

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПЕРЕНОСА РАДИОНУКЛИДОВ ПОСЛЕ ГИПОТЕТИЧЕСКОЙ АВАРИИ С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ

А. А. Саркисов, С. В. Антипов, В. П. Билашенко, В. Л. Высоцкий, Д. В. Дзама, М. Н. Кобринский, Д. А. Припачкин, Д. О. Смоленцев, П. А. Шведов
ФГБУН Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 31 мая 2021 г.

Приводятся результаты разработки и применения интегрированной системы математических моделей для прогнозирования распространения в акватории Арктики радиоактивных материалов от распределенного в пространстве и времени комплексного источника, сформированного аварийным выбросом радионуклидов из объекта с ядерной энергетической установкой. Данный подход позволяет учитывать различные механизмы переноса радиоактивных частиц от обычно рассматриваемых переноса в атмосфере с осаджением на подстилающую поверхность и переноса в воде открытого моря, узких длинных заливах, осаджения на дно, донного захвата, обратного вымывания до малоизученного вмерзания частиц из водной среды в морской лед, дрейфа вместе со льдом и вытаивания. В результате такого процесса в водной среде через длительное время после аварии может появиться источник активности, удаленный на большое расстояние от места выброса. При использовании разработанной интегрированной системы моделей получается наиболее близкая к реальной картина распространения радиоактивного следа, которая позволяет минимизировать последствия аварии, эффективнее ликвидировать возможные радиоактивные загрязнения в арктическом регионе. В статье описан этап длительной работы, которая продолжается в настоящее время.

Ключевые слова: аварии, аварийное реагирование, Арктика, атомная энергетика, Арктическая зона России, атомные станции малой мощности, атомный ледокол, безопасность, математическая модель, морской лед, плавучая атомная теплоэлектростанция.

Введение

Опережающее социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации, провозглашенное руководством нашей страны и определенное рядом государственных документов самого высокого уровня («Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике

на период до 2035 года», «Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года», государственная программа «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации» и др.), требует надежного и безопасного снабжения электроэнергией в экстремальных климатических условиях с возможностью гибко реагировать на изменяющиеся потребительские нагрузки, гарантированно и надолго обеспеченного топливом и т. д.

© Саркисов А. А., Антипов С. В., Билашенко В. П., Высоцкий В. Л., Дзама Д. В., Кобринский М. Н., Припачкин Д. А., Смоленцев Д. О., Шведов П. А., 2021

Созданная десятилетия назад и существующая по сегодняшний день система мазутно-дизельных электростанций и котельных окончательно изжила себя как в техническом плане, так и вследствие недопустимого воздействия на хрупкую экосистему Севера. Из всех альтернативных видов энергоснабжения более других перечисленным требованиям соответствует атомная энергетика, вернее, «малая» атомная энергетика (атомные станции малой мощности — АСММ) — наиболее технологичные, современные, перспективные разработки в этой области [1].

И хотя в настоящее время системно не определены и официально не утверждены ни географические точки размещения АСММ, ни их типы, ни общее количество, ни объекты-потребители, ни темпы ввода в эксплуатацию, неизбежность решения вопроса использования АСММ для частичного обеспечения объектов Арктической зоны электроэнергией ни у кого не вызывает сомнения [2].

Принципиальным условием использования любых новых технологий в Арктике, в том числе ядерных, является обеспечение безопасности человека и сохранности окружающей среды. А поскольку любой способ производства энергии, любые высокотехнологичные установки все же несут определенные риски возникновения аварийных ситуаций, которые нельзя полностью исключить, необходимо спрогнозировать их развитие, рассчитать последствия и заранее разработать меры противодействия [3]. Для этого требуется исследовать ряд параметров и процессов, влияющих на результирующую картину аварии и масштаб последствий: различные сценарии развития аварий, условия, состав и величины радиоактивных выбросов, направления и закономерности распространения радиоактивных частиц в воздухе и в воде, характер их оседания и степень загрязнения местности. Чем раньше станут известны границы зон, которых может достигнуть загрязнение, уровень, состав и другие свойства этого загрязнения, тем более своевременно и эффективно могут быть выработаны и предприняты меры для его ликвидации.

Важную роль в этих исследованиях играет математическое моделирование процессов переноса и распространения выброшенных радионуклидов. Для этого разработано и применяется множество математических моделей. Поскольку у каждой из них есть достоинства и недостатки, идет процесс постоянного совершенствования моделей, приближения модельных процессов к реальным физическим процессам. В данной статье описан один из этапов этой работы — разработка и тестирование интегрированной системы математических моделей переноса радионуклидов после гипотетической аварии на ядерном объекте с учетом формирования комплексного источника аварийного выброса, реализации четырех разных каналов переноса радионуклидов в воздухе, воде, вместе со льдом, с оседанием частиц на дно и обратным вымыванием.

Что касается двух других этапов (начального — оценки источника выброса и конечного — воздействия выброса на окружающую среду), то работы по оценке величин и состава радиоактивных выбросов в случае аварий на объектах малой энергетики морского и берегового базирования были выполнены ранее [4], и здесь использованы их результаты. А итоги оценки воздействия на окружающую среду распространившегося радиоактивного загрязнения, полученные с применением описываемой ниже интегрированной системы математических моделей переноса, будут обработаны и опубликованы позже.

Методы

Объекты малой атомной энергетики

Определим, какие виды ядерных энергетических установок (ЯЭУ) относятся к объектам малой энергетики морского и берегового базирования. Принято считать, что это установки с электрической мощностью до 300 МВт: транспортные — ЯЭУ ледоколов и гражданских судов, транспортабельные — ЯЭУ, которые с учетом их габаритов и конструкций можно перевозить по частям (в виде отдельных модулей, в зарубежной литературе широко используется термин «Small modular reactors» — SMRs), а также те, которые можно перемещать из одного пункта в другой без разборки (целиком) — плавучие АСММ, которые устанавливаются у пирса или причальной стенки, во внутренних заливах, на дне (подводные), а также стационарные установки гражданского назначения — ЯЭУ наземного берегового размещения.

У России имеется более чем 65-летний опыт разработки, создания и эксплуатации (включая завершающую стадию жизненного цикла) ядерных энергетических установок малой мощности различных типов, которые успешно используются на атомных подводных лодках, атомных ледоколах, сухогрузе «Севморпуть», плавучей атомной теплоэлектростанции (ПАТЭС) «Академик Ломоносов», на специальных объектах. Благодаря этим установкам в течение десятилетий были обеспечены не только надежное энергоснабжение оборонных объектов страны, круглогодичная навигация в Арктике с использованием атомных ледоколов [5], но и наработан бесценный опыт эксплуатации ядерных энергетических установок в полярных условиях, опыт обеспечения их безопасности и ликвидации последствий возможных аварий [6].

Методология моделирования и прогнозирования последствий аварий

Существуют различные методы прогнозирования и моделирования аварийных ситуаций и их последствий. Они применяются на стадиях научной разработки, проектирования, сооружения, эксплуатации и вывода из эксплуатации новых установок. В течение ряда лет участники данной работы исследовали возможные последствия ядерных ава-

Таблица 1. Типы объектов с ЯЭУ, эксплуатируемые и планируемые в Арктике

Тип реакторной установки (РУ)	Тепловая мощность РУ, МВт	Максимальный выброс * ^{137}Cs при аварии, ТБк	Объекты
РИТМ-200Б, РИТМ-400	209, 315	75	Офшорные атомные ледоколы (а/л), а/л пр. 10510 «Лидер», контейнеровозы арктического класса
ОК-900А, КЛТ-40М, РИТМ-200, КН-3 (2 шт.), КЛТ-40С, КЛТ-40	171, 171, 175, 150, 135, 112	50—60	А/л «Ямал», «50 лет Победы», а/л «Вайгач», «Таймыр», универсальные а/л пр. 22220, лихтеровоз «Севморпуть» и др.
РУ в составе АСММ	3,5—38	1—15	АСММ МВт-класса, шельф, АБВ-6М

* Оценен по выбросу из АПЛ Б-159 ~25 ТБк для реактора 70 МВт.

