от 15 до 40 % по массе), в то время как в других веществах концентрация азота гораздо ниже. Сера в большой концентрации содержится в ипритоподобных отравляющих веществах, которые массово подвергались захоронению под водой. Для обнаружения азота может использоваться ядерная реакция  $^{14}_7\text{N}(n, \gamma)^{15}_7\text{N}$ , сопровождающаяся выходом гамма-излучения с энергией  $E_\gamma = 10,83$  МэВ. Наличие серы выявляется по энергиям гамма-излучения  $E_\gamma = 5,42$  МэВ и  $E_\gamma = 3,22$  МэВ [5, 7].

Принцип работы подводного комплекса приведен на рис. 9.

В качестве источника нейтронов применяют радиоизотопные источники ( $^{252}\text{Cf}$ , Po-Be и пр.) или

управляемые нейтронные источники – нейтронные генераторы, где осуществляются ядерные реакции  ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} = {}^3_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$  (d-d-реакция) или  ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} = {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$  (d-t-реакция). Эти источники испускают быстрые нейтроны, имеющие энергию от 2,5 до 14 МэВ.

Для выбора оптимального детектора гамма-излучения был собран экспериментальный стенд из борированного и чистого полиэтилена, источника нейтронов, камеры для размещения образцов и полости для размещения сравниваемых детекторов.

В работе производилось сравнение гамма-спектрометров на основе кристаллов NaI(Tl), BGO, LaBr<sub>3</sub> и LYSO размерами  $\varnothing 76 \times 76$  мм. В качестве источника нейтронов применялся радионуклид калифорния  ${}^{252}\text{Cf}$  с выходом нейтронов  $2 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ . На основании проведенных исследований был сделан вывод, что для создания системы по поиску только взрывчатых веществ в морской среде целесообразно использовать детектор на основе кристалла BGO в титановой глубоководной капсуле.

Итогом работы стало создание комплекса для обнаружения взрывчатых, отравляющих и радиоактивных веществ в подводных потенциально-опасных объектах «Лангуст». Комплекс состоит из заборной и бортовой частей. Состав заборной части:

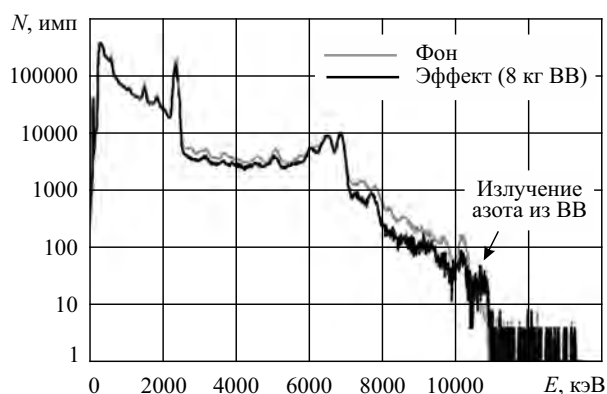
- блок нейтронного генератора в герметичной капсуле;
- блок гамма-спектрометра в герметичной капсуле;
- специализированная конструктивная рама для размещения двух герметичных капсул;
- подводный кабель.

Общий вид заборной части представлен на рис. 10.

«Лангуст» имеет следующие характеристики обнаружения:

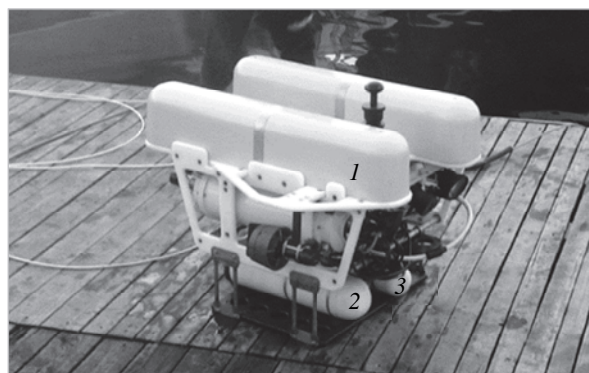
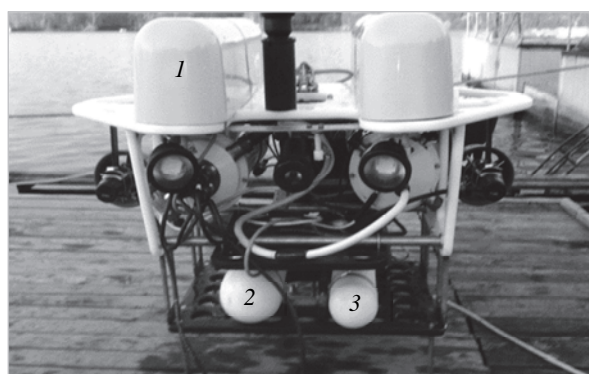
- взрывчатое азотосодержащее вещество (типа гексаген) – от 3 кг;
- отравляющее серосодержащее вещество (типа иприт) – от 5 кг;
- объемная активность гамма излучающих радионуклидов, растворенных в морской воде (для  ${}^{137}\text{Cs}$ ) – от 500 Бк/м<sup>3</sup>;
- время анализа – 10 мин.;
- дистанция до объекта контроля – до 10 см.

