

ПРОГНОЗ ТРАНСПОРТА РАДИОНУКЛИДОВ В КАРСКОМ МОРЕ В СЛУЧАЕ РАДИАЦИОННОЙ АВАРИИ У ПОРТА САБЕТТА

С. В. Антипов¹, Р. А. Ибраев^{2,3}, Л. Ю. Кальницкий³, М. Н. Кобринский¹, С. В. Сёмин^{1,3}

¹ Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (Москва, Российская Федерация)

² Институт вычислительной математики имени Г. И. Марчука РАН (Москва, Российская Федерация)

³ Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 11 декабря 2024 г.

Для цитирования

Антипов С. В., Ибраев Р. А., Кальницкий Л. Ю. и др. Прогноз транспорта радионуклидов в Карском море в случае радиационной аварии у порта Сабетта // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 4. — С. 495—507. — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-4-495-507.

Исследованы процессы переноса радионуклидов в акватории Карского моря в случае гипотетической радиационной аварии у порта Сабетта. С применением лагранжево-эйлеровой модели динамики океан – морской лед и переноса лагранжевых частиц прогнозируется распространение радионуклидов в акватории Обской губы и Карского моря. Рассматриваются сценарии радиационной аварии в летний и зимний периоды. По результатам моделирования сделан вывод, что морской лед существенным образом влияет на перенос радионуклидов в арктических морях. Радионуклиды могут консервироваться в морском льду на длительные периоды, сохраняя тем самым память о прошедших радиационных авариях. Попав в морскую воду, радионуклиды погружаются ко дну и в случае неглубоких акваторий попадают в придонный слой, где и консервируются. Радионуклиды, вмерзшие в морской лед, могут распространяться льдами в течение длительного времени на значительные расстояния.

Ключевые слова: лагранжев перенос, радиоактивное загрязнение, порт Сабетта, лагранжево-эйлерова модель, модель динамики океана, лед, модель лед – океан, Северный Ледовитый океан, параллельные вычисления.

Введение

Предоставление своевременного и достоверного прогноза последствий техногенных катастроф в Мировом океане является особенно актуальной задачей для России в связи с активным освоением морских природных ресурсов. Это касается задач освоения логистического, минерального и военно-политического потенциала Северного морского пути [1] и всего арктического региона [2]. Активная постройка и эксплуатация портов и терминалов, отходы эксплуатации судов и балластные воды, разведка, добыча и транспортировка природных ископаемых, оставленные техника, контейнеры и даже

отработавшие атомные реакторы сами по себе создают повышенные риски для локальной экосистемы прибрежных и шельфовых районов Арктики. В сочетании с циркуляционными процессами в водах Северного Ледовитого океана (СЛО), стоком заполярных рек и переносом воздушных масс в атмосфере Арктики при возникновении чрезвычайных ситуаций это способно нанести непоправимый ущерб всей экосистеме заполярного региона [3].

Ключевую роль в освоении ресурсов Арктики играет развитие портовой инфраструктуры. Для качественной проводки судов и более эффективного выполнения работ по извлечению и транспортировке полезных ископаемых в последние десятилетия была построена и модернизирована целая сеть портов на берегах Северного морского пути: Певек,

Научные исследования в Арктике

Тикси, Хатанга, Диксон, Дудинка и, среди прочих, Сабетта. Последний, хоть и был по историческим меркам построен совсем недавно (строительство началось в 2012 г.), уже является вторым по величине грузооборота портом в русской Арктике. Он выполняет важнейшую функцию в рамках проекта «Ямал СПГ» по добыче полезных ископаемых в Карском море, которые составляют до 58% всего углеводородного сырья, разведенного в морях арктического шельфа [4].

При высоком уровне запасов, сосредоточенных в Карском море, порт Сабетта имеет колоссальный потенциал развития. Постройка и последующая эксплуатация сложных объектов сопряжены с повышенными рисками техногенного характера в первую очередь для локальной экосистемы региона [3]. Риски возникновения и распространения загрязнений необходимо учитывать как на этапах проектирования, в процессе строительства и эксплуатации, так и в перспективе развития портовой инфраструктуры, когда раскрытие потенциала региона потребует все больших объемов перевалки грузов и, в свою очередь, вызовет увеличение энергоемкости эксплуатируемой инфраструктуры. Растущая потребность в энергии может удовлетворяться за счет современных технологических решений, среди которых важнейшее место занимают плавучие атомные теплоэлектростанции (ПАТЭС). Высокая мощность ПАТЭС сопряжена с присущим им дополнительным фактором риска — возможностью распространения радиоактивного загрязнения в случае возникновения чрезвычайных ситуаций [5; 6].

Таким образом, необходимо заблаговременно провести исследования для оценки долговременных последствий распространения примесей от источников, расположенных вблизи сосредоточения инфраструктурных объектов и имеющих различную природу активных веществ: радиоактивных и устойчивых изотопов, растворимых и нерастворимых элементов и др. В данной работе приведены результаты численного моделирования для решения задачи о распространении радиоактивного загрязнения от четырех источников, расположенных вблизи порта Сабетта, в результате гипотетических аварий, инициированных как в зимний период, когда поверхность Обской губы покрыта льдом, так и летом, когда залив свободен от ледяного покрова.

Методы исследований

Подходы к моделированию

Для решения задачи оперативного и предварительного прогнозирования динамики распространения загрязнений удобно использовать лагранжев подход совместно с эйлеровой моделью в рамках совместного численного моделирования гидродинамики заданного региона Мирового океана [7]. Первый рассматривает движения бесконечно малой жидкой частицы, которой можно придать различные свойства, в том числе характерные для

радионуклидов, а концентрация загрязнения определяется количеством частиц в заданной ячейке расчетной области. Эйлерова модель подразумевает рассмотрение динамики сплошной среды в заданном объеме — вычислительной ячейке. Этот подход является основным при построении многих современных моделей циркуляции океана и, как правило, используется для оценки потоков тепла и солености в интересующих регионах Мирового океана. В лагранжево-эйлеровой модели первичной является эйлерова модель, которая определяет характеристики потока жидкости в вычислительных ячейках, и на каждом временном шаге совместной модели вычисляется динамика лагранжевых частиц, а также, как следствие, динамика распространения заданного загрязнения. Таким образом, чем точнее эйлерова модель воспроизводит гидродинамические процессы заданного региона, тем выше будет достоверность прогноза транспорта загрязнений.

Известен и альтернативный подход, в котором для описания атмосферных и морских течений используется не эйлерова модель, а имеющиеся в открытом доступе международные базы данных (учитывающие в том числе и сезонные изменения), например, HYCOM (см. <https://www.hycom.org>) и разработанная на его основе система мониторинга и прогнозирования ТОРАЗ [8].

Эйлерова модель океана, как правило, подразумевает численное решение полной системы уравнений динамики жидкости при заданной параметризации начальных и граничных условий в заданной акватории с определенным разрешением расчетной области. В кооперации с моделями льда и/или атмосферы этот подход позволяет достичь хороших результатов в прогнозировании динамики региональных и глобальных климатических процессов, что было продемонстрировано, например, в [9; 10] и в рамках работ группы исследователей из Института вычислительной математики им. Г. И. Марчука (ИВМ) РАН и Института океанологии им. П. П. Ширшова (ИО) РАН для Мирового океана [11; 12] и для Арктики в частности [13; 14]. С другой стороны, успешное применение совместного лагранжево-эйлерова подхода к описанию динамики распространения радиоактивных загрязнений было продемонстрировано, например, в рамках [15] для Тихого океана или в [16] для Баренцева и Норвежского морей СЛО.

