

УДК 502.057, 504.064.3****

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДВОДНЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОБЪЕКТОВ В ЗАЛИВЕ СТЕПОВОГО (НОВАЯ ЗЕМЛЯ)

© 2024 г. Н. А. Римский-Корсаков^{1,*}, Н. Я. Книвель^{2,**}, М. В. Флинт¹,
А. Ю. Казеннов², О. Е. Кикнадзе², И. М. Анисимов¹, А. А. Пронин¹,
А. В. Лесин¹, В. О. Муравья¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

* e-mail: nrk@ocean.ru

** e-mail: Knivel_NY@nrcki.ru

Поступила в редакцию 15.05.2024 г.

После доработки 17.06.2024 г.

Принята к публикации 08.08.2024 г.

Рассмотрены результаты исследований состояния атомной подводной лодки К-27, затопленной с реакторами с невыгруженным отработавшим ядерным топливом в заливе Степового на Новой Земле в 1981 году. Отмечена актуальность регулярного контроля состояния АПЛ. Приведены некоторые архивные сведения о захоронении АПЛ, и о последующих работах по наблюдению за ее состоянием, а также состоянием окружающей среды и других затопленных здесь радиационно опасных объектов. Рассмотрены технологии и результаты исследований, включающие гидролокационный поиск подводных объектов, визуальные наблюдения и спектрометрические измерения радиоактивности, в том числе с использованием телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов. Приведены результаты измерений радиоактивности, выполненные впервые непосредственно на прочном корпусе атомной подводной лодки в районе реакторного отсека.

Ключевые слова: Новая Земля, залив Степового, АПЛ К-27, радиоактивность, защитные барьеры, контроль, экология, подводный аппарат, гамма-спектрометр

DOI: 10.31857/S0030157424060123, **EDN:** FHNXWF

ВВЕДЕНИЕ

Согласно имеющимся архивным данным [10, 13, 15], в 1981 г. в заливе Степового на Новой Земле была затоплена АПЛ К-27 проекта 645 (зав. № 601). В состав ядерной энергетической установки (ЯЭУ) АПЛ К-27 входят два реактора с жидкометаллическим теплоносителем на основе эвтектики Рb–Вi. После аварии, произошедшей в 1968 году [2, 3], Министерством обороны восстановление К-27 было признано нецелесообразным. В течение 13 лет АПЛ находилась в резерве на базе в Гремиехе, после чего в 1981 году была затоплена в Карском море с невыгруженным отработавшим ядерным топливом (ОЯТ), суммарная активность которого на 2000 год составляла, согласно оценкам [15], 22.5 ТБк (831 кКи). АПЛ К-27 считается потенциально наиболее опасным ядерным объектом, затопленным в Карском море.

Помимо АПЛ К-27, по сведениям из источников архивных данных [10, 13, 15] за период с 1968 по 1975 гг. в заливе Степового были затоплены

1917 контейнеров и твердые радиоактивные отходы (ТРО) без упаковки. Согласно расчетным оценкам, суммарная активность затопленных ТРО на 2000 год составляет 28.1ТБк (760,6 Ки). Залив Степового считается хорошо исследованным. Так, гидролокационное обследование акватории, проведенное в 2004 году, позволило в основном определить местоположение затопленных здесь подводных потенциально опасных объектов (ППОО), содержащих ТРО и ОЯТ [5, 7]. Работы по уточнению мест затопления и состояния ППОО в заливе Степового продолжались вплоть до 2021 года, когда в экспедиции на НИС “Академик Мстислав Келдыш” (85 рейс) [12] специалистами Центра подводных исследований Русского географического общества (ЦПИ РГО) здесь была выполнена подробная гидролокационная съемка поверхности дна с использованием многолучевого высокоразрешающего эхолота (МЛЭ) SEABAT T50R фирмы RESON (Дания). На рисунке 1 представлена схема расположения техногенных

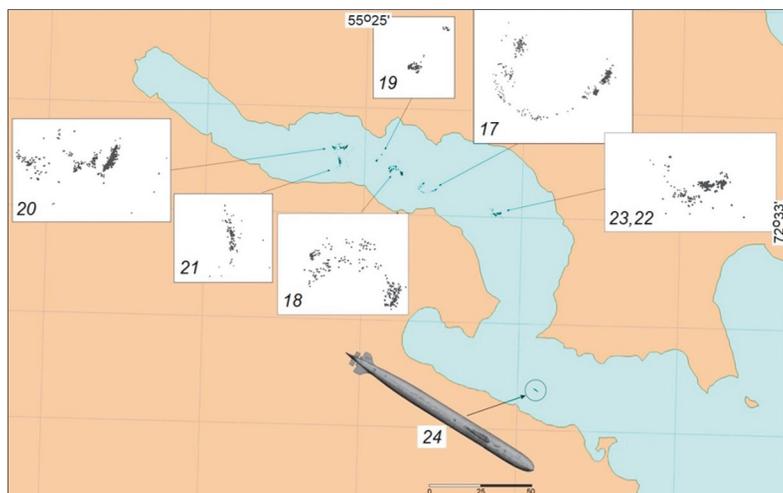


Рис. 1. Схема затопления радиоактивных отходов в заливе Степового (Новая Земля). На схеме обозначены объекты захоронения: 17–23 – свалки контейнеров с твердыми радиоактивными отходами; 24 – АПЛ К-27.

объектов в заливе Степового, исследованных в 2004–2023 годах. Нумерация объектов соответствует нумерации, использованной в перечне объектов, зарегистрированных в заливе в процессе гидролокационной съемки в 2004 году в экспедиции на НИС “Профессор Штокман” (65 рейс).