рий на затонувших и затопленных в Арктике ядерно и радиационно опасных объектах (ЯРОО), применяя для моделирования распространения радионуклидов в акватории Северного Ледовитого океана математическую модель динамики океана ИВМИО 4.1. Результаты этих исследований опубликованы в различных изданиях [6—8]. Но все модели имеют определенные недостатки и не могут дать полностью достоверный прогноз обстановки и ее изменения. Для повышения точности прогноза последствий радиационной аварии необходимо понимать и максимально учитывать при моделировании все протекающие процессы, их природу, взаимосвязи, влияние на конечный результат. Поэтому любые усовершенствования используемых расчетных моделей, ведущие к повышению точности таких прогнозов, позволяют лучше оценить складывающуюся обстановку и более адекватно реагировать на возникающие угрозы.

Для этого разработана методология, в соответствии с которой должны быть сформулированы и обоснованы рекомендации по минимизации негативного воздействия последствий аварии на окружающую природную среду и человека, что, собственно, и является целью исследования.

Следуя этой методологии, необходимо как минимум провести три последовательные группы исследований:

1. Оценку параметров максимально возможного радиоактивного выброса (активность выброса, изотопный состав, характер выброса — залповый или длительное истечение и т. п.), а также механизм формирования и математическое представление образовавшегося распределенного в пространстве и времени источника радиации.

2. Компьютерное моделирование распространения радионуклидов от образовавшегося источника в арктической акватории, учитывающее все возможные процессы переноса частиц из одной среды в другую, такие как распространение радионуклидов в атмосфере, осаждение на сушу и водную поверхность, распространение в воде, «вмерзание»

некоторых радиоактивных частиц в лед, перенос вместе с дрейфом льда, вытаивание и дальнейший перенос их в воде, осаждение на дно, захват частиц донным грунтом, обратное вымывание и дальнейшее распространение радионуклидов в воде и т. д. (см. рис. 1).

3. Оценку воздействия переносимых в атмосфере и воде радиоактивных материалов на население, персонал и окружающую среду: биоту, морепродукты, рыбу, животных и птиц, выявление наиболее вредных факторов воздействия и заблаговременную выработку рекомендаций для принятия мер по их минимизации.

Что касается пункта 1, то оценки величин максимальных выбросов для различных ЯЭУ были сделаны ранее и приведены в табл. 1. В ней представлены оценки величины максимального радиоактивного выброса при гипотетической аварии. Видно, что при единичной гипотетической аварии на ФГУП «Атомфлот» выброс ^{137}Cs может достигать 75 ТБк, для двух-трех объектов — 150—200 ТБк и максимально для всех — 300—500 ТБк. С учетом поступления одновременно нескольких дозообразующих радионуклидов опасность возрастает в три-пять раз, выброс может составить более 1 ПБк. Этих данных достаточно для реализации пункта 2 (компьютерного моделирования распространения радионуклидов от образовавшегося источника в арктической акватории), что, собственно, и является основным содержанием данной статьи.

Полученные в пункте 2 результаты должны послужить исходными данными для третьей группы исследований, которые будут проведены позже.

Интегрированная система моделей распространения радионуклидов

Перспективная цель нашего исследования — разработка интегрированной системы моделей, программного обеспечения и методологии их применения для прогнозирования радиоактивного загрязнения окружающей среды в результате аварии на радиационно опасном объекте с целью выра-

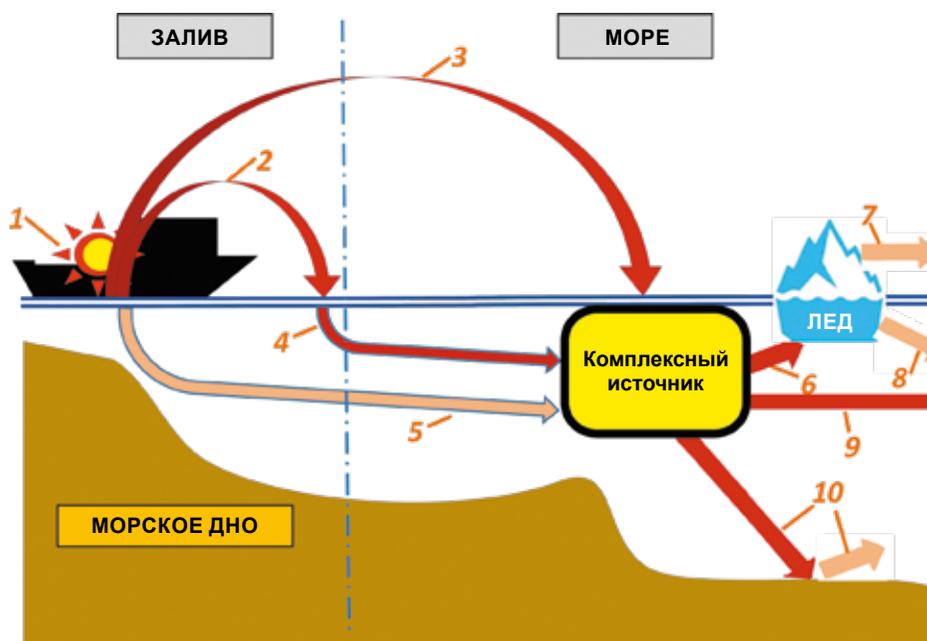


Рис. 1. Схема формирования комплексного источника при аварии ЯЭУ в заливе и последующего переноса радионуклидов от сформированного источника: 1 – авария на ЯЭУ в заливе с выбросом радионуклидов в атмосферу, 2 – выброс в атмосферу и осаждение радионуклидов на поверхность залива, 3 – выброс в атмосферу и осаждение радионуклидов на морскую поверхность, 4 – распространение в толще воды осевших в залив радионуклидов и вынос их в море, 5 – выброс радионуклидов в воду залива и вынос их в море, 6 – вмерзание радионуклидов в лед из воды, 7 – перенос радионуклидов льдом, 8 – вытаивание и дальнейшее распространение радионуклидов в воде, 9 – распространение радионуклидов в толще воды, 10 – оседание радионуклидов на дно, захват и вымывание части из них

Fig. 1. Scheme of formation of a complex source in the event of a NPP accident in the bay and the subsequent transfer of radionuclides from the generated source: 1 – an accident at a NPP in the bay with the release of radionuclides into the atmosphere, 2 – release into the atmosphere and deposition of radionuclides on the bay surface, 3 – release into the atmosphere and deposition of radionuclides on the sea surface, 4 – distribution in the water column of radionuclides, deposited in the bay, and their removal into the sea, 5 – release of radionuclides into the bay water and their removal into the sea, 6 – ice-binding of radionuclides, 7 – drift of the frozen particles with ice, 8 – thawing and further spread of radionuclides in water, 9 – propagation of radionuclides in sea water, 10 – sedimentation of radionuclides to the bottom, partial capture and washing-out

ботки рекомендаций по минимизации негативных последствий аварии. Такая система моделей должна обеспечивать адекватное описание любых возможных процессов распространения радиоактивных материалов в объектах окружающей природной среды (ОПС), включая учет трансформации загрязнения при переносе радионуклидов между разными средами. Например, поступившие в атмосферу частицы могут как оседать на поверхность суши и воды с осадками, так и вновь вовлекаться в процесс атмосферного переноса за счет испарения, ветра или пожара. Загрязнение может смываться с суши в водную среду осадками, но также поступать из воды на сушу за счет паводков, наводнений и т. п.