В данной работе для решения задачи прогнозирования динамики распространения загрязнений у порта Сабетта использована совместная лагранжево-эйлерова модель, разрабатываемая в ИВМ РАН, ИО РАН и Институте проблем безопасного развития атомной энергетики (ИБРАЭ) РАН. При этом эйлерова ее часть представлена моделями океана ИВМИО 4.1 и льда CICE 5.1, функционирующих на параллельных компьютерах под управлением компактной вычислительной платформы CMF 3.0 и настроенных для моделирования внутригодовой

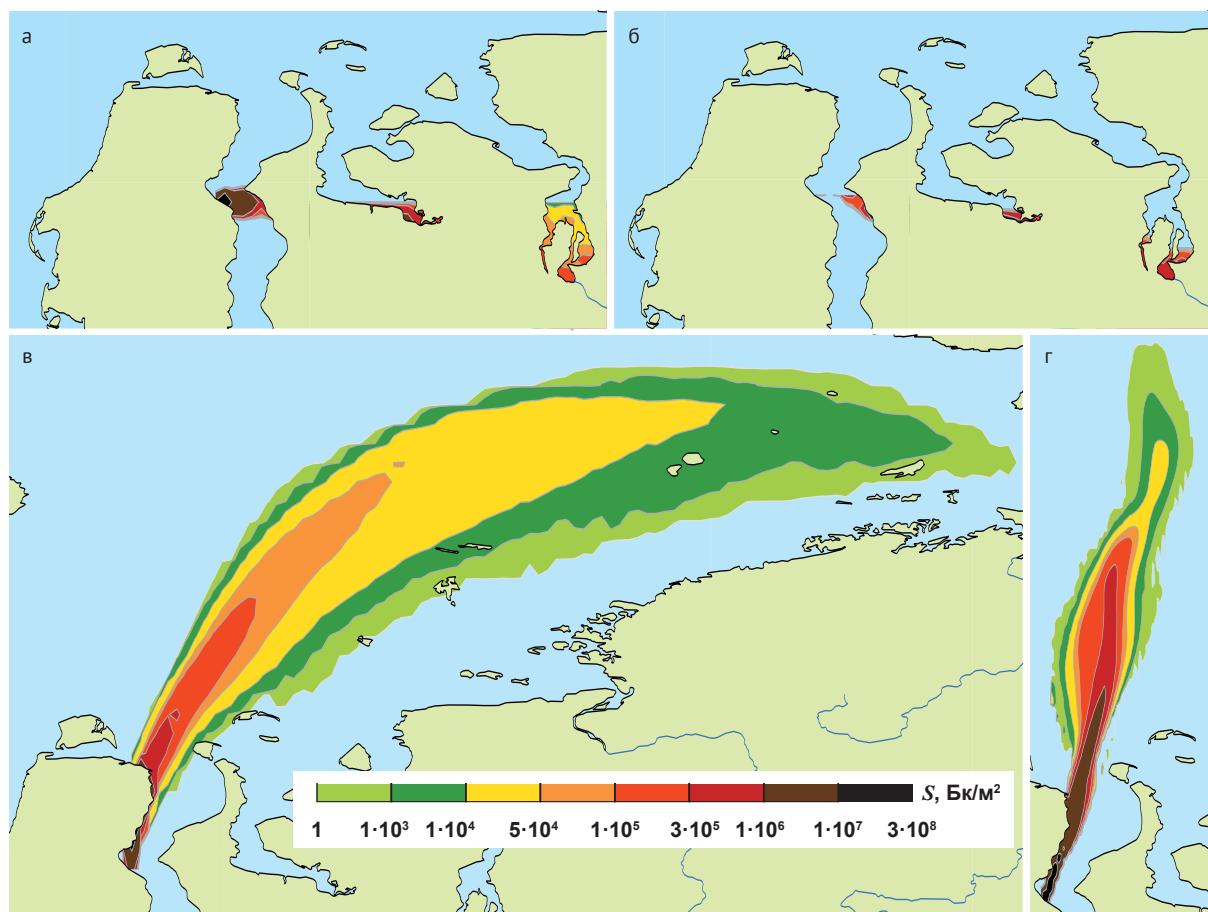


Рис. 1. Поля загрязнения залива Обская губа за счет осаждения радионуклидов для различных сценариев аварийного выброса; а – восток лето, б – восток зима, в – север зима, г – север лето. Источник: расчеты авторов
 Fig. 1. Contamination fields of the Gulf of Ob formed by radionuclide sedimentation for various release scenarios: a – east summer, б – east winter, в – north winter, г – north summer. Origin: authors' calculations

изменчивости циркуляции вод и льда СЛО [13]. Отличительной особенностью ее реализации является моделирование распространения частиц в двухфазной среде лед-вода с поддержкой неограниченного количества переходов из одного состояния в другое. Этот функционал необходим для построения реалистичных прогнозов распространения примесей в водах СЛО, так как его поверхность большую часть года покрыта ледяным покровом, динамика которого очевидно значительно отличается от динамики циркуляции внутренних вод океана. Поэтому в значительной мере будет отличаться и динамика частиц загрязнений, вмерзших в лед и свободно перемещающихся под действием океанических течений.

Подготовка исходных данных

Акватория порта Сабетта расположена на излучине Обской губы (самого крупного залива Карского моря) в месте, где береговая линия залива смещается на восток. Это способствует естественной фильтрации южнонаправленных волн, индуцированных в Северном Ледовитом океане. С другой стороны Обская губа образована эстуарием реки Обь

и наполняется водами рек Таз и Пур, что приводит к формированию квазистационарного течения, направленного в сторону устья залива и вод Карского моря.

В рамках данной работы были выбраны два региона относительно порта Сабетта: северный район интенсивного судоходного подхода к порту и восточный, подверженный менее интенсивным волновым процессам, но и менее загруженный с точки зрения морского судоходства из-за удаленности от портовой инфраструктуры. Предполагалось, что источники сформировались в атмосфере к северо-востоку от порта с выбросом загрязняющего материала в сторону каждого из этих регионов в зимний и летний периоды (рис. 1).

Каждый из источников представлял собой залповы́й выброс в атмосферу радионуклидов ^{137}Cs суммарной активностью $\sim 10^{17}$ Бк.

Пространственное распределение выброса при его распространении в атмосфере рассчитывалось с помощью разработанного в ИБРАЭ РАН программного средства ПАРРАД [17], основанного на пакете НОСТРАДАМУС [18] с использованием модели

Научные исследования в Арктике

прогноза состояния окружающей среды WRF-ARW [19]. Радионуклиды в течении 2–3 ч осаждались на поверхность залива, формируя шлейф загрязнения в одном из описанных выше направлений. Эти шлейфы служили исходными данными для расчетов распространения загрязнений в воде.

В такой постановке частицы загрязняющего материала можно считать безмассовыми и полностью растворенными в воде. В данной версии модели не рассматривались процессы перехода растворенных частиц загрязнения в иные аллотропные формы, их коагуляция, сорбция и т. п.

Для учета эффектов прилипания растворенного вещества в придонном слое пороговая скорость движения в нем и его толщина принимались равными 0,05 м/с и 0,2 м соответственно. Такие параметры моделирования были выбраны из предположения, что лагранжева частица (ЛЧ), попадая в придонный слой, будет сохранять свои свойства пассивности и безмассовости. Скорость порядка 0,05 м/с соответствует подъемной силе, которая действует на малый илистый объект с плотностью порядка 1100–1500 кг/м³. Высота придонного слоя 0,2 м была выбрана из соображения, что в районе речных стоков высота илистых отложений должна быть небольшой относительно известных значений для российских водохранилищ — 0,5–1 м.