В ряду всех работ по обследованию АПЛ К-27 следует отдельно отметить проведенную в 2012 г. совместную российско-норвежскую экспедицию, организованную Минприроды России и Норвежским агентством по радиационной защите (NRPA) [17]. Данные, полученные в этой экспедиции норвежскими специалистами, подтвердили результаты российских экспедиций.

С 2013 г. в организации экспедиций в Карское море существенную роль начинают играть проекты РФФИ ИО РАН – в частности, экспедиционные работы 2015 года по обследованию К-27 были частично профинансированы за счет проекта РФФИ 14-05-05001 [16]. При этом, помимо собственно работ по исследованию радиационного фона в этих экспедициях значительное внимание уделялось исследованию окружающей морской среды – проводятся работы по изучению геологии, гидрофизики и биологии в районах захоронений радиоактивных отходов (РАО). В таблице 1 в хронологическом порядке приведены все основные экспедиции, в которых проводились работы по исследованию состояния АПЛ К-27 и окружающей ее среды.

ТЕХНОЛОГИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для точного определения местоположения затопленной АПЛ, а также оценки общего состояния ее корпуса неоднократно проводились гидролокационные съемки с помощью буксируе-

мых гидролокаторов бокового обзора (ГБО). Первое гидролокационное изображение АПЛ было получено в 2004 г. с помощью ГБО “SSS-3000” (США). В последующих экспедициях такие измерения были повторены с использованием различных ГБО, в том числе “Мезоскан-Т” (ИО РАН), “Микросаунд” (ИОРАН) и YellowFin (Канада). ГБО использовались как с борта НИС, так и с судового катера [14]. В 2013 году гидролокационная съемка АПЛ (рис. 2) была выполнена с помощью бортовой аппаратуры автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) “Пилигрим” разработки ИПМТ РАН [4]. В 2021 году Центром подводных исследований Русского географического общества (ЦПИ РГО) были получены детальные гидролокационные изображения, батиметрические данные и 3-D модели АПЛ К-19, групп контейнеров с ТРО и крупных элементов ядерных энергетических установок в заливе Степового и Абросимова. Полученные модели (рис. 3),

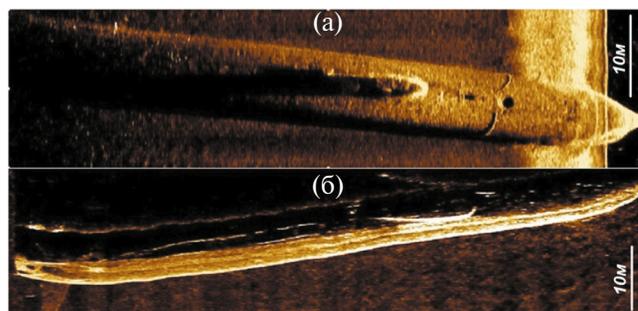


Рис. 2. Гидролокационные изображения, полученные с помощью высокочастотного ГБО АНПА “Пилигрим” в 2013 году в экспедиции на НИС “Профессор Штокман” (126 рейс): а – при проходе по маршруту перпендикулярному оси АПЛ на расстоянии 18 метров от дна; б – при проходе по маршруту параллельному оси АПЛ на расстоянии 18 м от дна.

Таблица 1. Основные экспедиции по обследованию АПЛ К-27*

Год	Судно**	Основные участники
1993 г.	ВБ	Росгидромет, Норвежское Агенство по радиационной защите (NRPA)
1993 г.	ВК	ВМФ, Радиевый институт им. В.Г. Хлопина, ИАЭ им. И.В. Курчатова
1994 г.	ВБ	Росгидромет, Норвежское Агенство по радиационной защите (NRPA)
2002 г.	АБП	МЧС России, ГЕОХИ РАН, МГТУ, РНЦ “Курчатовский ин-т”, ВСЕГЕИ, ИГЕМ РАН
2003 г.	АБП	МЧС России, ГЕОХИ РАН, МГТУ, РНЦ “Курчатовский ин-т»
2004 г.	ПШ	МЧС России, ИО РАН, МГТУ, ГЕОХИ РАН, РНЦ “Курчатовский ин-т”, МГУ
2005 г.	ПШ	МЧС России, ИО РАН, ГЕОХИ РАН, РНЦ “Курчатовски ин-т”, МГУ, ВСЕГЕИ
2006 г.	ПШ	МЧС России, ИО РАН, РНЦ “Курчатовский ин-т”, ГОСАКВАСПАС
2012 г.	Н	МЧС России, ВНИИОкеангеология, ГОСАКВАСПАС, НИЦ “Курчатовский ин-т”, ГЕОХИ РАН, СИТЕКРИМ.
2012 г.	ИП	Минприроды, Росгидромет, МАГАТЭ, НПО Тайфун, НИЦ “Курчатовский ин-т”, Крыловский ГНЦ, ЮЖМОРГЕО, NRPA (Норвегия), НИЕН (Норвегия), ИМИ (Норвегия), ИЭТ (Норвегия).
2013 г.	ПШ	МЧС России; ИО РАН, ГОСАКВАСПАС, ИПМТ РАН, НИЦ “Курчатовский ин-т”, СИТЕКРИМ, Крыловский ГНЦ, Радиевый институт им. В.Г. Хлопина.
2015 г.	АМК	ИО РАН, НИЦ “Курчатовский ин-т»
2016 г.	АМК	ИО РАН, МЧС России, НИЦ “Курчатовский ин-т”, ИГЕМ РАН, ГЕОХИ РАН
2019 г.	АМК	ИО РАН, ГЕОХИ РАН, ИГЕМ РАН
2020 г.	АМК	ИО РАН, НИЦ “Курчатовский ин-т”, МЧС России
2021 г.	АМК	НИЦ “Курчатовский ин-т”, ИО РАН, МЧС России, ЦПИ РГО, ИПМТ РАН
2023 г.	АМК	НИЦ “Курчатовский ин-т”, ИО РАН, МЧС России, ЦПИ РГО