Пример энергетического спектра гамма-излучения, полученного в натуральных и лабораторных испытаниях комплекса «Лангуст» при обнаружении имитаторов взрывчатых и отравляющих веществ, приведен на рис. 11.



**Рис. 11.** Энергетический спектр захватного гамма-излучения фона и имитатора отравляющего вещества в воде

**Fig. 11.** Power spectrum of capture gamma-radiation and poisonous substance simulator in water



**Рис. 12.** Размещение комплекса «Лангуст» на подводном телеуправляемом аппарате:

1 – телеуправляемый аппарат; 2 – капсула с нейтронным генератором; 3 – капсула с блоком детектирования

**Fig. 12.** Arrangement of *Langust* system aboard a ROV:  
1 – ROV; 2 – capsule with neutron generator;  
3 – capsule with detection unit

Для обнаружения содержимого в подводных потенциально-опасных объектах можно применять комплекс в трех вариантах:

- с борта судна на грузонесущем многожильном кабеле при размещении комплекса на специальной раме;
- с подводных телеуправляемых аппаратов;
- с глубоководных обитаемых аппаратов.

Следует подчеркнуть, что при работе с борта судна необходимая точность наведения комплекса на подводный потенциально-опасный объект может быть достигнута только с помощью водолаза, а использование комплекса на подводных аппаратах позволяет позиционировать комплекс в необходимом положении для уверенной идентификации опасных материалов. Пример установки комплекса на подводный телеуправляемый аппарат представлен на рис. 12.

## Заключение

### Conclusion

Результаты выполненных сотрудниками КГНЦ работ по морскому радиационному мониторингу и разработка методов и средств проведения таких работ внесли заметный вклад в решение проблемы реабилитации морских акваторий. Накопленный за несколько десятилетий опыт работ с высокотехнологичным оборудованием и методиками может быть востребован при решении принципиально новых задач, связанных с освоением Арктики, и при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

## Библиографический список

1. Кызьюров В.С., Лайкин А.И., Носов Н.А., Платовских Ю.А., Рубанов С.М., Сергеев И.В. Радиэкологическая ситуация в районе гибели АПЛ «Комсомолец» / Океанологические исследования и подводно-технические работы на месте гибели АПЛ «Комсомолец». М.: Наука, 1996.
2. Baranov I., Kharitonov I., Laykin A., Olshanskiy Yu. Devices and methods used for radiation monitoring of sea water during salvage and transportation of the Kursk nuclear submarine to dock // «Nuclear Instruments and Methods in Physics Research». 10<sup>th</sup> Int. Symposium on radiation measurements and application. Ann Arbor, Michigan, USA, 21–23 May 2002. Vol. 505. P. 439–443.
3. Кучин Н.Л., Лайкин А.И., Платовских Ю.А. Опыт прогнозирования и контроля радиационной ситуации при проведении операций по подъему и транс-

- портировке атомной подводной лодки «Курск» // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2013. Вып. 77(361). С. 136–144.
4. Черняев А.М., Гапонов И.А., Казеннов А.Ю., Денкевич А.В. Радиационное обследование атомной подводной лодки «Курск» // Атомная энергия. 2002. Т. 93. Вып. 3. С. 236–240.
5. Гума В.И., Демидов А.М. Нейтронно-радиационный анализ. М.: Энергоатомиздат, 1984.
6. Власов Н.А. Нейтроны. М.: ГИТТЛ, 1955.
7. Хасаев Т.О., Боголюбов Е.П. Импульсные нейтронные генераторы на газонаполненных трубках // Сборник трудов семинара по ядерно-физическим методам обнаружения скрытых закладок взрывчатых веществ и делящихся материалов. Обнинск, Калужская область, апрель 1996.
8. Райлли Д., Энслин Н., Смит Х. мл., Крайнер С. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов. М.: БИНОМ, 2000.
9. Труды ИБРАЭ. Вопросы радиэкологии. 2009. Вып. 11.
10. Саркисов А.А., Сивинцев Ю.В., Высоцкий В.Л., Никитин В.С. Атомное наследие холодной войны на дне Арктики. М.: ИБРАЭ РАН, 2015.
11. Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Васильев А.П. и др. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию. Радиэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в Арктические и Дальневосточные моря. М.: ИзДАТ, 2005.
12. Кучин Н.Л., Лайкин А.И., Михеев Ю.В. Радиэкологический мониторинг при обследовании и подъеме затопленных потенциально опасных объектов в целях реабилитации морских акваторий // 10-я юбилейная Российская научная конференция. Москва – Обнинск, 2015. С. 135–151.
13. Кучин Н.Л., Михеев Ю.В., Казеннов А.Ю., Кикнадзе О.Е. Выбор оптимальных параметров сцинтилляционного погружного детектора и алгоритма обнаружения радионуклидов в морской среде // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. № 89(373). С. 105–112.