Начальное расположение лагранжевых частиц

Начальное расположение ЛЧ определялось в соответствии с плотностью активности моделируемых источников загрязнения. Исходные данные об этих источниках представляли собой таблицы плотности активности радионуклидов A_{ij} (Бк/м³) в виртуальной ячейке заданных размеров (высота плоского источника принималась равной 1 м) и географического положения. Для получения поля распределения частиц в совместной лагранжево-эйлеровой модели была выполнена конвертация данных по активности радионуклидов в концентрацию частиц в ячейке по формуле

$$N_{ij} = \left[N \frac{V_{ij} A_{ij}}{\sum_{ij} V_{ij} A_{ij}} \right], \quad (1)$$

где i, j — индексы ячейки исходной модели; V_{ij} — объем этой ячейки; N — общее количество лагран-

жевых частиц, генерируемых в данном источнике; N_{ij} — количество частиц в соответствующей виртуальной ячейке исходной модели.

Величина $\sum_{ij} V_{ij} A_{ij}$ представляет собой суммарную активность радионуклидов, осевших на поверхность акватории от рассматриваемого источника. Для каждого из них общее количество частиц N принималось равным 10^6 , а начальные координаты выбирались случайным образом в пределах соответствующей ячейки.

Величины N_{ij} должны быть целочисленными, так что значения, полученные по формуле (1), округляются. После округления количество частиц в каждом источнике несколько отличается от 10^6 , как это показано в табл. 1.

Таким образом, в расчетах были заданы четыре облака частиц, соответствующих четырем источникам загрязнения:

C_1 — выброс к востоку от порта Сабетта, сформированный 9 июня;

C_2 — выброс к северу от порта Сабетта, сформированный 9 июня;

C_3 — выброс к востоку от порта Сабетта, сформированный 10 февраля;

C_4 — выброс к северу от порта Сабетта, сформированный 10 февраля.

Здесь и далее все даты относятся к модельному времени, не привязанному к конкретным календарным датам.

Результаты численных расчетов

Режимы движения ЛЧ

Каждая ЛЧ в фиксированный момент времени находится в одном из трех режимов движения:

- свободное плавание в соответствии с параметрами течения в точке нахождения ЛЧ;
- движение во льду в соответствии с параметрами движения фрагмента льда, в котором находится ЛЧ;
- движение или останов в придонном слое, где ЛЧ может передвигаться только в горизонтальном направлении при скорости придонного течения, превышающей установленный порог 0,05 м/с.

Любая ЛЧ может изменять режим движения неограниченное количество раз в зависимости от географического положения и параметров среды (скорость течения, температура, соленость) в месте

Таблица 1. Радиационные параметры источников

Table 1. Source radiation parameters

Источник	Активность, ПБк	Количество ЛЧ	Активность одной ЛЧ, ТБк
Лето восток	17,8493	999 996	17,849
Лето север	55,598	999 960	55,600
Зима восток	27,4	999 995	27,400
Зима север	21,424	999 885	21,426

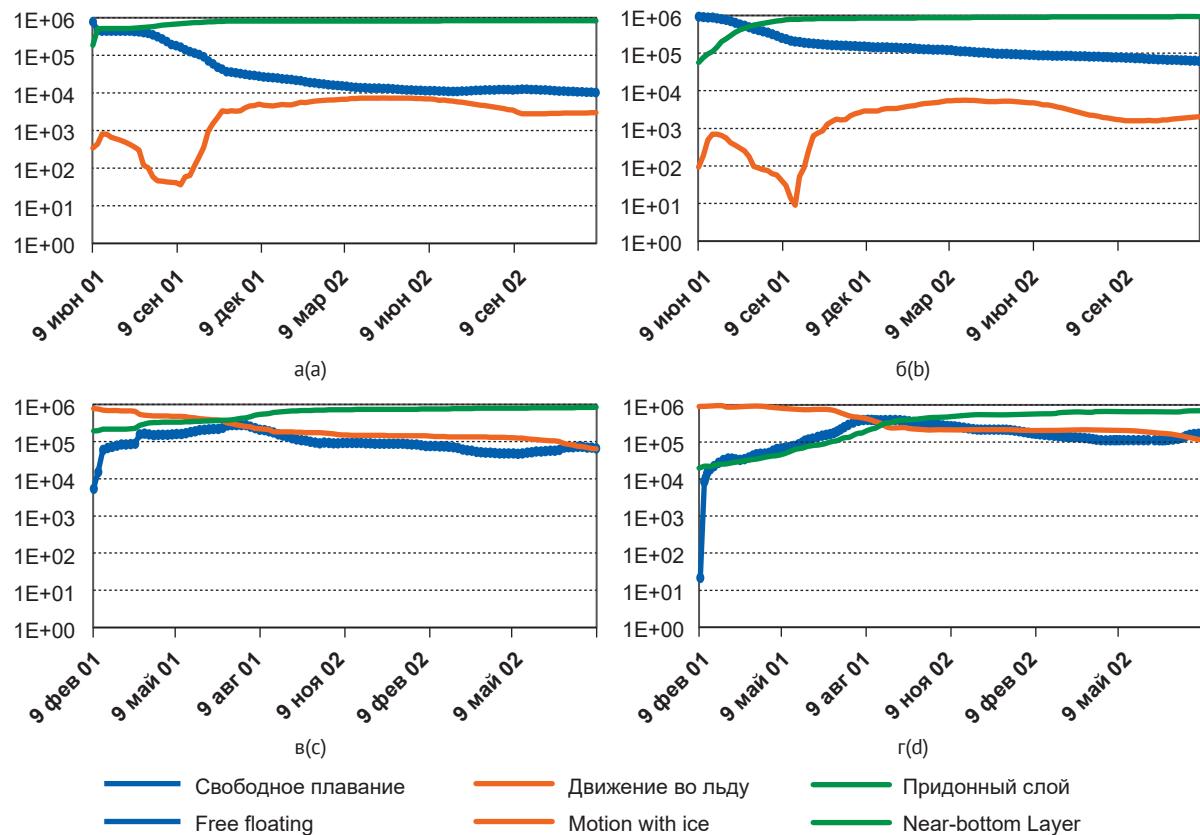


Рис. 2. Распределение ЛЧ по режимам движения за 18 месяцев с момента формирования от источника C_1 (а), C_2 (б), C_3 (в), C_4 (г).

Источник: расчеты авторов

Fig. 2. Lagrange particle (LP) distribution with respect to motion mode for 18 months from deposition for the sources C_1 (a), C_2 (b), C_3 (c), C_4 (d). Origin: authors' calculations

нахождения ЛЧ. Эти изменения происходят в результате следующих процессов:

- таяние фрагмента льда, в котором находится ЛЧ, в результате чего она поступает в воду и продолжает движение в режиме свободного плавания;
- вмерзание ЛЧ в лед и продолжение движения во льду;
- попадание в придонный слой, где ЛЧ останавливается до появления превышающего порог горизонтального течения.

Распределение ЛЧ по режимам движения зависит от источника и от времени, прошедшего с формирования выброса, как это показано на рис. 2.

Режим свободного плавания

В первый день формирования 9 июня 01 г. «летние» источники C_1 и C_2 в основном состоят из свободно плавающих ЛЧ: 77% и 94% для источников C_1 и C_2 соответственно, в придонный слой быстро попадают 18,5% (C_1) и 5,6% (C_2). И лишь менее 1% ЛЧ начинают движение в остаточном льду.