* отдельные сведения об экспедициях заимствованы из источника [15]

** сокращенные названия судов:

АМК – НИС “Академик Мстислав Келдыш” (ИО РАН);
 ПШ – НИС “Профессор Штокман” (ИО РАН);
 АБП – НИС “Академик Борис Петров” (ГЕОХИ РАН);
 ВБ – НИС “Виктор Буйницкий” (Росгидромет);
 ВК – НИС “В. Каврайский” (ГС СФ);
 Н – МСБ “Неотразимый” (ФГУ ГОСАКВАСПАС);
 ИП – НИС “Иван Петров” (Северное УГМС Росгидромета).

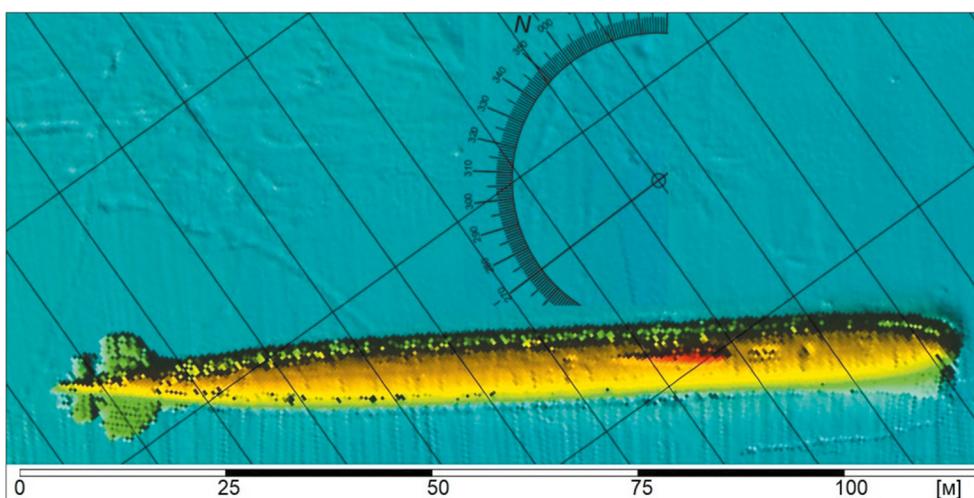


Рис. 3. Детальное батиметрическое изображение объекта 24 (АПЛ К-27) в заливе Степового, полученное специалистами ЦПИ РГО с помощью многолучевого эхолота (МЛЭ) SEABAT T50R фирмы RESON (Дания) в сентябре 2021 года в экспедиции на НИС “Академик Мстислав Келдыш” (85 рейс). На рисунке обозначено: сетка географических координат с шагом 1' по широте и долготе; глубина места составляет около 32 метров, глубина в верхней части рубки 21 м, глубина в районе палубы 24 м. Ориентация корпуса (корма-нос) – СЗ-ЮВ.

позволяют вести точный отбор проб, а также элементарные исследования объектов РАО и их надежную идентификацию с помощью видеоборудования ТНПА и БНПА.

Первый визуальный осмотр АПЛ К-27 был проведен в 1993 г. в совместной российско-норвежской экспедиции. Для этой цели использовали телеуправляемый подводный аппарат (ТНПА) “Buster” (Великобритания) [18]. Начиная с 2004 г. для визуального осмотра подводных объектов стали использоваться ТНПА малого и сверхмалого классов, а именно: “SeaLion” (США) – в 2005 году, “ГНОМ” (ИОРАН) [6] – с 2006 по 2023 год, “Falcon” (SeaEye) – с 2012 по 2023 год, “РТМ-500” (Южморгео) – в 2012 году, “Мираж” (Россия) – с 2015 по 2023 год. На рисунке 4 представлены стоп-кадры видеосъемки, выполненной с использованием видеосистемы ТНПА “ГНОМСупер”. По результатам проведенных визуальных наблюдений АПЛ К-27 можно сделать следующие выводы: АПЛ лежит на ровном киле (заглубление в грунт около 1 м); в носовой части отмечены небольшие отвалы грунта; видимых коррозионных повреждений наружных корпусных конструкций не обнаружено; леерные ограждения на палубе почти полностью разрушены; отсутствуют несколько листов наружного корпуса на палубе АПЛ; палуба покрыта слоем иловых отложений и донных организмов толщиной 3–5 см; в носовой и кормовой частях АПЛ отмечены остатки продувочных шлангов и буксировочных тросов; в носовой части обнаружена спускающаяся с АПЛ на грунт цепь с якорем; гребные винты отсутствуют.

