

УДК 551.465

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В НОРВЕЖСКОМ МОРЕ ОТ ПРИДОННОГО ИСТОЧНИКА

© 2021 г. Н. А. Дианский^{a, b, c}, Е. Г. Морозов^{d, *}, В. В. Фомин^{b, c}, Д. И. Фрей^d

^aМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, стр. 2, Москва, 119991 Россия

^bГосударственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Кропоткинский пер., 6, Москва, 119034 Россия

^cИнститут вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, ул. Губкина, 8, Москва, 119333 Россия

^dИнститут океанологии им. П.П. Шириова РАН, Нахимовский просп., 36, Москва, 119997 Россия

*e-mail: egmorozov@mail.ru

Поступила в редакцию 28.09.2020 г.

После доработки 22.10.2020 г.

Принята к публикации 09.12.2020 г.

Для оценки радиационной угрозы от атомной подводной лодки (АПЛ) “Комсомолец”, лежащей на северо-восточном свале Норвежского моря на глубине 1680 м, в связи с возможным выходом радионуклидов из реакторного отсека в прилегающую морскую воду, выполнены расчеты распространения радиоактивного загрязнения (РЗ) цезием-137 (¹³⁷Cs) как пассивной примеси с помощью океанской модели INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model). Расчеты показали, что в придонном слое РЗ в основном распространяется вдоль свала глубин к северу и югу от источника. Такая изменчивость направления переноса РЗ вызвана изменчивостью придонных скоростей течений, которая хорошо подтверждается данными измерений. С удалением от источника концентрация РЗ существенно уменьшается вследствие разбавления окружающими водами. В толще моря концентрация на несколько порядков меньше, чем в источнике. Рассчитано поступление РЗ в поверхностные воды за счет турбулентного перемешивания и конвективных движений вод в сложной трехмерной структуре циркуляции Норвежского моря. Показано, что наблюдаемое в измерениях превышение поверхностной концентрации РЗ над придонной не может быть связано с выбросами от АПЛ “Комсомолец”. Приповерхностная концентрация РЗ с большой долей вероятности вызвана распространением РЗ от ядерных перерабатывающих предприятий в Северной Европе. В целом показано, что возможное на настоящий момент РЗ от АПЛ “Комсомолец” не превышает фоновый уровень радиоактивного загрязнения вод Норвежского моря.

Ключевые слова: вихреразрешающее моделирование, океанические течения, крупномасштабная циркуляция, Норвежское море, перенос загрязнений, придонный слой

DOI: 10.31857/S0002351521020048

1. ВВЕДЕНИЕ

Акватория Мирового океана интенсивно используется в различных аспектах хозяйственной деятельности человека, в том числе для транспортировки различных грузов и добычи углеводородов в шельфовых акваториях. Проблемы экологической безопасности приобретают особое значение для арктического региона благодаря трем фундаментальным факторам: прогрессивно возрастающей экономической роли Арктики, связанной с открытиями огромными запасами углеводородного сырья, ожидаемой в обозримой перспективе существенной интенсификации Северного морского пути, а также исключительной чувствительности природного ландшафта к антропогенным воздействиям [1].

Особое место в нарушении экологии морских вод занимает долгоживущее радиоактивное загряз-

нение. Остается нерешенной проблема ликвидации последствий от затонувших в Арктическом регионе атомных подводных лодок (АПЛ). Большое количество работ посвящено оценке последствий радиоактивного загрязнения морской среды при чрезвычайных ситуациях, которые могут возникнуть от затопленных АПЛ в результате длительного нахождения на дне арктических морей. Существует потенциальная опасность радиоактивного загрязнения от АПЛ “Комсомолец”. Эта проблема приобретает все большее значение, что связано с освоением Арктики и обеспечением ее экологической безопасности [2–5].

В настоящее время радиационная угроза может исходить от АПЛ “Комсомолец”, затонувшей в 1989 г. в Норвежском море, к юго-западу от острова Медвежий (73°43'16" N, 13°16'52" E) на глубине