Распространение свободно плавающих ЛЧ по акватории определяется течениями, т. е. распределением ЛЧ по скоростям. В табл. 2 и 3 представлены основные параметры этих распределений для «лет-

них» источников, нескольких моментов времени после начала моделирования и разных слоев глубины. При этом для каждого источника приведены параметры распределений для двух приповерхностных слоев и двух глубинных слоев; данные в таблицах приводятся только для тех слоев глубины, где находится не менее 0,1% осевших радионуклидов, т. е. не менее 1000 ЛЧ. При меньшем количестве частиц в слое параметры распределений будут недостаточно статистически обеспеченными.

На распространение ЛЧ от «летних» источников влияет течение, сформированное реками залива (выносное течение).

Основная часть пятна загрязнения, созданного источником C_1 , пришла на воды Обской губы. Пятно загрязнения обогнуло северный берег полуострова Ямал и продолжило распространение в акваторию Обской губы.

Выносное течение способствовало движению загрязняющего пятна, созданного источником C_2 , вдоль западного побережья залива и выносу ЛЧ в Карское море так, что пятно не проникло в акваторию Обской губы (рис. 3). В результате восточный берег залива остался свободным от загрязнения. Из рис. 3 видно, что в течение месяца пятно сместилось

Научные исследования в Арктике

Таблица 2. Параметры распределения ЛЧ по скорости V свободного плавания (км/сут) для источника C_1 (лето, восток)

Table 2. Parameters of the LP distribution with respect to free floating speed V (km/day) for the source C_1 (summer, east)

Глубина	\tilde{V}	V_{Me}	V_{min}	V_{max}	σ
9 июня 01 г.					
Слой 0—6 м	1,24E+00	1,15E+00	3,66E-03	2,50E+00	3,52E-01
Слой 6—12 м	1,16E+00	1,12E+00	3,61E-03	2,45E+00	3,73E-01
7 октября 01 г.					
Слой 0—6 м	6,17E+00	7,15E+00	3,67E-03	1,59E+01	3,67E+00
Слой 6—12 м	4,13E+00	3,17E+00	0,00E+00	1,64E+01	4,20E+00
Слой 12—20 м	7,45E+00	1,01E+01	0,00E+00	1,54E+01	5,27E+00
5 января 02 г.					
Слой 0—6 м	1,13E+00	1,10E+00	0,00E+00	4,46E+00	5,63E-01
Слой 6—12 м	1,29E+00	1,25E+00	0,00E+00	6,30E+00	7,41E-01
9 июня 02 г.					
Слой 0—6 м	3,91E-01	5,69E-02	5,49E-03	7,07E+00	9,92E-01
Слой 6—12 м	2,18E-01	5,31E-02	1,26E-02	9,44E+00	7,09E-01
Слой 12—20 м	2,62E+00	2,11E+00	1,91E-01	9,65E+00	1,54E+00

Примечание. В табл. 2, 3 и далее \tilde{V} — среднее значение, V_{Me} — медиана, V_{min} и V_{max} — минимум и максимум соответственно, σ — стандартное отклонение.

Note. In Tables 2, 3 and hereafter, \tilde{V} is the average value, V_{Me} is the median, V_{min} and V_{max} are the minimum and maximum, respectively, σ is the standard deviation.

Таблица 3. Параметры распределения ЛЧ по скорости V свободного плавания (км/сут) для источника C_2 (лето, север)

Table 3. Parameters of LP distribution with respect to free floating speed V (km/day) for the source C_2 (summer, north)

Глубина	\tilde{V}	V_{Me}	V_{min}	V_{max}	σ
9 июня 01 г.					
Слой 0—6 м	1,26E+00	1,14E+00	6,74E-03	3,22E+00	6,71E-01
Слой 6—12 м	1,28E+00	1,19E+00	2,34E-02	6,79E+00	6,59E-01
7 октября 01 г.					
Слой 0—6 м	4,03E+00	3,81E+00	0,00E+00	1,78E+01	1,79E+00
Слой 6—12 м	4,94E+00	4,62E+00	0,00E+00	1,72E+01	2,31E+00
5 января 02 г.					
Слой 0—6 м	1,78E+00	1,45E+00	3,70E-02	1,76E+01	1,50E+00
Слой 6—12 м	1,32E+00	1,08E+00	9,72E-04	1,85E+01	1,07E+00
9 июня 02 г.					
Слой 0—6 м	2,24E+00	1,80E+00	3,63E-04	1,21E+01	1,74E+00
Слой 6—12 м	2,33E+00	1,86E+00	9,33E-03	8,79E+00	1,76E+00

в северном и северо-восточном направлениях. При этом основная часть загрязнения перемещалась из приповерхностных горизонтов в более глубокие слои акватории (см. рис. 3а—3е и 3ж—3м).

Такое перемещение повлияло на переход ЛЧ в морской лед при наступлении зимнего периода. Захват ЛЧ морским льдом происходит лишь в приповерхностном слое, а в период интенсивного льдообразования заметная часть ЛЧ уже опустилась в глубину. Поэтому попадание ЛЧ в лед хотя и происходит, но в незначительных количествах: число вмерзших в лед ЛЧ «летних» источников не превышает 0,15% общего количества осевших на акваторию частиц.

При дальнейшем распространении загрязнения пятно от C_2 расширяется также и в западном направлении в сторону южной оконечности архипелага Новая Земля, частично огибая его с севера (рис. 3н—3ц). Продолжается также смещение загрязнения на восток в сторону архипелага Северная Земля.

Движение во льду

В первый день формирования «зимних» источников C_3 и C_4 большая часть осевших на поверхность акватории ЛЧ находится в режиме движения во льду: 77% и 98% ЛЧ от источников C_3 и C_4 соответственно (см. рис. 2в и 2г); 20% (C_3) и 2,2% (C_4) ЛЧ быстро попадают в придонный слой, и лишь 0,6% (C_3) и 0,002% (C_4) начинают движение в режиме свободного плавания.

Скорости ЛЧ в режиме движения во льду в процессе распространения загрязнения в акватории определяются скоростью движения льда. Поскольку сплошность льда в рассматриваемом районе почти нигде не достигает 100%, скорости вморооженных в лед ЛЧ будут зависеть от их географических координат. Параметры распределения этих ЛЧ по скоростям представлены в табл. 4 и 5. Заметим, что движение во льду возможно только