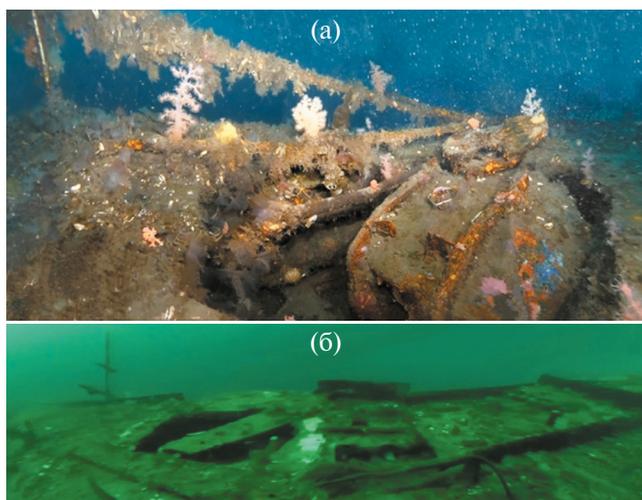


Рис. 4. Стоп-кадры видеосъемки, выполненной с помощью ТНПА “ГНОМСупер” при обследовании АПЛ К-27 в 2019 году в экспедиции на НИС “Академик Мстислав Келдыш” (76 рейс): а – палуба лодки в районе реакторного отсека (справа аварийный люк реакторного отсека); б – палуба в центральной части АПЛ (слева остатки леерного ограждения).

Одной из главных целей обследования АПЛ К-27 является выявление выхода радионуклидов из реакторов лодки, что может свидетельствовать о нарушении целостности защитных барьеров. Обычно исследование подводных радиационно-опасных объектов включает отбор проб придонной воды и донного грунта вблизи объекта, а также отбор образцов материала самого объекта. Однако обнаружить точное место выхода радионуклидов из объекта методами отбора проб практически невозможно. При этом измерения радиоактивности проб занимает существенное время. Здесь следует отметить, что практически для всех затопленных радиационно-опасных объектов основным индикатором утечки радиоактивности, а, следовательно, и разрушения защитных барьеров, является обнаружение в воде долгоживущих гамма-излучающих радионуклидов: продукта деления ядерного топлива ^{137}Cs и продукта нейтронной активации реакторных конструкций ^{60}Co . При этом для надежного обнаружения этих радионуклидов в морской среде необходим именно спектрометрический метод, так как в состав морской воды и донных отложений входят природные источники гамма излучения: ^{40}K и дочерние продукты распада радиоактивных семейств U и Th. Из-за излучения этих природных радионуклидов мощность дозы в море при приближении дозиметра к донному грунту может естественным образом увеличиться более чем в 10 раз. В этой связи для экспедиционных исследований состояния элементов радиоактивных отходов (РАО), а также ядерно- и радиационно опасных объектов (ЯРОО), захороненных в морской среде, в том числе АПЛ-27, стал использоваться качественно новый способ контроля радиационной обстановки в акваториях, который предполагает измерение уровней излучения в непосредственной близости от конкретных объектов с помощью подводной гамма-спектрометрической аппаратуры типа РЭМ, разработанной в НИЦ “Курчатовский институт”. В качестве носителя гамма-спектрометра было решено использовать ТНПА ГНОМ, созданный ООО «Индел-Партнер» в сотрудничестве с ИО РАН [9]. На фотографии на рисунке 5 представлен ТНПА ГНОМ с гамма-спектрометром РЭМ-35-2.

В разное время в Арктических экспедициях ИО РАН, в том числе для контроля состояния подводных потенциально опасных объектов с использованием гамма-спектрометров, применялись также ТНПА обзорного класса “Мираж” и «Фалькон». С 2021 года использовался также ТНПА “РБ-300”, изготавливаемый



Рис. 5. ТНПА “ГНОМСупер” с гамма-спектрометром РЭМ-35-2: 1 – дополнительные блоки плавучести; 2 – правый верхний светильник; 3 – передняя основная видеокамера; 4 – кабель-трос; 5 – гамма-спектрометр; 6 – блок маршевых двигателей левого борта.

компанией “Ровбилдр” (Россия). Основной применяемый высококачественный подводный спектрометр РЭМ-35–2 представляет собой блок детектирования БДЭГ-75(75) Б на основе монокристалла ВГО 75×75 мм с низкофоновым ФЭУ типа R6233-01 [11]. Рабочая глубина спектрометра 200 м. Чувствительность кристалла ВГО позволяет проводить измерения концентраций гамма-излучающих техногенных радионуклидов в морской воде на уровне в десятки раз ниже предельно допустимых для питьевой воды, а в донном грунте – на уровне фоновых значений, вызванных глобальными выпадениями. Спектрометр предназначен для работы как в автономном режиме, так и в режиме реального времени, с использованием интерфейса RS-485. Небольшие размеры гамма-спектрометра позволяют опускать его в воду с борта катера вручную для исследования радиоактивности окружающей среды. В процессе исследований с помощью РЭМ-35-2 регистрируемые спектры в режиме реального времени отображаются на дисплее ПЭВМ, что позволяет корректировать перемещение ТНПА в зависимости от наличия и интенсив-

ности техногенных гамма-излучателей в морской среде. В процессе работы оператор ТНПА может наблюдать окрестности измерений и визуально идентифицировать объекты или их элементы, являющиеся источником радиоактивного излучения. Измерение начинается при подходе ТНПА к исследуемому объекту. Экспозиция единичного измерения выбирается равной 60–90 с, что обеспечивает предел обнаружения радионуклида ^{137}Cs в поверхностном слое донных отложений на уровне 15 Бк/кг мокрого грунта и 0,35 Бк/л – в морской воде. Пример представления первичной информации, получаемой с помощью комплекса “ГНОМ-РЭМ” приведен на рисунке 6.