1680 м в связи с выходом радионуклидов из реакторного отсека в прилегающую морскую воду [5]. Проблеме радиоактивных загрязнений от этой АПЛ посвящен ряд работ, основанных на данных мониторинга и радиоактивных замеров. Мониторинг, проводимый на постоянной основе норвежскими исследователями [6], обнаружил ^{134}Cs в поверхностных отложениях вокруг АПЛ “Комсомолец” в 1993 и 1994 гг. Повышенные концентрации ^{137}Cs в придонной морской воде были обнаружены в период с 1991 по 1993 гг.: 1991 г. ($30 \pm 5 \text{ Бк/м}^3$), 1992 г. ($21 \pm 5 \text{ Бк/м}^3$) и 1993 г. ($8 \pm 6 \text{ Бк/м}^3$) [7]. Возможно, они отражали начальный период более высоких выбросов от АПЛ “Комсомолец” сразу после ее затопления в 1989 г. С тех пор не наблюдалось повышенных концентраций активности радионуклидов, превышающих значения, характерные для Норвежского моря, в любых пробах окружающей среды, собранных норвежскими учеными при проведении мониторинга. Наблюдаемые отношения активности $^{238}\text{Pu}/^{239,24}\text{Pu}$ и $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ в донных отложениях, отобранных недалеко от АПЛ “Комсомолец” в 2013 г., не указывают на выброс изотопов Pu из реактора или боеголовок торпед. Скорее, эти значения отражают дистанционный перенос и осаждение этих изотопов Pu в результате разрешенных сбросов с ядерных перерабатывающих предприятий в Северной Европе [6].

Проведенные измерения концентрации антропогенного радионуклида ^{137}Cs в Норвежском и Баренцевом морях в 68 рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” (июнь–август 2017 г.) не выявили опасных уровней радиоактивных загрязнений от АПЛ “Комсомолец” [8]. Здесь также было показано, что поверхностные воды имеют больший уровень радиоактивной загрязненности, чем глубинные воды.

Таким образом, можно констатировать, что в настоящее время загрязнение от АПЛ “Комсомолец” не представляет особой опасности. Тем не менее, оценка вероятного распространения радиоактивного загрязнения вызывает интерес с точки зрения ее пространственного распределения, поскольку в случае непредвиденной ситуации гипотетического выброса вследствие какой-либо аварии или террористического акта пространственное распределение концентраций РЗ, вызванное особенностями циркуляции глубинных вод в районе АПЛ “Комсомолец”, будет тем же, но уровень существенно возрастет.

Для оценки радиационной угрозы от АПЛ “Комсомолец” в связи с выходом радионуклидов из реакторного отсека в прилегающую морскую воду в настоящей статье предлагается метод расчета распространения радиоактивного загрязне-

ния с помощью гидродинамического моделирования. Эта методика хорошо зарекомендовала себя в ряде работ [2–4], в том числе и проведенных при участии авторов данной статьи [9, 10]. Следует отметить, что АПЛ “Комсомолец” находится на большой глубине, что приводит к дополнительным трудностям восстановления придонной циркуляции, особенно для т. н. z-моделей [11]. Поэтому расчеты распространения загрязняющих веществ в глубинных водах Арктического бассейна представляют интерес и с этой точки зрения. Следует отметить и имеющийся у коллектива авторов опыт расчета глубинной циркуляции с помощью используемой здесь σ -модели INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model), полученный в работах по расчету течений в придонных разломах Атлантического океана и субарктического бассейна [12–15].

Выбор ^{137}Cs с периодом полураспада 30 лет в качестве в качестве трассера для моделирования и определяющего загрязняющего радионуклида связан с его радиоэкологической опасностью, нейтральной плавучестью и наибольшей миграционной способностью внутри объекта затопления и за его пределами [5]. Следует отметить, что выход ^{137}Cs в морскую воду может происходить через много лет после затопления радиоактивно опасного объекта, если его разрушение происходит медленно. В случае попадания радиоактивных веществ в океан, загрязнение морской среды может продолжаться длительное время, что превращает затопленный объект с ядерной энергетической установкой в постоянно действующий источник радиоактивного загрязнения окружающей среды.

В данной работе выполнены расчеты распространения ^{137}Cs как пассивной примеси от АПЛ “Комсомолец” для оценки угрозы возможного радиоактивного загрязнения в водах Норвежского моря. Как уже было сказано выше, вычислительный эксперимент, проводимый с помощью современных численных моделей гидротермодинамики океана, является перспективным методом, дающим информацию для оценки возможного ущерба экологии океана.

2. МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЙ

В уравнении переноса загрязнений, представленных в форме пассивной примеси, главную роль играют горизонтальные и вертикальная компоненты скоростей течений. Для расчета течений на пространственных масштабах моря необходимо иметь физически полную модель морской гидротермодинамики, прогностическими переменными в которой являются компоненты скорости течений, температура и соленость, уровень моря. Для