Разработка такой интегрированной системы параллельно работающих моделей с взаимным обменом информацией — задача чрезвычайно сложная и трудоемкая. Поэтому разумный подход к ее решению состоит в поэтапной интеграции моделей различных процессов с необходимой доработкой отдельных элементов начиная с наиболее характерных для рассматриваемых объектов моделиро-

вания аварийных событий. В данной статье рассмотрены первые шаги в этом направлении.

Стадии и механизмы процесса распространения

Далее речь идет об одном из наиболее характерных для рассматриваемых объектов малой атомной энергетики сценариев аварийного выброса радионуклидов — залповом выбросе.

Весь процесс распространения радионуклидов после выброса для удобства описания мы условно разбили на две стадии. Первая стадия — формирование источника. Это выброс радионуклидов в атмосферу, их воздушный перенос и осаждение на подстилающую поверхность — воду залива, акваторию открытого моря, сушу. Далее — распространение осевших на водную поверхность частиц в толще воды: в заливе с выносом в открытое море или непосредственно в открытом море. В результате этих перемещений радионуклидов (выброс, перенос по воздуху, выпадение на подстилающую поверхность залива и открытого моря, перенос в воде залива с выносом в открытое море) в море сформируется пространственно распределенный

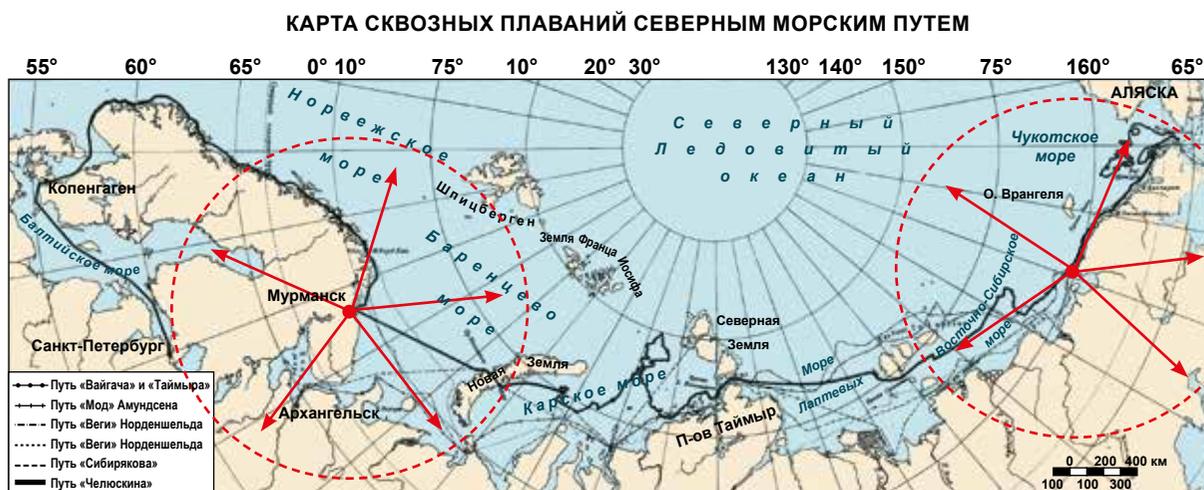


Рис. 2. Определяющие направления перемещения радиоактивной примеси воздушным путем до 1000 км, представляющие опасность для радиоэкологии морских акваторий в Арктике и на Дальнем Востоке России, включая прилегающие страны
Fig. 2. Determining directions for the movement of radioactive impurities by air up to 1000 km, posing a danger to the radioecology of sea areas in the Arctic and the Far East of Russia, including adjacent countries

и изменяющийся во времени «комплексный источник» загрязнения, который и станет исходной конфигурацией для дальнейшего распространения радионуклидов в акватории Арктики и моделирования этого процесса. Это вторая стадия процесса распространения.

Кроме атмосферного переноса с последующим оседанием на поверхность воды существует еще вариант прямого выброса радиоактивных веществ в воду (без атмосферного переноса). Схематически эти процессы в их последовательности изображены в левой части рис. 1¹ и дают наглядную картину первой стадии — формирование «комплексного источника» для последующего моделирования океанического распространения загрязнения. Правая часть рисунка иллюстрирует стадию 2 — совокупность процессов, определяющих картину океанского переноса. Различные цвета стрелок на рис. 1 означают разную степень проработки (готовности) индивидуальных моделей для описания различных механизмов переноса: более насыщенный цвет стрелок означает большую степень проработанности модели для данного процесса.

Представительные объекты с ЯЭУ для исследования

В силу ограниченности временных, вычислительных, финансовых ресурсов в рамках данной работы невозможно выполнить необходимые расчеты по моделированию переноса радионуклидов от всех находящихся и планируемых к размещению в Арктике ЯЭУ. Но среди этих объектов можно выбрать для первоочередного исследования те, которые в максимальной степени аккумулируют в себе наиболее характерные свойства и признаки остальных объектов, так называемые представительные объекты.

¹ Все рисунки в статье выполнены авторским коллективом.

Выбор представительных объектов для исследования радиоэкологических проблем продиктован следующими соображениями:

- объекты должны располагаться в удаленных друг от друга регионах, чтобы обеспечить возможность моделирования в разных условиях ОПС и демографических особенностей зоны, прилегающей к ядерно или радиационно опасному объекту (ЯРОО);
- необходимо иметь доступные и достаточно детальные данные об орографии региона, профилях прибрежной поверхности суши, профиле дна и свойствах донного грунта, расположении населенных пунктов и др.;
- желательно по возможности выбрать пункты размещения ЯРОО поблизости от государственной границы для исследования возможности трансграничного переноса радионуклидов;
- желательно выбирать ЯРОО различной мобильности;
- желательно выбирать регионы с уже размещенными в них ЯРОО или достаточно высокой вероятностью их размещения в недалеком будущем;
- желательно выбирать ЯРОО, размещенные в непосредственной близости от берега или в заливах/проливах достаточной длины для применения модели распространения радионуклидов в таких водоемах с выносом загрязнения в открытое море.

Всем этим требованиям удовлетворяют два пункта в Арктике: ФГУП «Атомфлот», находящийся в Мурманске в Кольском заливе Баренцева моря, и ПАТЭС «Академик Ломоносов», размещенная в бухте Певек Восточно-Сибирского моря [9].

ФГУП «Атомфлот» — база обслуживания атомного ледокольного флота, это гарантирует присутствие плавучих объектов с ЯРОО. Кроме того, там

находится площадка временного хранения контейнеров с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ). Гипотетическая авария с выходом радионуклидов в ОПС может привести к радиационному загрязнению территорий Мурманской, Архангельской и Ленинградской областей, Республик Карелия и Коми, Ненецкого автономного округа в России, а также Финляндии, Швеции и Норвегии.

В бухте Певек размещена и находится в промышленной эксплуатации первая в мире ПАТЭС «Академик Ломоносов». Проектом предусмотрено, что после выработки четырех циклов топливных кампаний (по три года для каждой реакторной установки) ПАТЭС будет вывезена из региона для перегрузки и капитального ремонта на два года и замещена новой ПАТЭС. Гипотетическая авария с выходом радионуклидов в ОПС на этом объекте может привести к радиационному загрязнению территорий Чукотского автономного округа, Магаданской области и Камчатского края, акватории Восточно-Сибирского, Чукотского и Берингова морей, Колымского залива, пролива Лонга, Берингова пролива, залива Креста, залива Шелехова в Охотском море в России, а также акваторий Чукотского моря и Берингова пролива, принадлежащих США. Возможные зоны радиационного загрязнения при аварии в этих двух пунктах показаны на рис. 2. Обстоятельное исследование распространения радиации в случае аналогичной аварии на АПЛ в бухте Чажма выполнено в [10].