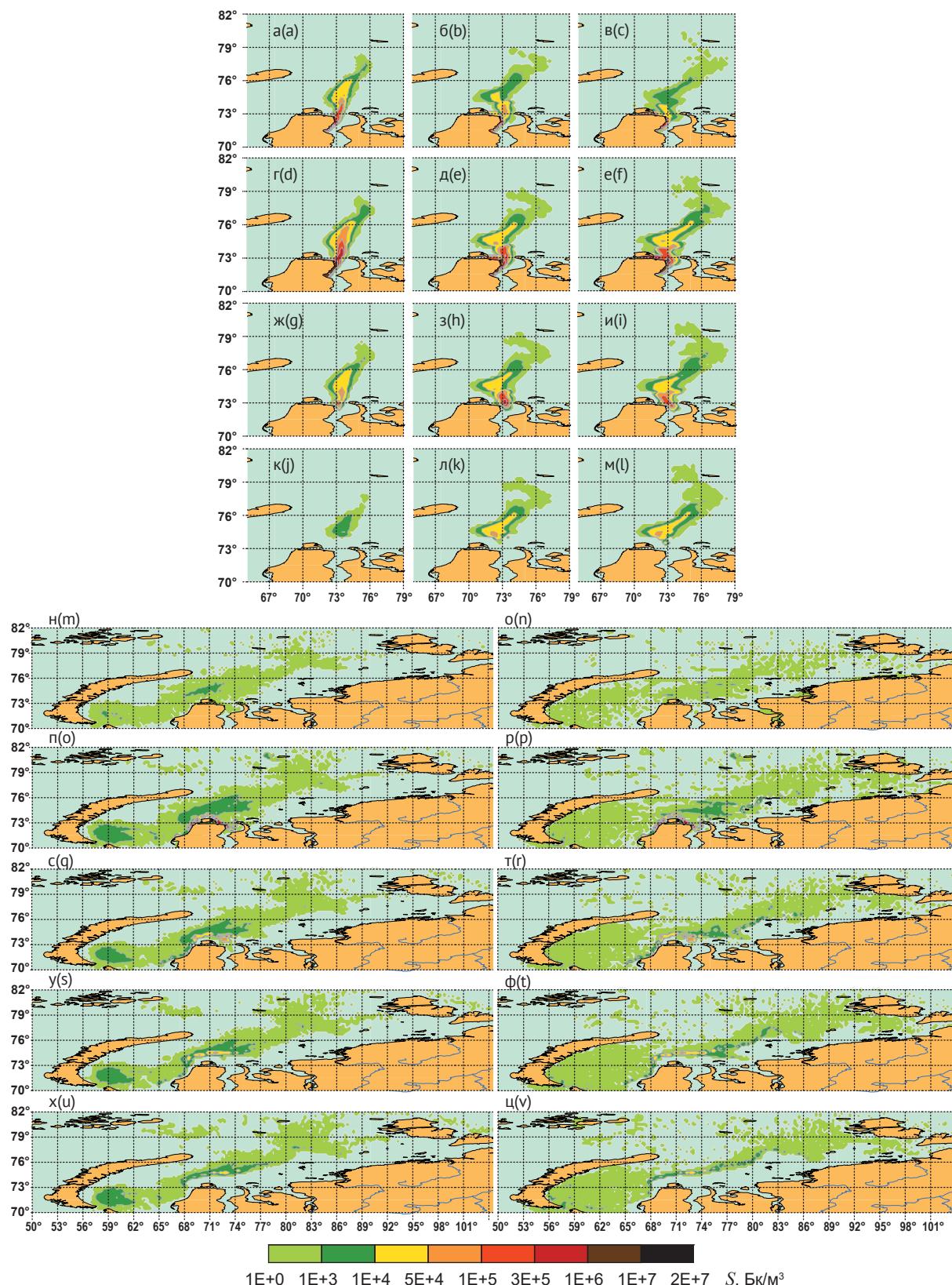


Рис. 3. Плотность концентрации ^{137}Cs от источника C_2 в момент осаждения 9 июня 01 г. (а, ж, к), через 2 недели (б, д, з, л), через месяц (в, е, и, м), через 4 месяца (н, п, с, у, х), через год (о, р, т, ф, ц) в слоях 0-6 м (а-в, н-о), 6-12 м (г-е, п-р); 12-20 м (ж-и, с-т); 20-30 м (к-м, у-ф); 30-40 м (х-ц). Источник: расчеты авторов

Fig. 3. ^{137}Cs concentration density from the C_2 source at the June 9, 01 (a, ж, к), upon 2 weeks (б, д, з, л), 1 month (в, е, и, м), 4 months (н, о, с, у, х), 1 year (п, р, т, ф, ц) at the depth layers 0-6 m (а-в, н-о); 6-12 m (г-е, п-р); 12-20 m (ж-и, с-т); 20-30 m (к-м, у-ф); 30-40 m (х-ц). Origin: authors' calculations

Таблица 4. Параметры распределения ЛЧ по скорости V движения во льду (км/сут) для источника C_3 (зима, восток)

Table 4. Parameters of the LP distribution with respect to frozen motion speed V (km/day) for the source C_3 (winter, east)

Глубина	\tilde{V}	V_{Me}	V_{min}	V_{max}	σ
10 февраля 01 г.					
Слой 0—6 м	8,82E-02	7,82E-02	1,82E-02	2,31E-01	4,90E-02
12 марта 01 г.					
Слой 0—6 м	4,14E+00	4,06E+00	1,70E-02	5,63E+00	8,96E-01
Слой 6—12 м	3,80E+00	3,68E+00	6,36E-03	5,69E+00	1,12E+00
10 июня 01 г.					
Слой 0—6 м	1,15E+00	1,08E+00	4,12E-03	4,09E+00	5,65E-01
Слой 6—12 м	1,06E+00	9,93E-01	0,00E+00	4,23E+00	5,83E-01
8 сентября 01 г.					
Слой 0—6 м	4,92E+00	5,12E+00	7,73E-02	8,46E+00	1,21E+00
Слой 6—12 м	5,78E+00	6,30E+00	0,00E+00	1,18E+01	2,28E+00
10 февраля 02 г.					
Слой 0—6 м	2,38E+00	1,86E+00	1,80E-01	8,10E+00	1,73E+00
Слой 6—12 м	2,40E+00	1,87E+00	2,08E-02	9,87E+00	1,76E+00

Таблица 5. Параметры распределения ЛЧ по скорости V движения во льду (км/сут) для источника C_4 (зима, север)

Table 5. Parameters of LP distribution with respect to frozen motion speed V (km/day) for the source C_4 (winter, north)

Глубина	\tilde{V}	V_{Me}	V_{min}	V_{max}	σ
15 февраля 01 г.					
Слой 0—6 м	1,22E+00	1,13E+00	4,77E-02	6,60E+00	8,54E-01
Слой 6—12 м	1,46E+00	1,27E+00	1,22E-02	7,03E+00	1,06E+00
12 марта 01 г.					
Слой 0—6 м	6,63E+00	6,69E+00	6,44E-01	1,33E+01	1,91E+00
Слой 6—12 м	7,04E+00	7,18E+00	1,72E+00	1,69E+01	2,13E+00
10 июня 01 г.					
Слой 0—6 м	1,84E+00	1,64E+00	6,36E-04	6,55E+00	1,03E+00
Слой 6—12 м	1,89E+00	1,78E+00	0,00E+00	7,52E+00	1,05E+00
8 сентября 01 г.					
Слой 0—6 м	2,33E+00	1,69E+00	2,72E-02	1,20E+01	2,06E+00
Слой 6—12 м	2,16E+00	1,26E+00	1,41E-02	1,27E+01	2,14E+00
10 февраля 02 г.					
Слой 0—6 м	1,77E+00	1,18E+00	1,86E-02	7,87E+00	1,49E+00
Слой 6—12 м	1,69E+00	1,18E+00	4,29E-02	8,05E+00	1,41E+00

Примечание. В начальный день распространения ЛЧ этого источника частицы неподвижны.

Note. On the initial day of the LP propagation of this source, the particles are motionless.

в двух приповерхностных слоях глубины.

Из двух «зимних» источников больший интерес представляет источник C_4 , сформированный выбросом радионуклидов в северном направлении. Исходное пятно загрязнения при этом покрывает большую площадь в Карском море (см. рис. 2в).

Как уже упоминалось, сплошность льда в рассматриваемой акватории не достигает 100%, поэтому часть осажденного загрязнения находилась в режиме свободного движения уже в первую неделю моделирования. На рис. 4 сравниваются пятна загрязнения от источника C_4 , сформированные ЛЧ, вмерзшими в лед и свободно плавающими.

Из рис. 4 видно, что если в начальный период распространения загрязнения формы пятен схожи между собой, а их контуры близки к начальной форме пятна осаждения, то позднее пятно загрязнения льда лучше сохраняет исходную форму. Иначе говоря, вмерзшие в лед ЛЧ в большей степени сохраняют совместное движение, хотя тающий лед уже сильно фрагментирован.

Особенностью переноса радионуклидов морским льдом является длительное сохранение ЛЧ в «замороженном» состоянии. Это отмечалось и в предшествующей работе авторов [20], где в том числе исследовался перенос ЛЧ в Баренцевом море. На рис. 5 показаны аналогичные распределения числа ЛЧ по длительности пребывания во льду и полной длине дрейфа во льду, полученные в данной работе.