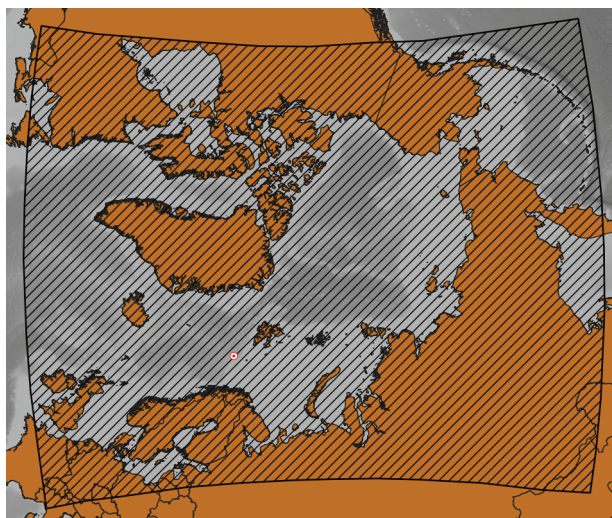


Рис. 1. Область расчета используемой здесь версии INMOM для Арктического региона (штриховка) с пространственным разрешением ~ 10 км. Расположение АПЛ “Комсомолец” показано “кругом” с точкой в центре.

правильного описания морской гидротермодинамики и ее взаимодействия с атмосферой необходимо также явное описание динамики и термодинамики морского льда. Всем этим требованиям удовлетворяет хорошо верифицированная σ -модель INMOM, разработанная в Институте вычислительной математики Российской академии наук (ИВМ РАН) [16, 17]. Версии модели общей циркуляции океана на основе INMOM уже около 20 лет используются в качестве океанического блока совместной модели земной системы INMCM (Institute of Numerical Mathematic Climate Model) [18]. Именно эта совместная модель является пока единственным представителем от России в международном проекте сравнения климатических моделей CMIP (Coupled Model Intercomparison Project, <http://cmip-pcmdi.llnl.gov>), который проводится под эгидой международной группы экспертов по изменению климата IPCC (МГЭИК). Модель INMOM уже неоднократно использовалась для изучения циркуляции вод Арктического бассейна, включая и Норвежское море [12, 13, 19].

Модель морской и океанической циркуляции INMOM относится к т. н. классу σ -моделей океана, использующих в качестве вертикальной изобатической σ -координату, отслеживающую изменение топографии морского дна [11]. При таком подходе удается более точно описывать динамику придонных течений, чем это можно сделать в т. н. z -моделях океана [11], использующих в качестве вертикальной обычную координату по глубине. Это свойство σ -модели INMOM является важным для целей настоящей работы.

В основе INMOM лежит полная система нелинейных уравнений гидротермодинамики океана,

записанных по горизонтали в обобщенных сферических координатах, полюса которых могут располагаться произвольным образом. Используются приближения гидростатики и Буссинеска [16, 17]. Прогностическими переменными модели служат горизонтальные компоненты вектора скорости течений, потенциальная температура, практическая соленость и отклонение уровня океана от невозмущенной поверхности. Уравнение состояния морской воды, специально предназначенное для моделей циркуляции океана [20], учитывает сжимаемость морской воды. Для корректного воспроизведения циркуляции Арктического бассейна в модели INMOM реализован блок расчета термодинамического нарастания/таяния льда и его динамики на основе [21], прогностическими переменными которой служат масса и сплоченность морского льда, масса снега, скорость дрейфа льда. Разностные аппроксимации исходных уравнений гидротермодинамики океана для численной реализации INMOM выписываются на разнесенной S -сетке по классификации Аракавы со вторым порядком точности по пространству.

В данной работе исследуется акватория Норвежского моря. Ввиду того что Норвежское море является незамкнутым бассейном, то для учета его водообмена с прилегающими морями на акватории Северного Ледовитого океана используется версия INMOM, реализованная для всей акватории Арктического бассейна в повернутой сферической системе координат, которая уже используется в системе оперативных расчетов циркуляции Арктического бассейна [22]. На рис. 1 показана ее область расчета с пространственным разрешением ~ 10 км.

Сеточная область в горизонтальной плоскости содержит 740×560 узлов. Шаг по пространству составляет ~ 10 км как по долготе, так и по широте. Квазиравномерное пространственное разрешение достигается путем поворота системы координат таким образом, что Арктический бассейн в модельной системе координат помещается на экватор. Топография дна, используемая в модели, строилась по данным GEBCO2019 (https://www.gebcoscientific.org/data_and_products) с исходным разрешением $0.25' \times 0.25'$. Эти данные высокого разрешения были сглажены для устранения особенностей, не описываемых на более грубой 10-км сетке модели, и только затем интерполированы на модельную область. По вертикали задано 33 неравномерно распределенных по глубине σ -уровня. При этом в отличие от базовой версии INMOM [22], сгущение σ -уровней было сделано как в приповерхностном, так и в придонном горизонтах. В приповерхностных горизонтах оно необходимо для более корректного описания приповерхностной циркуляции и взаимодействия с атмосферой Арктического бассейна. В модели толщина придонного слоя составляет около 35 м для более точного расчета придонной циркуляции, под действием которой в дальнейшем проводится расчет распространения загрязнения. Шаг по времени, исходя из устойчивости решения, был выбран равным 10 мин.