## References

1. Kizyurov V., Laikin A., Nosov N., Platovskih Yu., Rubanov S., Sergeev I. Radioecological situation at the Mike Datum / Ocean studies and underwater technical activities at the sinking site of Komsomolets submarine. Moscow, Nauka, 1996 (in Russian).
2. «Nuclear Instruments and Methods in Physics Research». 10<sup>th</sup> Int. Symposium on radiation measurements and application. Ann Arbor, Michigan, USA, 21–23 May 2002. Vol. 505. P. 439–443.



3. *Kuchin N., Laikin A., Platovskih Yu.* Predicting and monitoring radiation conditions during recovery and transportation of *Kursk* nuclear submarine // Transactions of the Krylov State Research Institute. 2013. Issue 77(361). P. 136–144 (in Russian).
  4. *Chernyaev A., Gaponov I., Kazennov A., Denskevich A.* Radiation survey of the nuclear-powered submarine *Kursk* // Atomic Energy. 2002. Vol. 93. Issue 3. P. 236–240 (in Russian).
  5. *Guma V., Demidov A.* Neutron & radiation analysis. Moscow, Energoatomizdat, 1984 (in Russian).
  6. *Vlasov N.* Neutrons. Moscow, State Publishing House of Technical and Theoretical Literature (GITTL), 1955 (in Russian).
  7. *Khasaev T., Bogolyubov Ye.* Pulse neutron generators based on gas-filled tubes // Compendium of papers, Seminar on nuclear physical detection methods of hidden explosives and fission materials. Obninsk, Kaluzhskaya Region, April 1996 (in Russian).
  8. *D. Reilly, N. Ensslin, H. Smith, Jr., S. Kreiner.* Passive non-destructive assay of nuclear materials (Russian translation). Moscow, BINOM, 2000.
  9. Transactions of IBRAE. Radioecological matters. 2009. Issue 11 (in Russian).
  10. *Sarkisov A., Sivintsev Yu., Vysotsky V., Nikitin V.* Nuclear vestiges of the Cold War on the Arctic bottom. Moscow, Nuclear Safety Institute (IBRAE), 2015 (in Russian).
  11. *Sivintsev Yu., Vakulovsky S., Vasilyev A. et al.* Man-made radionuclides in Russian seas. Radioecological outcomes of radioactive waste disposal in Arctic and Far Eastern seas. Moscow, Izdat, 2005 (in Russian).
  12. *Kuchin N., Laikin A., Mikheev Yu.* Radioecological monitoring in survey and recovery of potentially hazardous sunk objects for water area reclamation purposes // 10<sup>th</sup> Jubilee Russian scientific conference. Moscow-Obninsk, 2015. P. 135–151 (in Russian).
  13. *Kuchin N., Mikheev Yu., Kazennov A., Kiknadze O.* Selection of the optimum parameters for immersible scintillation detector and radionuclide detection algorithm for sea environment // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2015. No. 89(373). P. 105–112 (in Russian).
- центра ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 386-69-09. E-mail: skc@ksrc.com.
- Кызьюров Владимир Степанович*, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 587-85-36. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.
- Лайкин Андрей Игоревич*, начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (911) 256-73-48. E-mail: laykin@mail.com.
- Михеев Юрий Васильевич*, главный конструктор ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-48-64. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.
- Рубанов Станислав Михайлович*, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-49-35. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

#### About the authors

*Nikolay L. Kuchin*, Dr. Sci. (Phys.&Math.), Head of Integrated Department – Head of Industrial Crisis Response Centre, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 386-69-09. E-mail: skc@ksrc.com.

*Vladimir S. Kuzurov*, Cand. Sci. (Phys.&Math.), Lead Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 587-85-36. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

*Andrey I. Laikin*, Head of Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (911) 256-73-48. E-mail: laykin@mail.com.

*Yury V. Mikheev*, Chief Designer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-48-64. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

*Stanislav M. Rubanov*, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-49-35. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

#### Сведения об авторах

*Кучин Николай Леонидович*, д.ф.-м.н., начальник комплексного отдела – руководитель отраслевого кризисного