Последние по времени исследования захоронений ТРО и радиационные измерения в заливе Степового были выполнены в 2023 году в экспедиции на НИС “Академик Мстислав Келдыш” (92 рейс). Основным интерес представляют результаты измерений, выполненные на наружном и прочном корпусе (НК и ПК) АПЛ-К27 в районе палубы реакторного отсека. Радиационное обследование лодки К-27 проводилось с помощью подводных гамма-спектрометров РЭМ-4-50, разработанных в НИЦ “Курчатовский институт”. В качестве носителя измерительной аппаратуры использовался ТНПА “Фалькон”, на котором был размещен один из спектрометров, позволяющий в режиме реального времени отслеживать радиационную обстановку вблизи ТНПА (рис. 7). Такой метод измерений дал возможность оперативно получить пространственное распределение мощности дозы гамма-излучения на корпусе АПЛ. Регистрация гамма-спектров была произведена в 15 точках, расположенных в верхней части наружного корпуса АПЛ К-27, на палубе реакторного отсека (рис. 8). Экспозиция каждого измерения была задана равной 180 с. Два характерных спектра, полученных в ходе этого обследования, представлены выше на рисунке 6. Спектры, представленные на рис. 6, сформированы

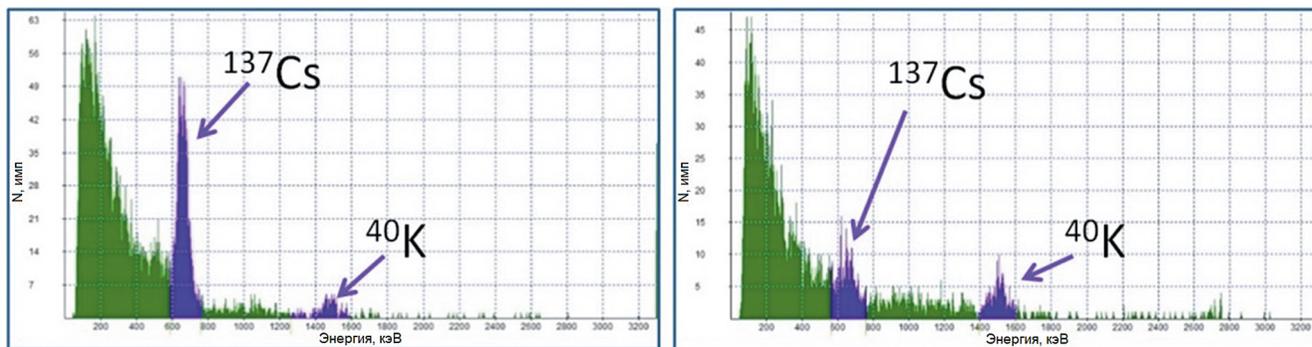


Рис. 6. Спектры, зарегистрированные на палубе АПЛ К-27 в т. 12 (слева) и 15 (справа). Нумерация точек и их расположение соответствует схеме, представленной на рисунке 8.



Рис. 7. ТНПА «Фалькон»: пунктирной линией обведен гамма-спектрометр РЭМ-4-50.

двумя радионуклидами – естественным радионуклидом ^{40}K и техногенным радионуклидом ^{137}Cs . Они характеризуются малой счетностью и имеют небольшую рассеянную часть, что дает основание утверждать, что радиационное загрязнение палубы АПЛ носит исключительно поверхностный характер. Пространственное распределение мощности дозы в верхней части легкого корпуса АПЛ и расположение точек, в которых проводились измерения, показаны на рисунке 8.

В случае частичного разрушения защитных барьеров, препятствующих выходу радиоактивности из реакторов АПЛ К-27 в окружающую морскую среду, возможно поступление радиоактивных материалов первоначально во внутренний объем реакторного отсека. Это дает теоретическую возможность провести удаленную диагностику состояния защитных барьеров, т. к. измерения на

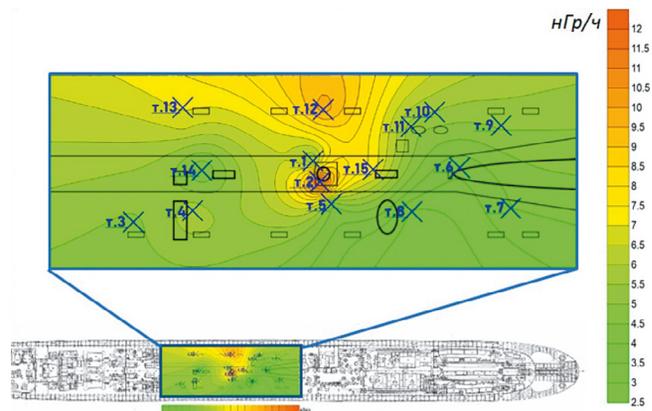


Рис. 8. Картограмма пространственного распределения мощности дозы в верхней части наружного корпуса АПЛ и расположение точек, в которых проводились измерения с помощью гамма-спектрометра РЭМ-4-50, установленного на ТНПА «Фалькон».

прочном корпусе АПЛ, в принципе, позволяют зафиксировать наличие заглубленного объемного источника гамма-излучения, при условии, что удастся набрать достаточное количество статистически достоверных данных, обеспечивающих представительность выполненного измерения.

Для решения этой задачи с помощью манипулятора ТНПА «Фалькон» спектрометр РЭМ-4-50 был установлен на ПК АПЛ, в зазор между горловиной люка реакторного отсека и конструкциями НК для проведения спектрометрических измерений в автономном режиме с длительной экспозицией. Подобное исследование проводилось впервые и стало возможным только после демонтажа крышки люка реакторного отсека, выполненного в 2021 году. Особенности размещения спектрометра на ПК показаны на рисунке 9. В ходе



Рис. 9. Стоп-кадр видеосъемки аварийного люка РО АПЛ К-27, проведенной с помощью ТНПА «Фалькон» в 2023 году в экспедиции на НИС АМК (92 рейс): а – люк АПЛ: 1 – петли срезанной крышки люка ПКБ, 2 – технологическая пластина, приваренная к комингсу люка ПК, 3 – пространство между НК и ПК, 4 – палуба АПЛ, 5 – кромка выреза в НК; б – установка гамма-спектрометра: 1 – технологическая пластина, приваренная к комингсу люка ПК; 2 – подводный гамма-спектрометр РЭМ-4-50; 3 – технологическая штанга для подвески гамма-спектрометра; 4 – «кисть» манипулятора ТНПА «Фалькон»; 5 – пространство между НК и ПК.