Накопление радионуклидов в придонном слое

Границные условия течения на дне в модели ИВМИО исключают вертикальное перемешивание жидкости: коэффициенты турбулентной диффузии обнуляются. Поэтому ЛЧ, попавшие в придонный слой, могут двигаться только в горизонтальном направлении, причем отрыв от дна может происходить при скорости течения, превышаю-

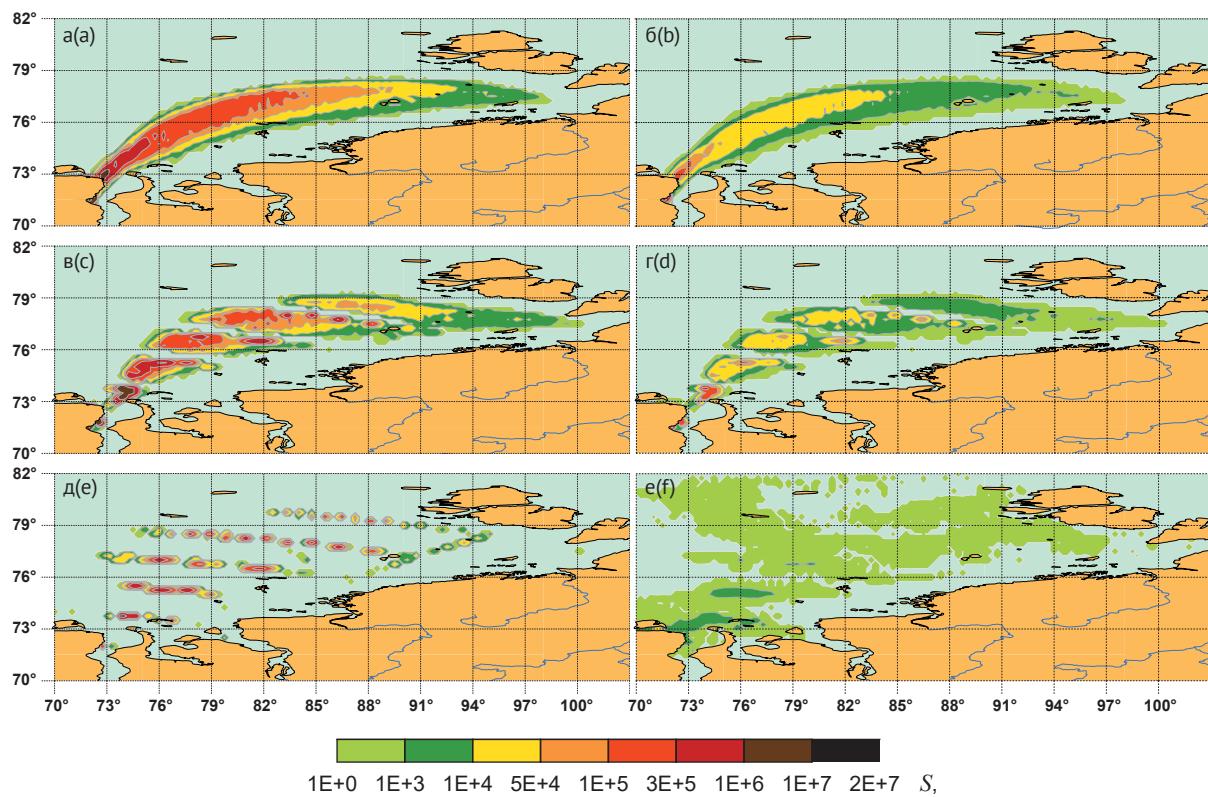


Рис. 4. Плотность концентрации ^{137}Cs от источника C_4 в приповерхностном слое 0–6 м в момент осаждения 10 февраля 01 г. (а, б); через 2 недели (в, г); через месяц (д, е); через 7 месяцев (д, е), сформированная ЛЧ, вмерзшими в лед (а, в, д) и свободно плавающими (б, г, е). Источник: расчеты авторов

Fig. 4. ^{137}Cs concentration density from the C_4 source at the surface level 0–6 m at the February 10, 01 (a, b); upon 2 weeks (c, d); upon 7 months (e, f), formed by the frozen LP (a, c, e) and free floating LP (b, d, f). Origin: authors' calculations

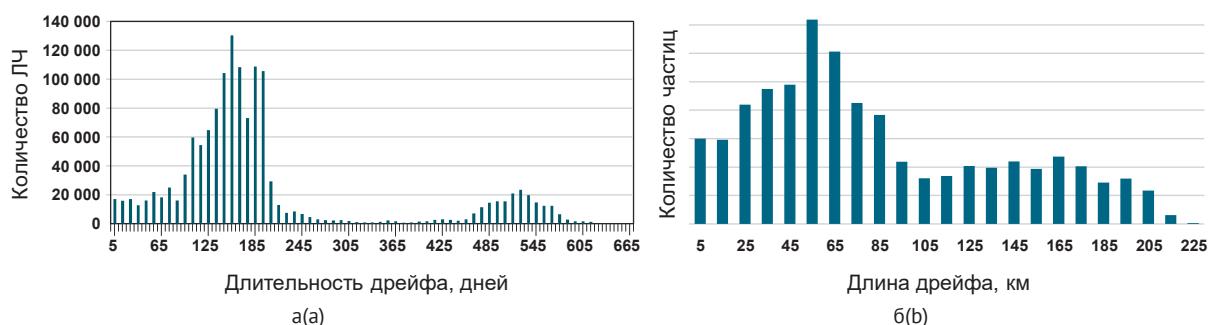


Рис. 5. Распределения числа ЛЧ по длительности пребывания ЛЧ во льду (а) и длине дрейфа в замороженном состоянии (б). Источник: вычисления авторов

Fig. 5. Distributions of the LP with respect to duration of stay (a) and drift length (b) in the frozen state. Origin: authors' calculations

щей установленный в данном исследовании порог в 0,05 м/с. Результаты численных расчетов показали, что такие условия в рассматриваемой акватории не возникали.

Поэтому происходит постоянное накопление ЛЧ в придонном слое. Это накопление проиллюстрировано следующим рис. 6, где показаны плотности концентрации ^{137}Cs в придонном слое для разных диапазонов глубины дна и достаточно длительного периода накопления.

Мы не рассматривали в этой работе проблемы моделирования движения ЛЧ на прибрежном мелководье, где необходимо разработать более детальную модель взаимодействия океана с береговой полосой.