На жидких границах в Северной Атлантике и Тихом океане от поверхности до дна на каждом шаге интегрирования задаются климатические среднемесячные значения температуры и солёности по данным электронного атласа WOA2013 [23]. Описание подобной техники задания условий на жидких границах приводится, например, в [24]. Приливная циркуляция в настоящей работе не учитывается, т.к. полагается, что в силу ее периодического характера она не вносит существенного вклада в перенос пассивной примеси на больших временах.

В численных экспериментах коэффициенты крупномасштабной горизонтальной турбулентной диффузии, параметризующей подсеточную мезомасштабную вихревую активность, задавались одинаковыми для температуры и солёности. Коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии второго порядка составляет $10 \text{ м}^2/\text{с}$. Для вязкости наряду с использованием оператора второго порядка с фоновым коэффициентом — $10 \text{ м}^2/\text{с}$, дополнительно задается оператор четвертого порядка с коэффициентом вязкости $8.3 \times 10^2 \text{ м}^4/\text{с}$, который сильнее подавляет высокочастотный пространственный шум, чем оператор второго порядка.

Коэффициенты вертикальной вязкости и диффузии выбирались согласно параметризации

Филандера—Пацановского. Коэффициент вязкости изменяется в зависимости от числа Ричардсона от 10^{-4} до $5 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$, а диффузии — с фонового значения 10^{-5} до $5 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Чтобы избежать возможных ситуаций “выклинивания” вертикальных профилей температуры и солёности в приповерхностном слое океана, в верхнем пятиметровом слое коэффициенты диффузии и вязкости задавались равными $0.01 \text{ м}^2/\text{с}$. В случае неустойчивой стратификации коэффициент вертикальной диффузии полагался равным $0.01 \text{ м}^2/\text{с}$. Для составляющих скорости на твердых границах и на дне ставилось условие свободного скольжения, а для температуры и солёности — условие отсутствия потоков.

Для расчета атмосферного воздействия использовались данные атмосферного реанализа ASRv2 (Arctic System Reanalysis, версия 2) (<https://rda.ucar.edu/datasets/ds631.1/>), выполненного за период 2000—2016 гг. для всего Арктического региона с пространственным разрешением 15 км с помощью хорошо известной региональной негидростатической атмосферной модели Weather Research and Forecasting (WRF) (<https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>) и усвоением большого числа контактных и спутниковых данных наблюдений. Данные реанализа представлены с временной дискретностью 3 ч. Из большого набора данных выбирались температура и абсолютная влажность воздуха (на высоте 2 м), горизонтальные компоненты скорости ветра (на высоте 10 м), давление на уровне моря, падающие длинноволновая и коротковолновая радиация, а также осадки.

Потоки скрытого и явного тепла и испарения с поверхности океана рассчитывались по стандартным балк-формулам (см., например, [17]). Кроме того, для коррекции солёности на поверхности использовались среднемесячные климатические данные по солёности поверхности океана из атласа WOA2013 (<https://climatedataguide.ucar.edu>). Расчеты циркуляции и переноса РЗ выполнялись для 2010 г. Его выбор обусловлен тем, что средние характеристики ледового покрова за этот год в Северном полушарии оказались близкими к средне-статистическим за десятилетний период с 2006 по 2016 гг. Поскольку в Арктическом бассейне морской лед является хорошим индикатором климатического состояния, то и другие характеристики циркуляции вод Арктического бассейна в 2010 г. можно с большой долей уверенности отнести к среднеклиматическим за десятилетний период. В качестве начальных условий использовались климатические данные по температуре и солёности из WOA2013. Для корректного описания ледяного

покрова на акватории Арктического региона на момент начала расчетов начальная толщина и сплоченность ледового поля в модели задавалась по данным океанского реанализа GLORYS12V1 (<https://resources.marine.copernicus.eu/>). Анализ результатов расчетов показывает, что установление режима циркуляции происходит приблизительно через три–четыре месяца после начала расчета. Ранее эта модель уже исследовалась для расчетов циркуляции вод в Норвежском море [13].

3. РАСЧЕТ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ В НОРВЕЖСКОМ МОРЕ КАК ПАССИВНОЙ ПРИМЕСИ

В работе проведен расчет переноса РЗ как пассивной примеси, задаваемого в виде постоянного точечного источника от местоположения АПЛ “Комсомолец” на дне Норвежского моря для оценки угрозы возможного радиоактивного заражения его вод. Как уже было сказано во введении, вероятная радиационная угроза от АПЛ “Комсомолец”, затонувшей более 30 лет назад в Норвежском море, может быть связана с постоянным выбросом в окружающую среду ^{137}Cs .