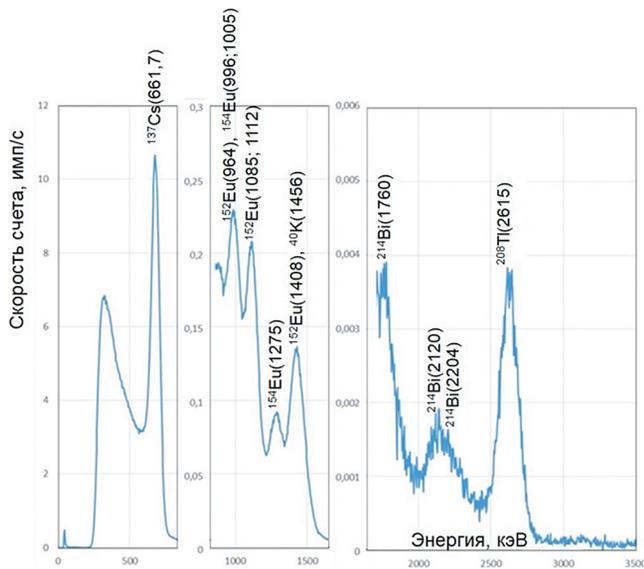


Рис. 10. Суммарный спектр, зарегистрированный на прочном корпусе АПЛ К-27 в люке реакторного отсека (экспозиция 21 ч 10 мин).

измерений на прочном корпусе было зарегистрировано 254 спектра с единичной экспозицией 300 с, что соответствует суммарной экспозиции измерений 21 час 10 минут (рис. 10).

Анализ зарегистрированных спектров показал, что основным дозообразующим нуклидом, как и ожидалось, является ^{137}Cs , продукт деления ядерного топлива, однако заметное влияние на формирование спектра оказало присутствие продуктов активации конструкционных материалов реактора — ^{152}Eu и ^{154}Eu . В области более 1.5 МэВ основной вклад в спектр вносит излучение естественных радионуклидов — продуктов распада рядов ^{238}U (^{214}Bi) и ^{232}Th (^{208}Tl).

В указанной выше точке измерения на прочном корпусе (рис. 9) была зафиксирована мощность дозы, равная 0.23 мкГр/ч, что примерно

в 100 раз превышает результаты измерения мощности дозы в морской воде и на порядок больше значений мощности дозы, зарегистрированных над РО на наружном корпусе. Следует отметить, что выявленное загрязнение связано не с выходом активности из АПЛ после ее затопления в заливе Степового, а скорее всего с последствиями произошедшей в 1968 г. радиационной аварии [2, 3]. В частности это подтверждают результаты измерения уровней гамма активности воды в районе рубки и донных отложений в месте затопления АПЛ, где концентрация ^{137}Cs не превышает пределов обнаружения спектрометра.

Пробы донного грунта вблизи АПЛ отбирались с использованием дночерпателя Ван-Вина с площадью захвата 0.1 м^2 и трубчатого гравитационного отборника грунта “трубка Неймисто” с диаметром вкладыша 4.5 см (рис. 11а). В лабораторных условиях на борту судна было произведено послойное разделение кернов по 2 см (рис. 11б) и их высушивание для гамма-спектрометрических измерений. Измерения проводились с использованием спектрометрического комплекса СКС-07П-Г5 “Кондор” (рис. 11в) на основе полупроводникового детектора с последующим анализом спектров с целью обнаружения и количественного определения в них признаков техногенных радионуклидов. На рисунке 12 приведены усредненные по всем точкам отбора проб грунта в экспедиции 2021 года профили удельной активности ^{137}Cs в грунте в зависимости от глубины керна для внутренней (7 кернов) и внешней (там где затоплена АПЛ К-27, 9 кернов), частей залива Степового. Как видно, общий уровень загрязнения донных отложений внешней части залива Степового приблизительно в три раза ниже, чем для внутренней. При этом для обеих частей залива в слое грунта 3–7 см отмечается



Рис. 11. Отбор и измерение радиоактивности проб донного грунта: а) трубчатый гравитационный отборник “трубка Неймисто»; б) срез керна в процессе послойного разделения; в) спектрометрический комплекс СКС-07П-Г5 “Кондор” на основе полупроводникового детектора (справа).