Поэтому в первую очередь нужно выполнить моделирование распространения радионуклидов после аварийного выброса именно в этих двух точках.

Поскольку весь процесс распространения достаточно сложен и по сути представляет собой совокупность нескольких последовательных и параллельных процессов, необходимо промоделировать каждый из них, чтобы получить целостную законченную картину, максимально приближенную к реальной.

Важно отметить, что результаты моделирования каждого процесса распространения радионуклидов могут быть исходными данными для моделирования других процессов. Обычно для моделирования процессов переноса рассматривают какой-то или какие-то характерные типы источников: точечный, распределенный в пространстве, мгновенный выброс, длительное истечение и т. д. Но в реальности приходится иметь дело с комбинированными источниками. В нашем случае пять из шести приведенных выше процессов (выброс, перенос в атмосфере, выпадение на подстилающую поверхность с последующим распространением в воде залива и открытого моря) составляют сложный механизм формирования такого распределенного в пространстве и времени комплексного источника, который далее будет использован в качестве отправной точки для моделирования распространения загрязнения в арктической акватории.

Моделирование процессов переноса радионуклидов в различных средах

В данной работе для расчетов различных этапов процесса распространения радионуклидов были выбраны модели переноса, разработанные в ИБРАЭ РАН, Институте вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН и Институте океанологии им. П. П. Ширшова РАН. Эти модели могут быть настроены на заданные климатические условия и детальные данные об орографии региона моделирования, на различные сценарии аварийных событий на характерных ЯРОО.

Для моделирования переноса в атмосфере было выбрано программное средство (ПС) PAPPAD, разработанное в ИБРАЭ РАН [11]. Оно основано на транспортной модели NOSTRADAMUS [12] и региональной гидродинамической модели WRF-ARW. В модели используется модифицированный Лагранжев подход, в котором моделируемые точки являются центрами облаков. Результатом расчетов является пространственно-временное поле концентрации радиоактивного вещества в атмосфере. При расчете концентрации аэрозолей и газов, которые можно считать пассивной примесью, в этой модели учитывается сухое осаждение, вымывание осадками и радиоактивный распад.

Моделирование распространения радионуклидов в заливах, устьях рек, а также их выноса в открытое море проводилось в рамках разрабатываемой в ИБРАЭ РАН модели. Она основана на усовершенствованном уравнении Сен-Венана. Для водоемов, у которых ширина значительно меньше длины, это приближение вполне допустимо. Перенос пассивной примеси моделируется отдельным расчетным модулем, в котором имеется неоднородное поле турбулентной диффузии в горизонтальном и вертикальном направлениях. Таким способом модель двумерной гидродинамики сопряжена с трехмерной моделью адвекции-диффузии примеси.

Расчет переноса радиоактивной примеси в арктических морях предполагается осуществлять на основе модели динамики океана ИВМИО 4.1, морского льда CICE 5.1 и платформы для моделирования CMF 2.0 [13—17]. В модель должно быть включено усовершенствование алгоритмов численных расчетов переноса примеси на акватории при поступлении радионуклидов от комбинированного распределенного во времени и пространстве источника (плоскостного при осаждении из атмосферы и объемного при выносе из залива). Для реализации модели переноса радионуклидов в океанской среде расчетная схема модели термогидродинамики Мирового океана ИВМИО была дополнена модулем, осуществляющим расчеты перемещения Лагранжевых частиц под действием течения в точке нахождения частицы. В контексте данной модели под частицей подразумевается математический образ микроскопического фрагмента среды, движущегося в соответствии с уравнениями термогидродина-

мики океана. Расчетная схема различает два вида частиц: «легкие» с нейтральной плавучестью и «тяжелые», имеющие отрицательную плавучесть. Для «тяжелых» частиц к вертикальной составляющей скорости движения среды в точке нахождения частицы добавляется гравитационная составляющая, направленная ко дну и обусловленная действием гравитации. В текущей версии модели величина этой составляющей принята постоянной и равной 1,54 мкм/с, что соответствует характерному размеру частиц 1 мкм и оседанию в спокойной воде на 1 м за 7 дней.

В условиях Арктики наличие значительного количества льда в акватории является обычной ситуацией и требует адекватного учета как в описании процессов теплообмена, так и в моделировании переноса примеси.

Модель ИВМИО имеет компоненту, описывающую возникновение льда, его перемещение, а также некоторые физические процессы при переходе воды из одного агрегатного состояния в другое. Предлагаемая реализация модели учитывает возможность перехода частиц радионуклидов в лед и обратно. В результате на каждом шаге расчета по времени формируются массивы, описывающие положение льда на моделируемом участке океана, скорость его дрейфа, а также сведения об интенсивности замерзания и оттаивания льда в каждой ячейке координатной сетки океана. Частица примеси, попавшая в лед, продолжает движение в океане, но уже не со скоростью океанических течений, а со скоростью перемещения льда. В простейшем приближении частица может попасть в область льда из слоя поверхностных ячеек при выполнении следующего условия:

$$x_{\text{rand}} \leq \frac{\Delta V_{\text{frozen}}^{(i,j,0)}}{V_{\text{cell}}^{(i,j,0)}},$$

где x_{rand} — случайное число, распределенное равномерно в интервале (0, 1); $\Delta V_{\text{frozen}}^{(i,j,0)}$ — объем замерзшего льда в ячейке за шаг по времени в модели; $V_{\text{cell}}^{(i,j,0)}$ — объем ячейки координатной сетки.

При выполнении этого условия частица меняет режим движения и продолжает перемещаться со скоростью льда. Вычисление очередного значения координат частицы происходит согласно регулярному алгоритму.

Выбор характерных климатических условий, настройка моделей переноса к выбранным условиям

На данном этапе исследований по моделированию процессов переноса радионуклидов в случае аварий с ЯЭУ необходимо рассмотреть гидрометеорологические условия, характерные для современного состояния климата Арктической зоны. Из существующих источников информации, а именно базы данных прогноза погоды (Гидрометцентр РФ, ECMWF и др.), данных реанализа атмосферной циркуляции (ERA15, ERA40, ERA-Interim, NCEP/NCAR и др.), были выбраны данные ERA-Interim анализа за 2010—2017 гг. Данные ERA-Interim широко используются в моделировании циркуляции вод океана и для анализа атмосферной циркуляции. Пространственно-временное разрешение данных ERA-Interim позволяет разрешить основные синоптические ситуации, характерные для арктического бассейна. Пространственное разрешение данных ERA-Interim составляет 0,75°, дискретность по времени — 3 ч. Для расчетов в проекте будут использоваться результаты моделирования межгодовой и синоптической изменчивости Северного Ледовитого океана с форсингом ERA-Interim.

Результаты

Результаты

Тестовые расчеты

После доработки вышеназванных моделей и приведения их в соответствие с выбранными условиями были проведены тестовые расчеты по всем трем моделям для источника с координатами 69° 2' 50" N, 33° 4' 41" E (ФГУП «Атомфлот») при взрыве на поверхности.

Атмосферный перенос рассчитывался со следующими параметрами выброса:

- Длительность выброса — 1 с. Радионуклидный состав — ^{137}Cs .
- Физико-химическая форма — аэрозоли.
- Скорость сухого осаждения — 0,008 м/с.
- Высота подъема облака — 70 м.
- Условные метеорологические параметры — три случая: 1 — неустойчивая стратификация (категория А, скорость ветра на высоте 10 м — 2 м/с), 2 — нейтральная стратификация (категория D, скорость ветра на высоте 10 м — 4 м/с), 3 — устойчивая стратификация (категория F, скорость ветра на высоте 10 м — 1 м/с).
- Тип подстилающей поверхности — учитывалось влияние перехода от суши к воде на скорость осаждения аэрозолей. Не учитывались: рельеф местности, осадки и сезонность — условно принято, что моделирование проводится для летнего периода.