Выводы

В работе представлена модель для прогнозирования распространения радионуклидов от различных источников в Северном Ледовитом океане в рамках

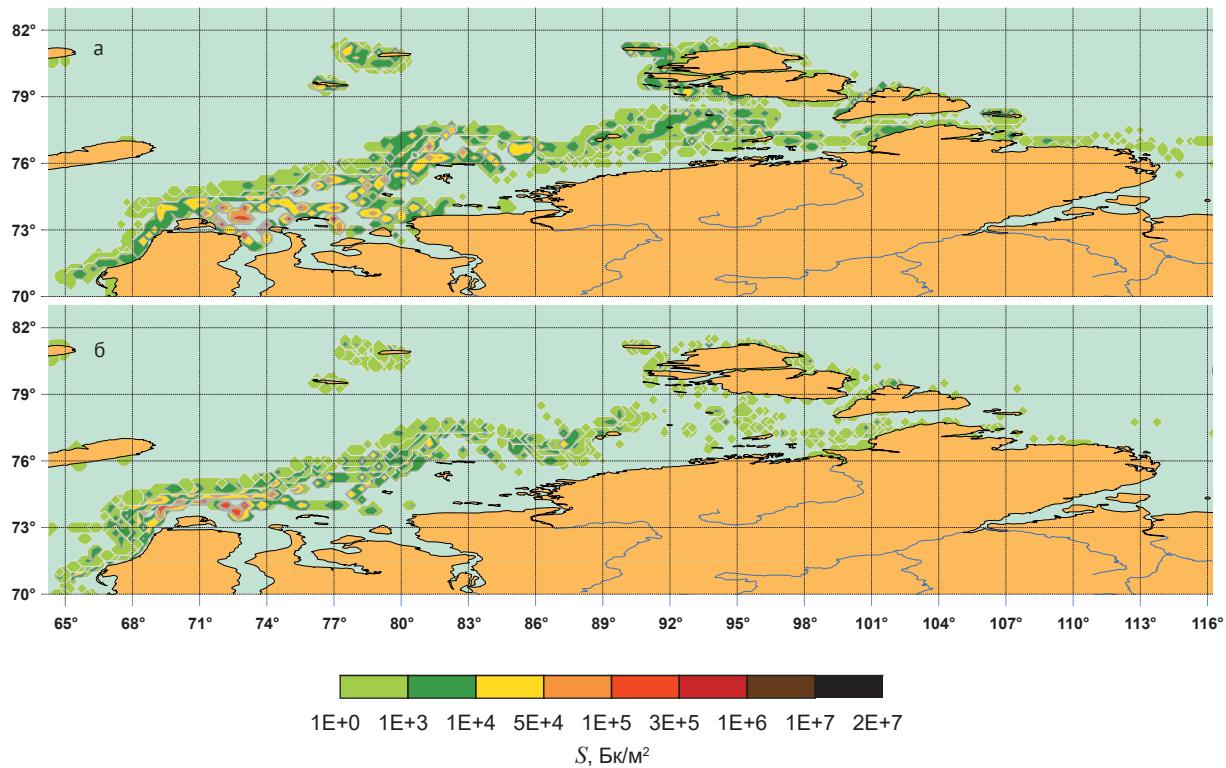


Рис. 6. Накопление ЛЧ в придонном слое от источника C_4 в период 10 февраля 01 г. до 10 февраля 02 г. на глубинах 20–50 м (а) и от источника C_2 в период от 9 июня 01 г. до 12 марта 02 г. на глубинах от 30–70 м (б)

Fig. 6. Accumulation of LP from the source C_4 during the period from February 10, 01 till February 10, 02 (a) and from the source C_2 , during the period from June 9, 01 till March 10, 02 at the depth levels 30–70 m (b)

совместной лагранжево-эйлеровой модели. Были промоделированы четыре сценария с осаждением радионуклидов из атмосферы на поверхность воды и/или льда в заливе Обская губа в районе порта Сабетта с выбросом загрязняющего материала на север, в сторону основной части акватории Карского моря, и на восток, в направлении Гыданского полуострова.

Согласно полученным результатам расчетов динамика распространения загрязнения сильно зависит от формы выброса и времени его формирования. Если источник полностью расположен в водах залива вблизи порта Сабетта, то большая часть ЛЧ опустится на дно в процессе движения загрязнения вдоль берегов Обской губы, а оставшаяся часть, обогнув полуостров Ямал, будет вынесена в юго-западную акваторию Карского моря. При этом в связи с отсутствием сдвиговых течений в заливе ЛЧ будут в основном двигаться вдоль линий тока выносного течения. Таким образом, источник, сформированный непосредственно у порта, будет распространяться вдоль западного берега Обской губы. Если же выброс загрязнения сформировал шлейф от порта до восточного берега залива, то стоит ожидать распространения пятна по всей ширине акватории Обской губы севернее источника. Причем во всех рас-

сматриваемых случаях большая часть загрязнения остается в акватории Карского моря.

Анализ результатов показывает существенно различный характер переноса радионуклидов по акватории Обской губы и Карского моря в зависимости от месяца возникновения аварии. В случае летней аварии через 4 месяца только 20% исходного количества радионуклидов остается в толще воды и продолжает переноситься течениями (рис. 3), 80% радионуклидов осаждается в придонный слой. В случае выброса радионуклидов к северу от порта Сабетта с распространением шлейфа в Карском море загрязнение остается заметным более чем через год после выброса, что обусловлено большей глубиной открытого моря по сравнению с глубиной Обской губы.

В зимний период в отличие от лета радионуклиды осаждаются на поверхность морского льда и далее переносятся им. По мере таяния льдов часть радионуклидов попадает в воду (см. рис. 4). Заметная часть радионуклидов остается в еще не растаявших льдах, которые продолжают дрейфовать с осени до лета следующего года. Сезонный характер нахождения радионуклидов в морском льду, толще вод и соответственно выпадения в придонный слой прослеживаются на рис. 4—6.

По результатам исследования можно сделать вывод, что морской лед существенным образом влияет на перенос примеси, в частности радионуклидов, в арктических морях. Радионуклиды консервируются в морском льду на год и, возможно, на более длительные периоды, сохраняя тем самым память о прошедших экологических авариях. Попав в морскую воду, радионуклиды погружаются в придонный слой, и в случае неглубоких акваторий консервируются.

Перспективными направлениями дальнейших исследований могут быть:

- совершенствование модели динамики океана для детализации распространения загрязнения на мелководье;
- детализация взаимодействия загрязнения с придонным слоем и донными отложениями;
- уточнение поведения «замороженных» ЛЧ в толще льда.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 20-19-00615-П «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/References

1. План развития Северного морского пути на период до 2035 года. — Утв. распоряжением Правительства РФ от 1 августа 2022 г. № 2115 р. (In Russian). The Plan for the Development of the Northern Sea Route until 2035. Approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 01.08.2022 no. 2115 р. (In Russian).
2. Государственная программа Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации». — Утв. постановлением Правительства РФ от 30 марта 2021 г. № 484. State Program of the Russian Federation “Socio-economic Development of the Arctic Zone of the Russian Federation”. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation of March 30, 2021 no. 484. (In Russian).
3. Багдасарян А. А. Основные экологические проблемы Северного морского пути в перспективе его развития // Рос. Арктика. — 2020. — № 2 (9). — С. 17—29. Baghdasaryan A. A. Main Environmental Problems of the Northern Sea Route in Prospect of Its Development. Russian Arctic, 2020, no. 2 (9), pp. 17—29. (In Russian).
4. Назаров В., Краснов О., Медведева Л. Арктический нефтегазоносный шельф России на этапе смены мирового энергетического базиса // Энергет. политика. — 2021. — № 7 (161). — С. 70—85. Nazarov V., Krasnov O., Medvedeva L. The Arctic Oil and Gas Shelf of Russia at the Stage of the World Energy Base Change. Energy Policy, 2021, no. 7 (161), pp. 70—85. (In Russian).
5. Хвостова М. С. Экологические проблемы эксплуатации плавучей теплоэлектростанции в Арктическом регионе // Рос. Арктика. — 2018. — № 1. — С. 12. Khvostova M. S. Environmental Problems of Operating a Floating Thermal Power Plant in the Arctic Region. Russian Arctic, 2018, no. 1, p. 12. (In Russian).
6. Антипov С. В., Билашенко 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. Antipov S. V., Bilashenko V. P., Vysotskii V. L., Kalantarov V. E., Kobrinskii M. N., Sarkisov A. A., Sotnikov V. A., Shvedov P. A., Ibraev R. A., Sarkisyan A. S. 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, December, 2015, pp. 132—141.
7. van Sebille E., Griffies S. M., Abernathey R. et al. Lagrangian ocean analysis: Fundamentals and practices. Ocean Modelling, 2018, vol. 121, pp. 49—75.
8. Bertino L., Liseter K. A. The TOPAZ monitoring and prediction system for the Atlantic and Arctic Oceans. J. Operat. Oceanogr., 2008, 1 (2), pp. 15—19.
9. Campin J.-M., Marshall J., Ferreira D. Sea ice–ocean coupling using a rescaled vertical coordinate z^* . Ocean Modelling, 2008, 24, pp. 1—14.
10. Warner J. C., Armstrong B., He R., Zambon J. B. Development of a Coupled Ocean–Atmosphere–Wave–Sediment Transport (COAWST) Modeling System. Ocean Modelling, 2010, vol. 35, pp. 230—244.
11. Ушаков К. В., Ибраев Р. А., Калмыков В. В. Воспроизведение климата мирового океана с помощью массивно-параллельной численной модели // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2015. — Т. 51, № 4. — С. 416—436. Ushakov K. V., Ibrayev R. A., Kalmykov V. V. Simulation of the World Ocean Climate with a Massively Parallel Numerical Model. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics, 2015, vol. 51, no. 4, pp. 362—380.
12. 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, 11, pp. 3983—3997.
13. 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. Физика атмосферы и океана. — 2020. — Т. 56, № 5. — С. 598—610. Kalnitskii L. Yu., Kaurkin M. N., Ushakov K. V., Ibrayev R. A. Seasonal Variability of Water and Sea-Ice Circulation in