Расчет распространения РЗ как пассивной примеси по долготе и широте осуществлялся по гибридной разностной схеме, используемой также в [9, 10], которая реализуется на С-сетке путем добавления к исходной схеме переноса второго порядка оператора диффузии с коэффициентом, прямо пропорциональным скорости и половине шага сетки. Она представляет собой схему направленных разностей, обладающей важными свойствами монотонности (отсутствие ложных отрицательных пиков) и достаточным уровнем транспортности, когда возмущение приносится практически только в направлении скорости течений, а также сохранением полного содержания переносимой величины. Ее недостатком служит численная вязкость, коэффициент которой, однако, при выбранных шагах расчетной сетки и характерных скоростях 5–10 см/с вполне сопоставим с его значениями при физических параметризациях. Как будет видно из приведенных ниже карт, перенос течениями превалирует над диффузионными процессами, вызванными численной вязкостью. В вертикальном направлении используется центрально-разностная схема с заданием коэффициента вертикальной диффузии как для температуры и солёности.

Изначальная безразмерная концентрация в точечном источнике, объемом в одну придонную ячейку, в которой находится АПЛ, задавалась равной единице. Такой способ удобен тем, что ее легко масштабировать на любую физическую величину.

По данным [6], в 2015 г. концентрация ^{137}Cs в донной морской воде на расстоянии около 20 м от затонувшей АПЛ “Комсомолец” составляла 0.57 ± 0.04 Бк/м³ и соответствовала значениям предыдущих лет, когда отбор проб проводился без знания точного расположения пробоотборника воды по отношению к местоположению затонувшей АПЛ. Текущие концентрации ^{137}Cs в придонной воде не указывают на увеличение выбросов [6]. Поэтому для демонстрации распространения РЗ рассчитанные в данной работе безразмерные концентрации нормировались на эту величину – 0.57 Бк/м³.

Следует отметить, что во время экспедиции 2007 г. в Норвежское море на НИС “Академик Мстислав Келдыш” специалистами РНЦ “Курчатовский институт” были проведены прямые измерения радиоактивности морской воды в районе затопления АПЛ. Анализ полученной информации показал, что концентрация ^{137}Cs на выходе вентиляционной трубы из ядерной энергетической установки АПЛ “Комсомолец” была 16 ± 0.04 Бк/л [25], что приблизительно в 2.8×10^3 больше, чем задаваемая нами концентрация. Однако здесь надо учесть то, что методика расчета распространения “завязана” на сеточную область модели так, что в ней мы можем оперировать только с исходной концентрацией во всей придонной ячейке сетки, где лежит АПЛ, объем которой составляет $\sim 10 \text{ км} \times 10 \text{ км} \times 30 \text{ м} = 3 \times 10^9 \text{ м}^3$. Поэтому исходная концентрация в ячейке сетки будет во много раз меньше. Пересчет концентрации на выходе из трубы в концентрацию в ячейке сетки, так чтобы удовлетворить физике распространения пассивной примеси, трудно выполнить с достаточной точностью. Поэтому мы и выбрали в качестве источника измеренную концентрацию рядом с АПЛ по данным [6].

Динамика процесса распространения РЗ в придонном слое наглядно представлена на рис. 2 в логарифмическом распределении цветовых градиаций. Расчеты показывают, что в основном РЗ распространяется вдоль свала глубин к северу и югу от источника с некоторым превалированием северного направления. Разнонаправленность переноса РЗ вызвана изменчивостью придонных скоростей течений. При удалении от источника концентрация РЗ существенно уменьшается вследствие разбавления окружающими водами. Динамика распространения РЗ в течение года такова, что через месяц на расстоянии около 100 км от АПЛ она меньше на 8 порядков. Через год становится еще в 100 раз меньше, чем в источнике, а ближе к побережью Европы и Шпицбергена – меньше на 7 порядков.