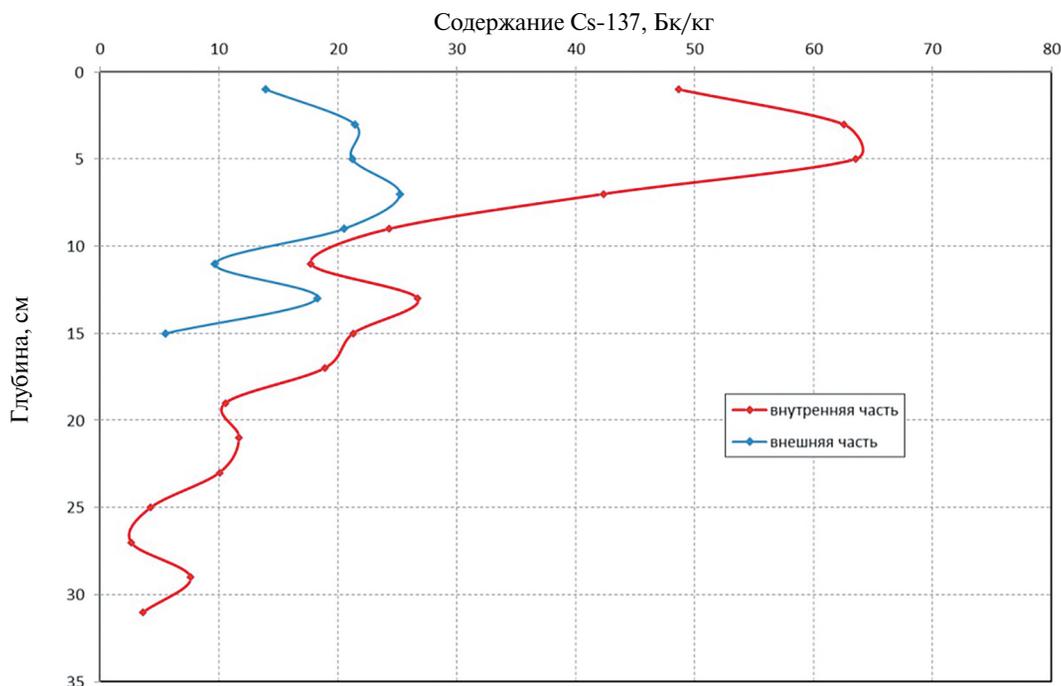


Рис. 12. Усредненные профили удельной активности ¹³⁷Cs в грунте в зависимости от глубины керна донного грунта для внутренней (красная линия) и внешней (голубая линия) частей залива Степового.

максимальный уровень загрязнения донных отложений ¹³⁷Cs, что с учетом скорости осадконакопления в заливе Степового, примерно соответствует времени затопления в заливе контейнеров с ТРО (с 1968 по 1975 год) [1, 15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования состояния АПЛ К-27 и окружающей среды в районе ее затопления в заливе Степового, выполненные в 2023 году и в предыдущие годы с использованием прямых методов и гамма-спектрометрических измерений показали, что:

1. Зарегистрированные значения мощности эквивалентной дозы (МЭД) на расстоянии 1–2 м от наружного корпуса АПЛ малы и составляют не более 8.3 нЗв/ч, что значительно меньше средних значений радиационного фона на поверхности суши.

2. Присутствие ¹³⁷Cs на палубе реакторного отсека в 2023 году было обнаружено в 6 точках (точки 1, 2, 5, 12, 13, 15 на рис. 8) из 15, в которых были проведены спектрометрические наблюдения. При этом максимальное значение МЭД на этом участке НК составляет 0.09 мкЗв/час, что примерно в 1.5 раза меньше средних значений радиационного фона на поверхности суши, составляющих около 0.12 мкЗв/час или 12 мкр/час [8]. Полученные данные о распределении значений

МЭД крайне важны для разработки обоснования безопасности в обеспечении проекта дальнейшего обращения с АПЛ К-27.

3. Во время прошлых исследований измерить параметры радиоактивности на поверхности прочного корпуса АПЛ К-27 не удалось. Измеренные в 2023 году параметры отличаются от измеренных на наружном корпусе более высокой активностью и более разнообразным составом радионуклидов. В практическом плане из этого следует, что при разработке проекта возможного подъема и дальнейшего обращения с АПЛ К-27 необходимо учитывать то обстоятельство, что после удаления воды из межкорпусного пространства именно запас активности, сосредоточенный в районе реакторного отсека, будет определять радиационную обстановку на всех этапах выполнения работ по утилизации АПЛ.

4. Выход техногенных радионуклидов из АПЛ К-27 в окружающую морскую среду не обнаружен. Зарегистрированные в 2021–2023 годах уровни содержания ¹³⁷Cs в донном грунте не отличаются от результатов, полученных в предыдущих экспедициях, в частности, в совместной российско-норвежской экспедиции в 2012 году [17]. При этом наиболее вероятным источником зарегистрированного ¹³⁷Cs является не АПЛ К-27, а контейнеры с ТРО, затопленные в большом количестве во внутренней части залива Степового в период с 1968 по 1975 год, выход

радионуклидов из которых в окружающую среду зарегистрирован многочисленными экспедициями [5, 7, 13, 15, 17].

5. Анализ результатов многолетних исследований подтверждает эффективность разработанной технологии комплексных исследований ЯРОО и РАО, которая позволила собрать достоверные экспериментальные данные о радиационной обстановке в непосредственной близости от АПЛ К-27.

6. Результаты исследований подтверждают необходимость разработки и размещения в заливе Степового (Новая Земля) комплекса специальных средств радиационного мониторинга этого района Карского моря, в том числе системы постоянного контроля состояния реакторов АПЛ К-27.