Научные исследования в Арктике

- 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.
14. Кулаков М. Ю., Макштас А. П., Шутилин С. В. AARI-IOCМ — совместная модель циркуляции вод и льдов Северного Ледовитого океана // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2012. — № 2 (92). — С. 6—18.
- Kulakov M. Yu., Makshtas A. P., Shutilin S. V. AARI-IOCМ — a mixed model of water and ice circulation in the Arctic Ocean. *Problems of the Arctic and Antarctic*, 2012, no. 2 (92), pp. 6—18. (In Russian).
15. Nakano H., Motoi T., Hirose K., Aoya M. Analysis of ¹³⁷Cs concentration in the Pacific using a Lagrangian approach. *J. of Geophysical Research*, 2010, vol. 115, pp. 1—15.
16. Heldal H. E., Vikebø F., Johansen G. O. Dispersal of the radionuclide Caesium-137 (Cs^{137}) from point sources in the Barents and Norwegian Seas and its potential contamination of the Arctic marine food chain: Coupling numerical ocean models with geographical fish distribution data. *Environmental Pollution*, 2013, vol. 180, pp. 190—198.
17. Арутюнян Р. В., Припачкин Д. А., Семенов В. Н. и др. Описание системы «Прогнозирования аварийного распространения радионуклидов в атмосфере для действующих российских АЭС (ПАРРАД)». Технология и функционирование: Препринт ИБРАЭ № 2016-02. — М.: ИБРАЭ РАН, 2016. — 42 с.
- Arutyunyan R. V., Pripaczhkin D. A., Semenov V. N. et al. Description of the System for “Predicting the Emergency Spread of Radionuclides in the Atmosphere for Operating Russian NPPs (PARRAD)”. Technology and Operation. IBRAE Preprint no. 2016-02. Moscow, IBRAE RAN, 2016, 42 p. (In Russian).
18. Беликов В. В., Головизнин В. М., Катышков Ю. В. и др. НОСТРАДАМУС — компьютерная система про-
- гнозирования радиационной обстановки. Верификация модели атмосферного переноса примеси // Моделирование распространения радионуклидов в окружающей среде. — М.: Наука, 2008. — С. 41—103. — (Тр. ИБРАЭ РАН. — Вып. 9).
- Belikov V. V., Goloviznin V. M., Katyshkov Yu. V., Semenov V. N., Starodubtseva L. P., Sorokovikova O. S., Fokin A. L. NOSTRADAMUS — a software package for forecasting the radiation situation. Verification of the impurity atmospheric transfer model. Modeling of the Spread of Radionuclides in the Environment. Moscow, Science, 2008, pp. 41—103. (Proceedings of IBRAE, iss. 9). (In Russian).
19. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J. G., Duda M. G., Barker D. M., Huang X.-Y. A Description of the Advanced Research WRF Version 4. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR. [S. l.], 2019, 145 pp. DOI: 10.5065/1dfh-6p97.
20. 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.
- Sarkisov A. A., Antipov S. V., Bilashenko V. P., Vysotsky V. L., Dzama D. V., Kobrinskiy M. N., Pripaczhkin 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 hypothetic accident to minimize radioecological consequences. *Arctic: Ecology and Economy*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 313—326. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-313-326. (In Russian).

Информация об авторах

Антипов Сергей Викторович, доктор технических наук, заведующий отделом, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: santipov@ibrae.ac.ru.

Ибраев Рашид Ахметзиевич, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 8); руководитель группы, главный научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский просп., д. 36).

Кальницкий Леонид Юрьевич, научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский просп., д. 36).

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

Сёмин Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук, инженер, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Большая Тульская ул., д. 52); научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский просп., д. 36).

FORECAST OF RADIONUCLIDE TRANSFER IN THE KARA SEA IN RESULT OF A RADIATION ACCIDENT NEAR THE PORT OF SABETTA

Antipov, S. V.¹, Ibrayev, R. A.^{2,3}, Kalnitsky, L. Yu.², Kobrinsky, M. N.¹, Semin, S. V.^{1,3}

¹ Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

² Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

³ Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

The article was received on December 11, 2024

For citing

Antipov S. V., Ibrayev R. A., Kalnitsky L. Yu., Kobrinsky M. N., Semin S. V. Forecast of radionuclide transfer in the Kara Sea in result of a radiation accident near the port of Sabetta. Arctic: Ecology and Economy, 2025, vol. 15, no. 4, pp. 495—507. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-4-495-507. (In Russian).

Abstract

Using the Lagrangian-Eulerian model of ocean-sea ice dynamics and the transfer of Lagrangian particles, the spread of radionuclides in the waters of the Gulf of Ob and the Kara Sea is predicted. Rapid, within ~2-7 days, transfer of radionuclides by the atmosphere from the source near the port of Sabetta and their deposition on the water area surface is assumed. Scenarios of a radiation accident in summer and winter seasons are considered, with various positions of the accident site and atmospheric transfer. Based on the results of the study, it might be concluded that sea ice significantly affects the transfer of radionuclides in the Arctic seas. Radionuclides might stay preserved in sea ice for a year and more, thereby preserving the memory of past radiation accidents. Once in sea water, radionuclides drop down towards bottom, and in the case of shallow waters, they reach the bottom layer after several months and stay at the bottom layer. However, once frozen into sea ice, radionuclides can travel over significant distances during several years.

Keywords: *Lagrangian transfer, radioactive contamination, port of Sabetta, Lagrangian-Eulerian model, ocean dynamics model, ice, ice – ocean model, Arctic Ocean, parallel computing.*

Information about the authors

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

Ibrayev, Rashit Akhmetzhevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences (36, Nakhimovsky Ave., Moscow, Russia, 117997); Group Head, Chief Researcher, Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences (building 8, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333).

Kalnitsky, Leonid Yurievich, Researcher, Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences (36, Nakhimovsky Ave., Moscow, Russia, 117997).

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

Semin, Sergey Vladimirovich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Engineer, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya St., Moscow, Russia, 115191); Researcher, Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences (36, Nakhimovsky Ave., Moscow, Russia, 117997).

© Antipov S. V., Ibrayev R. A., Kalnitsky L. Yu., Kobrinsky M. N., Semin S. V., 2025