Придонный слой

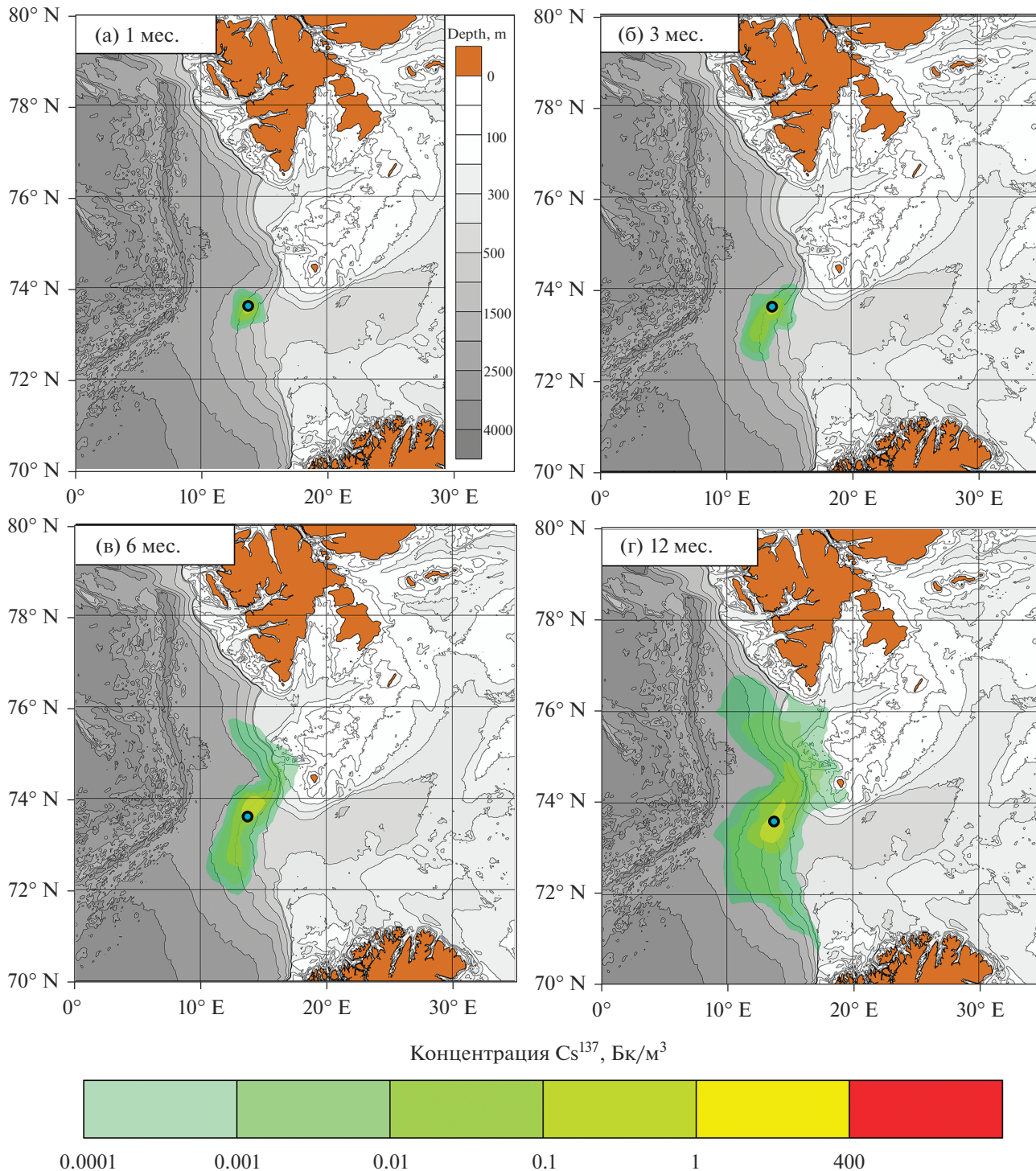


Рис. 2. Распределение концентрации РЗ в Норвежском море у дна показано цветовыми градациями с логарифмическим распределением через 1 (а), 3 (б), 6 (в) и 12 мес. (г) при постоянном источнике от АПЛ “Комсомолец”, заданном в $0.57 Bq/m^3$.

То, что нет ярко выделенного направления глубинных течений на свале глубин, где лежит АПЛ “Комсомолец”, говорит об их сильной изменчивости. Это подтверждается и данными на-

блюдений, с помощью заякоренного буя, поставленного ИО РАН. Измерения продолжались почти год – с 28 июля 1994 г. по 3 июля 1995 г. [26]. Однако в силу технических причин, к обработке