В результате получены интегральные поля выпадений радиоактивных веществ на поверхность за время прохождения радиоактивного облака от места выброса до полного его выхода за границу расчетной области у архипелага Новая Земля. Время прохождения облака составляло от 42 до 260 ч в зависимости от скорости ветра и категории погоды. Результаты расчетов иллюстрируются картограммами на рис. 3.

Для расчетов переноса радионуклидов по Кольскому заливу с выходом в открытое море было необходимо задать береговую линию и батиметрию залива с достаточно высоким разрешением. Задача описания береговой линии была решена с помощью общедоступной базы данных ASTER GDEM с разрешением 50×50 м при реальном размере расчетной

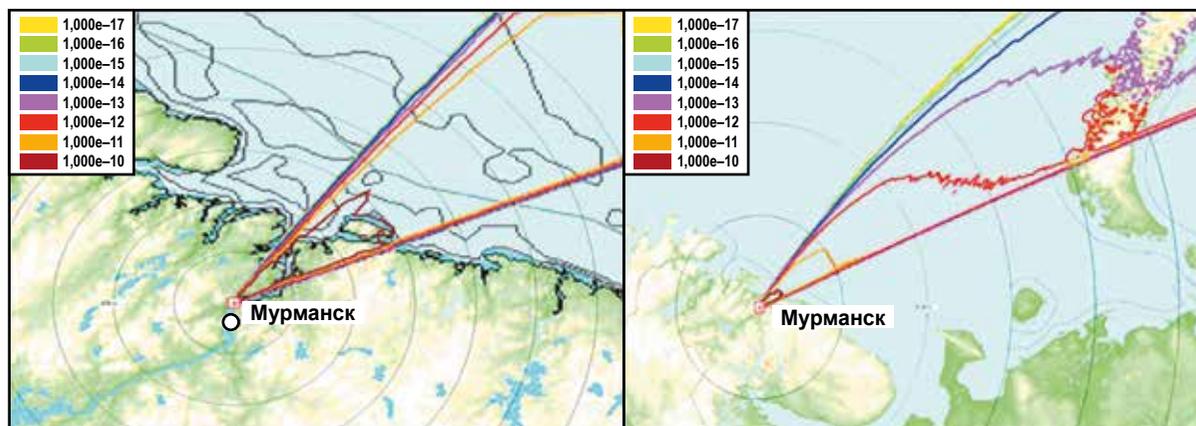


Рис. 3. Плотность выпадения ¹³⁷Cs (категория F, 1 м/с) на суше (Бк/м²) и акватории моря (Бк/м³) в большой (справа) до 1000 км и малой (слева) до 500 км расчетных областях
 Fig. 3. Fall-out density of ¹³⁷Cs (category F, 1 m/s) on land (Bq/m²) and sea area (Bq/m³) in the large (right) up to 1000 km and small (left) up to 500 km of the calculated areas

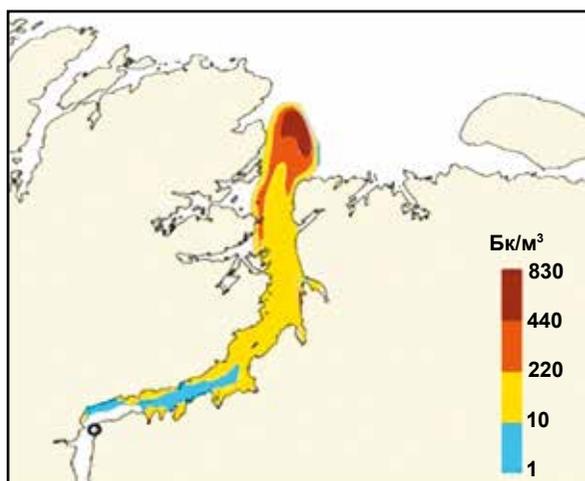


Рис. 4. Загрязнение Кольского залива через 260 ч после начала моделирования
 Fig. 4. Contamination of Kola Bay 260 h after modeling start

сетки 200×200 м. Лучшие существующие в открытом доступе данные по глубине GEBCO имеют разрешение около 500 м по широте и 250 м по долготе, так что для расчетов данные из базы были интерполированы. Результат расчетов показан на рис. 4.

Модель ИВМИО Северного Ледовитого океана с разрешением 0,1×0,1° и 49 горизонтами по глубине с параллельной моделью льда CICE имеет расчетный модуль переноса Лагранжевых частиц. В предшествующих расчетах по этой модели она инициировалась циклически повторяющимися внутригодовыми колебаниями атмосферных параметров, осадков и солнечного излучения, взятыми из базы CNYFv2 в соответствии с протоколом CORE-I [18]. В рамках проекта проведены настроечные расчеты по переносу Лагранжевых частиц с форсингом ERA-Interim.

В тестовом расчете аварийный выброс радионуклидов происходит в точке, достаточно далекой от замерзающих районов арктической акватории и в летнее время (1 августа первого условного модельного года). Поэтому лишь небольшая часть поступивших в океан радионуклидов вмержает в лед по мере перемещения пятна загрязнения в высокие широты и наступления сезона интенсивного образования льда. Тем не менее анализ полученных результатов позволяет установить некоторые характерные особенности процесса переноса радионуклидов морским льдом (процессы 6—8 на рис. 1).

На рис. 5 приведена динамика вмержания Лагранжевых частиц в лед за три модельных года. Изменение количества частиц, находящихся в «замороженном» состоянии, имеет отчетливо выраженный сезонный характер.

На рис. 6а и 6б представлены распределения числа вмержших в лед частиц по полному времени пребывания во льду и общей длине дрейфа частиц во льду соответственно. Видно, что лишь половина полного числа «замороженных» частиц находится во льду сравнительно недолго (медиана распределения на рис. 6а ~40 дней), а другая половина пребывает в «замороженном» состоянии от месяца до почти 8 месяцев. В то же время для половины числа «замороженных» частиц общая длина дрейфа во льду составляет менее 100 км (медиана распределения на рис. 6б ~85 км), но свыше 20% числа частиц дрейфует во льду свыше 150 км.

Анализ дрейфа частиц радиоактивной примеси во льду представляет особый интерес. Такой механизм существенно отличается от обычного распространения пятна загрязнения в океане: за время нахождения во льду объемная концентрация радионуклидов не меняется. В результате в процессе таяния загрязненного льда в водной среде может появиться источник активности, который может быть удален на большое расстояние от места выброса, и это может

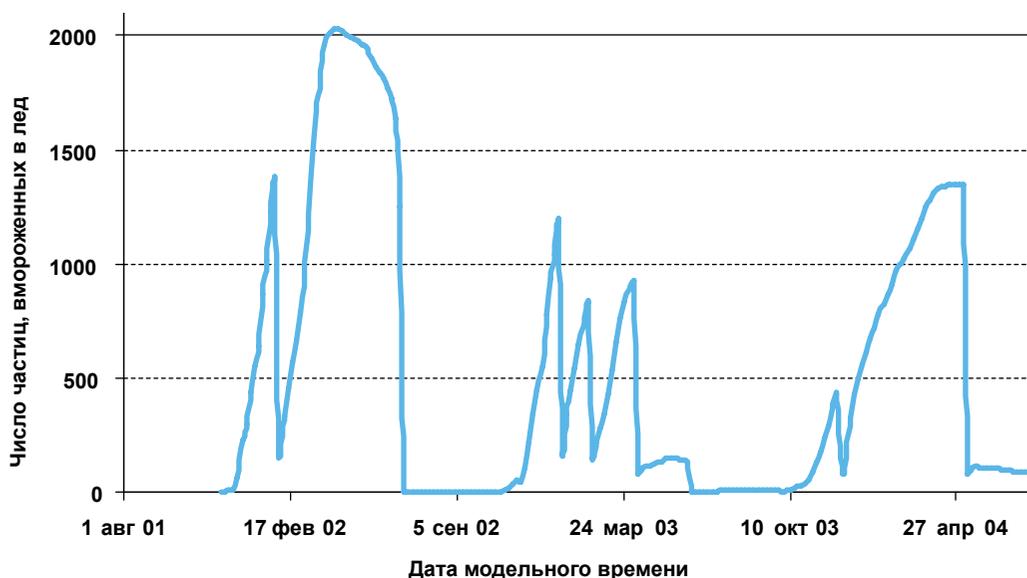


Рис. 5. Динамика вморзания Лагранжевых частиц в лед за 3 модельных года
Fig. 5. Dynamics of ice-binding of the Lagrange particles for 3 model years

случиться через длительное время после аварии, когда концентрация активности в пятне обычного загрязнения уже снизилась до низких значений.