Финансирование работы. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института океанологии им.П.П.Ширшова РАН по теме государственного задания № FMWE-2024-0024. Экспериментальные исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда из средств проекта № 23-17-00156.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алиев Р.А.* Осадконакопление в заливах Карского моря // Подводные технологии и мир океана. 2006. № 4. С. 12–19.
2. *Антонов А.М.* Атомная подводная лодка пр. 645 // Подводные лодки: история развития. Сборник статей. Екатеринбург, 2003. [Электронный ресурс.] Режим доступа: <http://book.uraic.ru/elib/pl/lodki/645.htm>, дата последнего обращения 3.07.2024 г.
3. *Апальков Ю.В.* Подводные лодки советского флота 1945–1991 гг. Том I: Первое поколение АПЛ. М.: Моркнига, 2009. 194 с.
4. *Боровик А.И.* Технология использования АНПА для исследования подводных потенциально опасных объектов в Карском море // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 1 (39). С. 32–39.
5. *Вяльшев А.И., Добров В.М., Долгов А.А. и др.* Экологический мониторинг окраинных морей России. М.: ФГБНУ “Аналитический центр” Минобрнауки России, 2019. 240 с.
6. *Елкин А.В., Комаров В.С., Розман Б.Я.* Телеуправляемые подводные аппараты-роботы “ГНОМ” // Освоение морских глубин. М.: Оружие и технологии, 2018. С. 332–336.
7. *Казеннов А.Ю., Нерсесов Б.А., Римский-Корсаков Н.А.* Исследование подводных потенциально опасных объектов в Карском море. М.: ФГБНУ “Аналитический центр” Минобрнауки России, 2017. 274 с.
8. *Майкович В.П., Панченко А.М.* Основы радиационной безопасности: учебное пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат. 1990. 176 с.
9. *Поляков С.Г., Римский-Корсаков Н.А., Флинт М.В.* Технические аспекты исследований окружающей среды западной части Карского моря // Океанологические исследования. 2017. Т. 45. № 1. С. 171–186.
10. *Реестр* подводных потенциально опасных объектов во внутренних водах и территориальном море Российской Федерации // Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2019, 115 с.
11. *Римский-Корсаков Н.А., Казеннов А.Ю., Розман Б.Я.* Технология мониторинга экологии заливов восточного побережья Новой Земли // Материалы научной конференции “Экосистема Карского моря – новые данные экспедиционных исследований”, М.: АПР, 2015. С. 258–266.
12. *Римский-Корсаков Н.А., Книвель Н.Я., Казеннов А.Ю. и др.* Радиационно опасные объекты в Российской Арктике (85-й рейс научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” в Карское море) // Океанология. 2022., Т. 62. № 3. С. 495–498.
13. *Саркисов А.А., Сивинцев Ю.В., Высоцкий В.Л., Никитин В.С.* Атомное наследие холодной войны на дне Арктики; радиоэкологические и технико-экономические проблемы радиационной реабилитации морей. М.: Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2015. 699 с.
14. *Римский-Корсаков Н.А., Тронза С.Н., Анисимов И.М.* Развитие гидролокационных технологий глубоководных исследований рельефа дна и подводных объектов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 9. С. 85–90.
15. *Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Васильев А.П. и др.* Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию («Белая книга – 2000»). М.: ИздАТ, 2005. 624 с.
16. *Флинт М.В., Римский-Корсаков Н.А., Поляков С.Г.* Экосистемы российской Арктики –2015 (63-й рейс научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш”) // Океанология. 2016. Т. 56. № 3. С. 499–501.
17. *Gwynn J.P., Nikitin A., Shershakov V. et al.* Main results of the 2012 joint Norwegian-Russian expedition to the dumping sites of the nuclear submarine K-27 and solid radioactive waste in Stepovogo Fjord, Novaya Zemlya // J. Environ. Radioact. 2016 V. 151. Pt. 2. P. 417–426.
18. *Joint Russian-Norwegian Expert Group for Investigation of Radioactive Contamination in the Northern Areas.* Dumping of Radioactive Waste and Radioactive Contamination in the Kara Sea // Results from 3 years of investigations (1992–1994) performed by the Joint Russian-Norwegian Expert Group for Investigation of Radioactive Contamination in the Northern Areas. Norwegian Radiation Protection Authority, Østeraås, Norway. 1996 (First Edition). ISBN 82-993079-5-3.

INVESTIGATION OF UNDERWATER RADIOACTIVE OBJECTS IN STEPVOVOYE BAY (NOVAYA ZEMLYA)

N. A. Rimsky-Korsakov^{1,*}, N. Ya. Knivel^{2,**}, M. V. Flint¹, A. Yu. Kazenov²,
O. E. Kiknadze², I. M. Anisimov¹, A. A. Pronin¹, A. V. Lesin¹, V. O. Muraviya¹

¹*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,*

²*National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia*

* e-mail: nrk@ocean.ru

** e-mail: Knivel_NY@nrcki.ru

In 1965, the K-27 submarine with an emergency portside reactor with unloaded spent nuclear fuel (SNF) was flooded in Stepovoye Bay (Novaya Zemlya). The source of radioactivity is nuclear fuel in the port side reactor and fuel carried into the corresponding steam generator. Before flooding, the elements of the power plant were sealed with furfural, and the entire compartment was then filled with bitumen. It is believed that when water entering the reactor core, a self-sustaining fission chain reaction (SCR) may occur. However, this process is possible only if the above-mentioned protective barriers are violated. The state of the protective barriers can be judged by the magnitude and variations of the radioactive background on the deck and near the submarine on the ground. Thus, the most important task of monitoring and preventing an emergency situation on the K-27 submarine is the constant monitoring of the environment (ecology) in Stepovoy Bay in general and near the submerged submarine in particular. The article considers the results of research on the submarine and its environment, including the R/V Akademik Mstislav Keldysh (cruise 92, 2023) expedition, when the parameters of the radioactive background were for the first time measured directly on the submarine robust hull in the area of the reactor compartment.

Keywords: Novaya Zemlya, Stepovogo Bay, NS K-27, radioactivity, protective barriers, condition monitoring, ecology, underwater vehicle, gamma-ray spectrometer