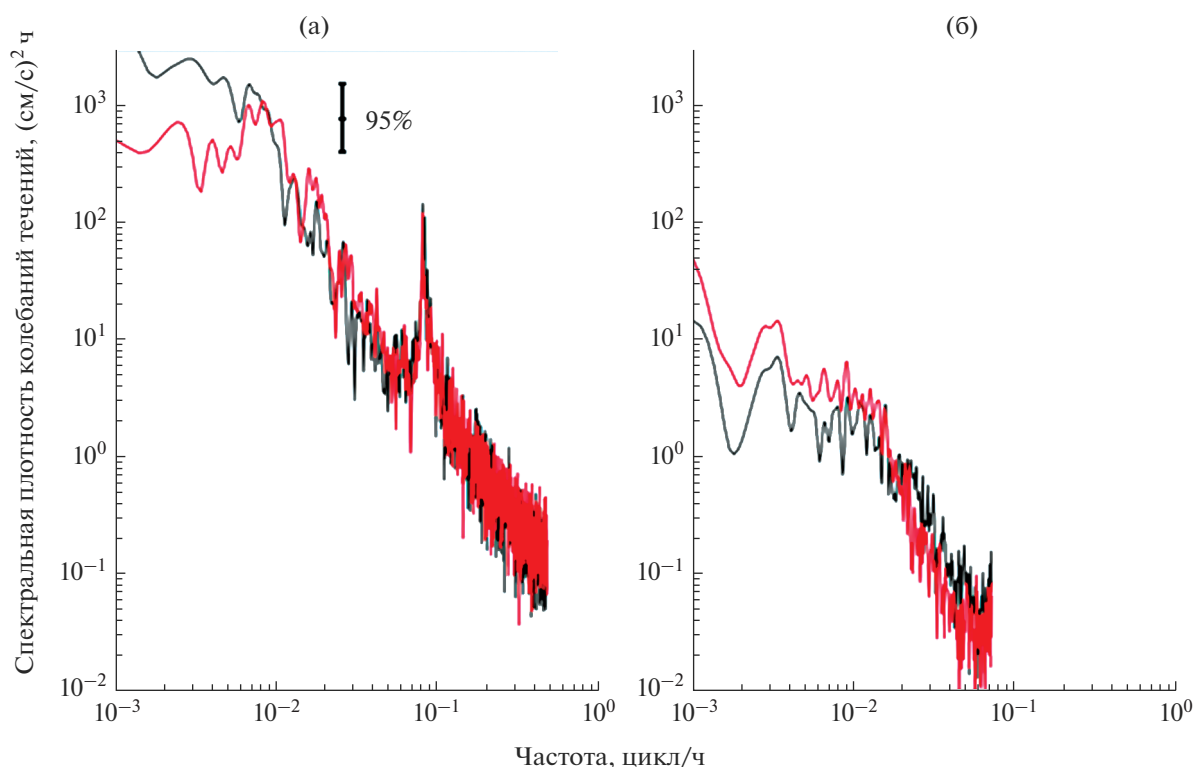


Рис. 3. Спектры мощности $((\text{см/с})^2 \text{ ч})$ зональной (черная) и меридиональной (красная) составляющих скорости придонного течения на расстоянии 10 м от дна на заякоренном буе с 28 июля 1994 г. по 3 марта 1995 г., расположенном в точке $73^\circ 42.6' \text{ N}$, $13^\circ 06.0' \text{ E}$ на глубине 1710 м [26] (а) и в ближайшей точке сетки модели на расстоянии 35 м от дна (б). Нанесен 95% доверительный интервал.

оказались пригодны данные за немногим более семи месяцев с 28 июля 1994 г. по 3 марта 1995 г. На рис. 3 показаны спектры придонных течений по данным этого буя и расчетам в ближайшей к нему точке сетки. Результаты измерений [13] и моделирования показывают сильную изменчивость течений, в спектре которой выделяются наиболее энергонесущие 15–20-суточные и 5–10-суточные колебания. Эта изменчивость очевидным образом вызвана атмосферным воздействием и связана с т. н. низкочастотной (см., например, [27, 28]) и синоптической изменчивостями атмосферы соответственно. По-видимому, сигналы от атмосферного воздействия на этих частотах передаются посредством атмосферного воздействия на баротропную океанскую моду, которая может быть неустойчива на свале глубин в зависимости от направления наклона дна и знака завихренности.

На спектре по данным измерений хорошо выделяется мода полусуточного прилива, которой нет в результатах моделирования, т.к. в проведенном численном эксперименте прилив не учитывался. Поскольку приливные движения квази-баротропны, то их сигнал должен хорошо проявляться у дна. Заметное отличие между из-

мерениями и расчетом в формах спектров проявляется и в низкочастотной области, начиная от атмосферной синоптики. Скорее всего, это связано с недостаточной длительностью расчетов, и низкочастотные движения в модели океана не успевают установиться. Еще одним отличием является то, что в этой области спектра в модели меридиональная составляющая больше, чем зональная, а по данным измерений наоборот. Причем в менее значимой по изменчивости высокочастотной области с периодами менее 2 сут энергия меридиональных и зональных движений в модели меняются местами, а по данным измерений они сопоставимы. То, что в модели меридиональная составляющая течений в наиболее энергонесущем диапазоне частот превалирует над зональной, объясняется тем, что первая практически направлена вдоль свала глубин, тогда как вторая более направлена поперек него. А то, что в данных измерений это не так, можно объяснить придонным экмановским поворотом течений, который по данным измерений должен проявляться более ярко, т.к. измерения проведены на расстоянии всего 10 м от дна. К сожалению, изначально шаги вертикальных уровней в модели выбраны так, что самый нижний придонный уровень в мо-