Передача данных между моделями

Передача данных между моделями носит односторонний характер: данные атмосферных расчетов и расчетов в заливах будут передаваться в модель ИВМИО текстовыми файлами с координатами центров ячеек расчетных сеток и объемных концентраций радионуклидов в каждой ячейке. Такой формат данных был использован в тестовом расчете. Для выпадения радионуклидов из атмосферы в океан сформировано 22 150 расчетных точек (рис. 7), для выноса из залива в открытое море — 952 точки (рис. 8).

Рис. 6. Распределение числа вморзших в лед Лагранжевых частиц по времени пребывания во льду (а) и общей длине дрейфа во льду (б). Вертикальная линия на рис. 6а примерно соответствует медиане распределения

Fig. 6. Distribution of the number of the ice-bound Lagrange particles against duration of the frozen state (a) and total drift length in the ice (б). The vertical line in fig. 6a approximately corresponds to the distribution median

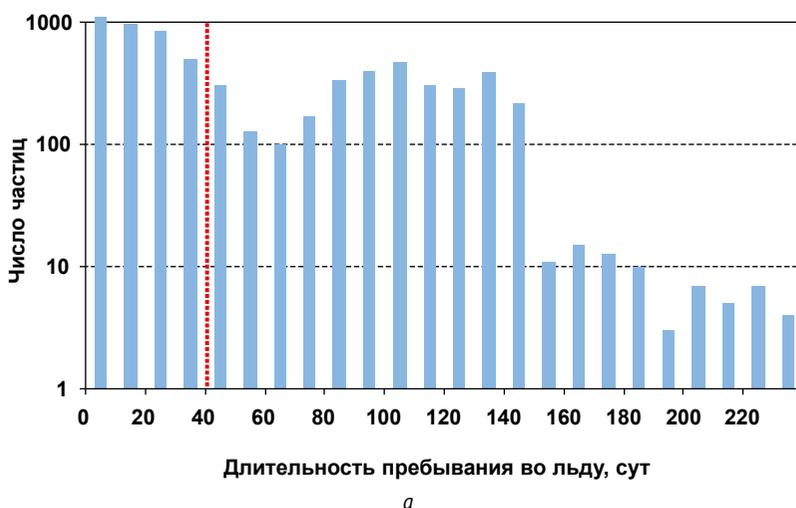




Рис. 7. Поле 22 150 расчетных точек, предназначенное для моделирования ПС ИВМИО загрязнения ¹³⁷Cs поверхности Баренцева моря
 Fig. 7. Field 22 150 of calculated points for modeling by means of the INMIO code package of ¹³⁷Cs contamination of the Barents Sea surface

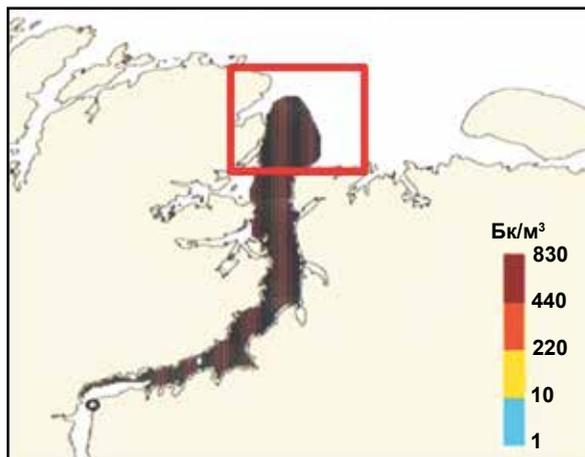


Рис. 8. Поле 8450 расчетных точек для моделирования выноса ¹³⁷Cs из Кольского залива и 952 точки на выходе из него (красный квадрат) для передачи в ПС ИВМИО для прогноза загрязнения Баренцева моря
 Fig. 8. Field 8540 of calculated points for modeling by means of the INMIO code package of the ¹³⁷Cs outflow from Kola Bay and 952 points at its outlet (red square) to predict contamination of the Barents Sea

Обсуждение

Моделированием процесса распространения радионуклидов в акватории Арктики исследования не завершаются. Ключевым элементом в этой системе являются оценка последствий аварий и срав-

нение их с допустимыми уровнями вмешательства в окружающую природную среду и воздействия на человека. Результаты таких оценок показывают, что при определенных сценариях развития аварий вмешательство в окружающую среду может превысить допустимые уровни, и потребуется принимать меры по ликвидации или уменьшению отрицательных последствий.

В соответствии с описанной методологией важнейшим ее инструментом является моделирование процессов переноса радионуклидов, вышедших из объекта в окружающую среду в результате аварии. Полученные в рамках примененных моделей оценки служат научным обоснованием мероприятий по минимизации последствий аварий, реабилитации пострадавших, разработке предложений по совершенствованию нормативной базы, оптимизации размещения центров мониторинга и аварийного реагирования на радиационные инциденты в Арктике.

В данной работе были получены результаты, направленные на совершенствование оценки и описания источника радиоактивного выброса, разработана и применена интегрированная система математических моделей для расчета переноса радионуклидов в случае ядерных аварий в акватории Арктики. Разработанная система базовых инструментов моделирования, в которой используются усовершенствованные программные средства, согласованные друг с другом и с заданными внеш-

ними условиями, позволяет проводить синхронные расчеты переноса радионуклидов одновременно по нескольким каналам: в атмосфере, в открытом море, в акваториях узких заливов и проливных участках акватории, а также переноса дрейфующим морским льдом за счет вмержания частиц из морской среды в лед, дрейфа вместе с ним и вытаивания спустя длительное время после выброса и на большом расстоянии от источника.

Выводы

Разработанная и примененная система интегрированных моделей позволила получить прогноз распространения радионуклидов, более полно (адекватно), чем при использовании ранее упрощенной модели источника, отражающий реальные механизмы переноса.

Однако следует отметить, что используемый механизм «передачи» частиц от одной модели к другой в построенной системе работоспособен, но достаточно ресурсоемок при вычислениях. Поэтому в будущем целесообразно доработать систему моделей, обеспечив параллельный расчет переноса по всем возможным каналам в едином вычислительном процессе.

Исследования будут продолжаться в ближайшие годы, так что подобная доработка вполне реальна и поможет в выработке практических рекомендаций для минимизации воздействия последствий аварии на окружающую среду.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-19-00615 «Исследование радиоэкологических проблем Арктической зоны Российской Федерации с целью повышения радиационной и экологической безопасности человека и окружающей среды в условиях интенсивного использования морских и береговых ядерных энергетических установок для опережающего развития региона».

Литература

1. Саркисов А. А., Антипов С. В., Смоленцев Д. О. и др. Малая атомная энергетика в контексте трансформации электроэнергетических систем // Изв. вузов. Ядер. энергетика. — 2020. — № 4. — С. 5—14.
2. Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики: Т. 2 / Под ред. акад. РАН А. А. Саркисова. — М.: Академ-Принт, 2015. — 387 с.
3. Кузнецов В. П., Демин В. Ф., Макаров В. И. и др. Аспекты страхования гражданской ответственности за ядерные риски от атомных станций малой мощности // Изв. РАН. Сер. Энергетика. — 2014. — № 2. — С. 88—95.
4. Антипов С. В., Биладенко В. П., Высоцкий В. Л. и др. Оценка выхода радионуклидов в окружающую среду в случае возникновения аварии на затонувшей атомной подводной лодке Б-159 // Атом. энергия. — 2015. — Т. 119, № 4. — С. 222—229.

5. Кашка М. М., Смирнов А. А., Головинский С. А. и др. Перспективы развития атомного ледокольного флота // Арктика: экология и экономика. — 2016. — № 3 (23). — С. 98—107.
6. Саркисов А. А. К вопросу о ликвидации радиоактивных загрязнений в арктическом регионе // Вестн. РАН. — 2019. — Т. 89, № 2. — С. 107—124.
7. Антипов С. В., Биладенко В. П., Высоцкий В. Л. и др. Прогноз и оценка радиоэкологических последствий гипотетической аварии на затонувшей в Баренцевом море атомной подводной лодке Б-159 // Атом. энергия. — 2015. — Т. 119, № 2. — С. 106—113.
8. Саркисов А. А., Антипов С. В., Биладенко В. П. и др. Математическое моделирование коррозионного разрушения объектов морского базирования // Атом. энергия. — 2021. — Т. 130, № 1. — С. 7—13.
9. Росэнергоатом: «Плавучий энергоблок “Академик Ломоносов” готов к началу эксплуатации» // Электрон. журн. «Безопасность ядер. технологий и окружающей среды». — 2019. — № 121. — URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2019/04/24/94286>.
10. Саркисов А. А., Высоцкий В. Л., Припачкин Д. А. Восстановление радиоактивного загрязнения окружающей среды в Приморском крае вследствие ядерной аварии на атомной подводной лодке в бухте Чажма // Атом. энергия. — 2019. — Т. 127, № 3. — С. 144—150.
11. Арутюнян Р. В., Припачкин Д. А., Сорокинова О. С. и др. Система ПАРРАД и ее испытания на реальных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу // Атом. энергия. — 2016. — Т. 121, № 3. — С. 69—73.
12. Беликов В. В., Головизнин В. М., Катыхников Ю. В. и др. НОСТРАДАМУС — компьютерная система прогнозирования радиационной обстановки. Верификация модели атмосферного переноса примеси // Моделирование распространения радионуклидов в окружающей среде / Под ред. Р. В. Арутюняна. — М.: Наука, 2008. — С. 41—103. — (Труды ИБРАЭ; вып. 9).
13. Ибраев Р. А., Хабеев Р. Н., Ушаков К. В. Вихререзающая $1/10^\circ$ модель Мирового океана // Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. — 2012. — Т. 48, № 1. — С. 45—55.
14. Кальницкий Л. Ю., Кауркин М. Н., Ушаков К. В., Ибраев Р. А. Сезонная изменчивость циркуляции вод и морского льда в Северном Ледовитом океане в модели высокого разрешения // Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. — 2020. — Т. 56, № 5. — С. 598—610. — DOI: 10.31857/S0002351520050065.
15. Griffies S. M., Biastoch A., Böning C. et al. Coordinated ocean-ice reference experiments (COREs) // Ocean modelling. — 2009. — Vol. 26. — P. 1—46.
16. Hunke E. C., Lipscomb W. H., Turner A. K. et al. CICE: the Los Alamos Sea Ice Model Documentation and Software User's Manual Version 5.1. — 2015. — URL:

<http://oceans11.lanl.gov/trac/CICE/attachment/wiki/WikiStart/cicedoc.pdf?format>.

17. Kalmykov V. V., Ibrayev R. A., Kaurkin M. N., Ushakov K. V. Compact Modeling Framework v3.0 for high-resolution global ocean-ice-atmosphere models // *Geosci. Model Dev.* — 2018. — Vol. 11. —

P. 3983—3997. — URL: <https://doi.org/10.5194/gmd-11-3983-2018>.

18. Large W., Yeager S. The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set // *Clim. Dyn.* — 2009. — Vol. 33, № 2—3. — P. 341—364.

Информация об авторах

Саркисов Ашот Аракелович, доктор технических наук, профессор, академик РАН, советник РАН, ИБРАЭ РАН (115191, Россия, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: sarkisov@ibrae.ac.ru.

Антипов Сергей Викторович, доктор технических наук, заместитель директора, ИБРАЭ РАН (115191, Россия, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: santipov@ibrae.ac.ru.

Билашенко Вячеслав Петрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ИБРАЭ РАН (115191, Россия, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: bilvp@ibrae.ac.ru.

Высоцкий Валентин Леонидович, доктор технических наук, заведующий лабораторией, ИБРАЭ РАН (115191, Россия, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: vvl@ibrae.ac.ru.

Дзама Дмитрий Владимирович, младший научный сотрудник, ИБРАЭ РАН (115191, Россия, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: ddv@ibrae.ac.ru.

Кобринский Михаил Натанович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, ИБРАЭ РАН (115191, Россия, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: mnk@ibrae.ac.ru.

Припачкин Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, научный сотрудник, ИБРАЭ РАН (115191, Россия, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: prad@ibrae.ac.ru.

Смоленцев Дмитрий Олегович, научный сотрудник, ИБРАЭ РАН (115191, Россия, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: dsmol@ibrae.ac.ru.

Шведов Павел Алексеевич, заместитель заведующего отделом, ИБРАЭ РАН (115191, Россия, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: spa@ibrae.ac.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Саркисов А. А., Антипов С. В., Билашенко В. П. и др. Разработка и применение интегрированной системы математических моделей переноса радионуклидов после гипотетической аварии с целью минимизации радиоэкологических последствий // *Арктика: экология и экономика.* — 2021. — Т. 11, № 3. — С. 313—326. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-313-326.

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF AN INTEGRATED SYSTEM OF MATHEMATICAL MODELS FOR THE TRANSFER OF RADIONUCLIDES UPON A HYPOTHETIC ACCIDENT TO MINIMIZE RADIOECOLOGICAL CONSEQUENCES

Sarkisov, A. A., Antipov, S. V., Bilashenko, V. P., Vysotsky, V. L., Dzama, D. V., Kobrinskiy, M. N., Pripachkin, D. A., Smolentsev, D. O., Shvedov, P. A.

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

The article was received on May 31, 2021

Abstract

An integrated system of mathematic models is developed and implemented. The system is aimed at predicting the spread of the radioactive materials in the Arctic waters from a complex source distributed in space and time, formed by an emergency release of radionuclides from a nuclear-powered facility. Such approach allows taking into account various mechanisms of radionuclide transfer in arbitrary combinations. In addition to customary considered atmospheric and marine advection-diffusion processes with sedimentation on the underlying surface, it takes into consideration other mechanisms. Among them are particle sedimentation to the sea bottom with bottom capture, reverse process of washing-out from the bottom sediments. Specially attended is the Arctic-specific mechanism of particle ice-binding in the sea ice, drift of the frozen particles with ice, and their return to marine environment in result of ice thawing. The latter process may result in the appearance of the radioactive source at the large distance from the initial source and long time after the release event. The integrated model complex will provide the most realistic picture of the radioactive trace spread. It will sure be the effective tool for minimizing the emergency negative impact on the population and environment. The article a stage of long-term work that is currently ongoing.

Keywords: accidents, emergency response, the Arctic, nuclear power, Russian Arctic zone, small nuclear power plants, nuclear icebreaker, safety, mathematical model, sea ice, floating thermal nuclear power plant.

The work is supported by the Russian Science Foundation Grant No. 20-19-00615 “Research of the Radioecological Problems of the Russian Arctic in Order to Enhance Radiation and Ecological Safety of Humans and the Environment when Using Intensively Offshore and Onshore Nuclear-Powered Installations for the Sake of Advanced Development of the Region”.

References

1. Sarkisov A. A., Antipov S. V., Smolentsev D. O. et al. Low-power nuclear power plants in the context of electric power systems transformation. *Izv. vuzov. Yader. Energetika*, 2020, no. 4, pp. 5—14. (In Russian).
2. Low-Power Nuclear Power Plants — a New Line in the Development of Power Systems. Ed. Acad. A. A. Sarkisov. Moscow, Akadem-Print Publ., 2015, 387 p. (In Russian).
3. Kuznetsov V. P., Demin V. F., Makarov V. I. et al. Issues of insurance of civil liability for nuclear damage from nuclear low-power plants. *Izv. RAN. Energetika*, 2014, no. 2, pp. 88—95. (In Russian).
4. Sarkisov A. A., Antipov S. V., Bilashenko V. P. et al. Evaluation of Radionuclide Emission into the Environment in the Case of the Accident on the Sunken Nuclear Submarine B-159. *Atomic Energy*, 2016, vol. 119, no. 4, pp. 275—284. DOI: 10.1007/s10512-016-0060-8.
5. Kashka M. M., Smirnov A. A., Golovinskii S. A. et al. Prospectives of development of nuclear icebreaker fleet. *Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy]*, 2016, no. 3 (23), pp. 98—107. (In Russian).
6. Sarkisov A. A. The Question of Clean-up of Radioactive Contamination in the Arctic Region. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2019, vol. 89, no. 1, pp. 7—22. DOI: 10.1134/S1019331619010106.
7. Antipov S. V., Bilashenko V. P., Vysotsky V. L. et al. Prediction and Evaluation of the Radioecological Consequences of a Hypothetical Accident on the Sunken Nuclear Submarine B-159 in the Barents Sea. *Atomic Energy*, 2015, vol. 119, no. 2, pp. 132—141. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10512-015-0039-x>.
8. Sarkisov A. A., Antipov S. V., Bilashenko V. P. et al. Mathematical modeling of corrosion destruction of objects in marine environment. *Atom. energiya*, 2021, vol. 130, no. 1, pp. 7—13. (In Russian).
9. Rosenergoatom: “Floating Power Unit “Academician Lomonosov” is ready for commissioning”. *Electron. journ. “Bezopasnost’ yader. tekhnologiy i okruzhayushchei sredy”*, 2019, no. 121. Available at: <https://www.atomic-energy.ru/news/2019/04/24/94286>. (In Russian).
10. Sarkisov A. A., Vysotskii V. L., Pripachkin D. A. Reconstruction of the Radioactive Contamination Occurring

in the Environment in Primorskii Krai as a Result of a Nuclear Accident on a Submarine in Bukhta Chazhma. *Atomic Energy*, 2020, vol. 127, no. 3, pp. 159—165. DOI: 10.1007/s10512-020-00604-8.

11. *Arutyunyan R. V., Pripachkin D. A., Sorokovikova O. S. et al.* PARRAD System and Its Testing on Real Radioactive Emissions Into the Atmosphere. *Atomic Energy*, 2017, vol. 121, no. 3, pp. 220—226. DOI: 10.1007/s10512-017-0187-2.

12. *Belikov V. V., Golovisnin V. M., Katyshkov Yu. V. et al.* NOSTRADAMUS — computer system for prediction of the radiation situation. Verification of the model of atmospheric transfer of impurity. Modeling of Radionuclide Transport in the Environment. Ed. by R. V. Arutyunyan. Moscow, Nauka Publ., 2008, pp. 41—103. (Proc. of IBRAE RAS, iss. 9). (In Russian).

13. *Ibrayev R. A., Ushakov K. V., Khabeev R. N.* Eddy-Resolving 1/10° Model of the World Ocean. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2012, vol. 48, no. 1, pp. 37—46. DOI: 10.1134/S0001433812010045.

14. *Kalnitskii L. Y., Kaurkin M. N., Ushakov K. V., Ibrayev R. A.* Seasonal Variability of Water and Sea-Ice

Circulation in the Arctic Ocean in a High-Resolution Model. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020, vol. 56, no. 5, pp. 522—533. DOI: 10.1134/S0001433820050060.

15. *Griffies S. M., Biastoch A., Böning C. et al.* Coordinated ocean-ice reference experiments (COREs). *Ocean modelling*, 2009, vol. 26, pp. 1—46.

16. *Hunke E. C., Lipscomb W. H., Turner A. K. et al.* CICE: the Los Alamos Sea Ice Model Documentation and Software User's Manual Version 5.1., 2015. Available at: <http://oceans11.lanl.gov/trac/CICE/attachment/wiki/WikiStart/cicedoc.pdf?format>.

17. *Kalmykov V. V., Ibrayev R. A., Kaurkin M. N., Ushakov K. V.* Compact Modeling Framework v3.0 for high-resolution global ocean-ice-atmosphere models. *Geosci. Model Dev.*, 2018, vol. 11, pp. 3983—3997. Available at: <https://doi.org/10.5194/gmd-11-3983-2018>.

18. *Large W., Yeager S.* The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set. *Clim. Dyn.*, 2009, vol. 3, no. 2—3, pp. 341—364.

Information about the authors

Sarkisov, Ashot Arakelovich, Doctor of Engineering Science, Academician of RAS, Professor, Advisor of RAS, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya Str., Moscow, Russia, 115191), e-mail: sarkisov@ibrae.ac.ru.

Antipov, Sergey Victorovich, Doctor of Engineering Science, Deputy Director, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya Str., Moscow, Russia, 115191), e-mail: santipov@ibrae.ac.ru.

Bilashenko, Vyacheslav Petrovich, PhD of Engineering Science, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya Str., Moscow, Russia, 115191), e-mail: bilvp@ibrae.ac.ru.

Vysotsky, Valentin Leonidovich, Doctor of Engineering Science, Head of Laboratory, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya Str., Moscow, Russia, 115191), e-mail: vv@ibrae.ac.ru.

Dzama, Dmitry Vladimirovich, Junior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya Str., Moscow, Russia, 115191), e-mail: ddv@ibrae.ac.ru.

Kobrinskiy, Mikhail Natanovich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya Str., Moscow, Russia, 115191), e-mail: mnk@ibrae.ac.ru.

Pripachkin, Dmitry Aleksandrovich, PhD of Engineering Science, Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya Str., Moscow, Russia, 115191), e-mail: prad@ibrae.ac.ru.

Smolentsev, Dmitry Olegovich, Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya Str., Moscow, Russia, 115191), e-mail: dsmol@ibrae.ac.ru.

Shvedov, Pavel Alekseyevich, Deputy Head of Department, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya Str., Moscow, Russia, 115191), e-mail: spa@ibrae.ac.ru.

Bibliographic description of the article

Sarkisov, A. A., Antipov, S. V., Bilashenko, V. P., Vysotsky, V. L., Dzama, D. V., Kobrinskiy, M. N., Pripachkin, D. A., Smolentsev, D. O., Shvedov, P. A. Development and application of an integrated system of mathematical models for the transfer of radionuclides upon a hypothetical accident to minimize radioecological consequences. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 3, pp. 313—326. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-313-326. (In Russian).

© Sarkisov A. A., Antipov S. V., Bilashenko V. P., Vysotsky V. L., Dzama D. V., Kobrinskiy M. N., Pripachkin D. A., Smolentsev D. O., Shvedov P. A., 2021