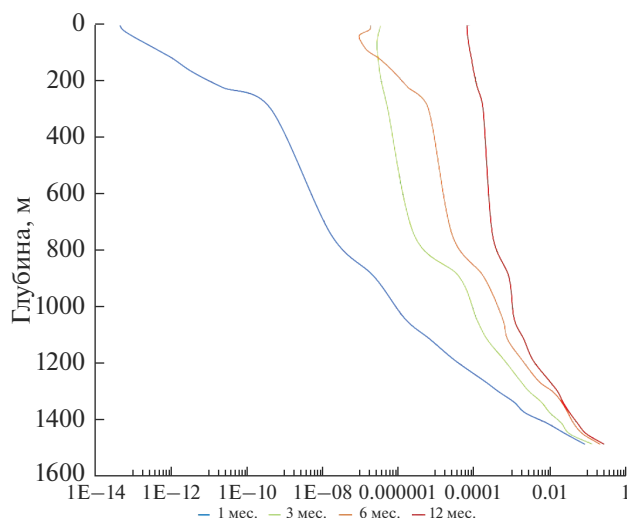


Рис. 4. Среднемесячные, осредненные в “квадрате” 50×50 км, вертикальные профили коэффициента разбавления (относительная концентрация) пассивной примеси в толще моря над АПЛ в логарифмическом масштабе с течением времени через 1 (синяя кривая), 3 (зеленая), 6 (оранжевая) и 12 мес. (красная) при начальной концентрации в источнике, заданной равной 1.

дели в месте положения АПЛ “Комсомолец” находится на расстоянии 35 м от дна, и экмановский разворот течений здесь существенно менее значим. Наконец, еще одним существенным отличием наблюдаемых и рассчитанных по модели спектров течений является то, что изменчивость течений по модели существенно недооценена особенно в низкочастотной области, начиная от атмосферной синоптики. Это может объясняться с одной стороны тем, что система придонных течений еще не установилась, а с другой стороны, что рассчитанные течения соответствуют осреднению по площади ~ 10 -км “квадрата”, в то время как данные наблюдений выполнены в точке. Очевидно, что с увеличением сеточного разрешения модели и проведением более длительных расчетов этот разрыв будет уменьшаться.

Таким образом, результаты моделирования подтверждаются данными наблюдений, и действительно распространение РЗ должно происходить в основном вдоль склона в обоих направлениях. Распространение поперек свала глубин менее интенсивное, чем вдоль изобат. Однако его наличие свидетельствует о наличии и поперечных к склону течений, которые неминуемым образом возникают при перестройке вдоль-склоновых течений с одного направления на другое. Исследование изменчивости вдоль-склоновых течений требует отдельного изучения, в том числе с помощью численного моделирования.

Важным вопросом является распространение загрязнения в вышележащих слоях океана и выход радиоактивных веществ на поверхность. Та-

кой процесс возможен за счет конвективных движений вод с глубин на поверхность в сложной трехмерной структуре циркуляции Норвежского моря. На рис. 4 представлена относительная тенденция изменения содержания пассивной примеси по глубине с течением времени. Для объективности показаны среднемесячные вертикальные профили коэффициента разбавления и еще осредненные в “квадрате” 50×50 км. Через месяц коэффициент разбавления (относительная концентрация) на поверхности над точкой источника близок к нулю. С течением времени он увеличивается во всей толще воды за счет вертикальной диффузии и вертикальных движений. Тем не менее, через год почти во всей толще моря концентрация в 1000 раз меньше, чем в источнике.

Подъем РЗ со дна моря к поверхности за счет турбулентной диффузии и вертикальных движений воды приводит к его распространению в поверхностных слоях, показанному на рис. 5. Однако ее концентрация резко падает. Максимум РЗ смещается на восток за счет переноса поверхностными течениями. Через год концентрация РЗ на поверхности океана достигает значений в 100 раз меньших, чем на дне. Расчет показывает, что в районе береговой линии Европы и Шпицбергена концентрация РЗ на много порядков меньше, чем в точке над источником. Таким образом, согласно нашим расчетам, вероятное РЗ от АПЛ “Комсомолец” фактически не превышает фоновый уровень радиоактивного загрязнения.

Здесь следует отметить, что результаты изменений содержания ^{137}Cs в морской воде, получен-

Поверхностный слой

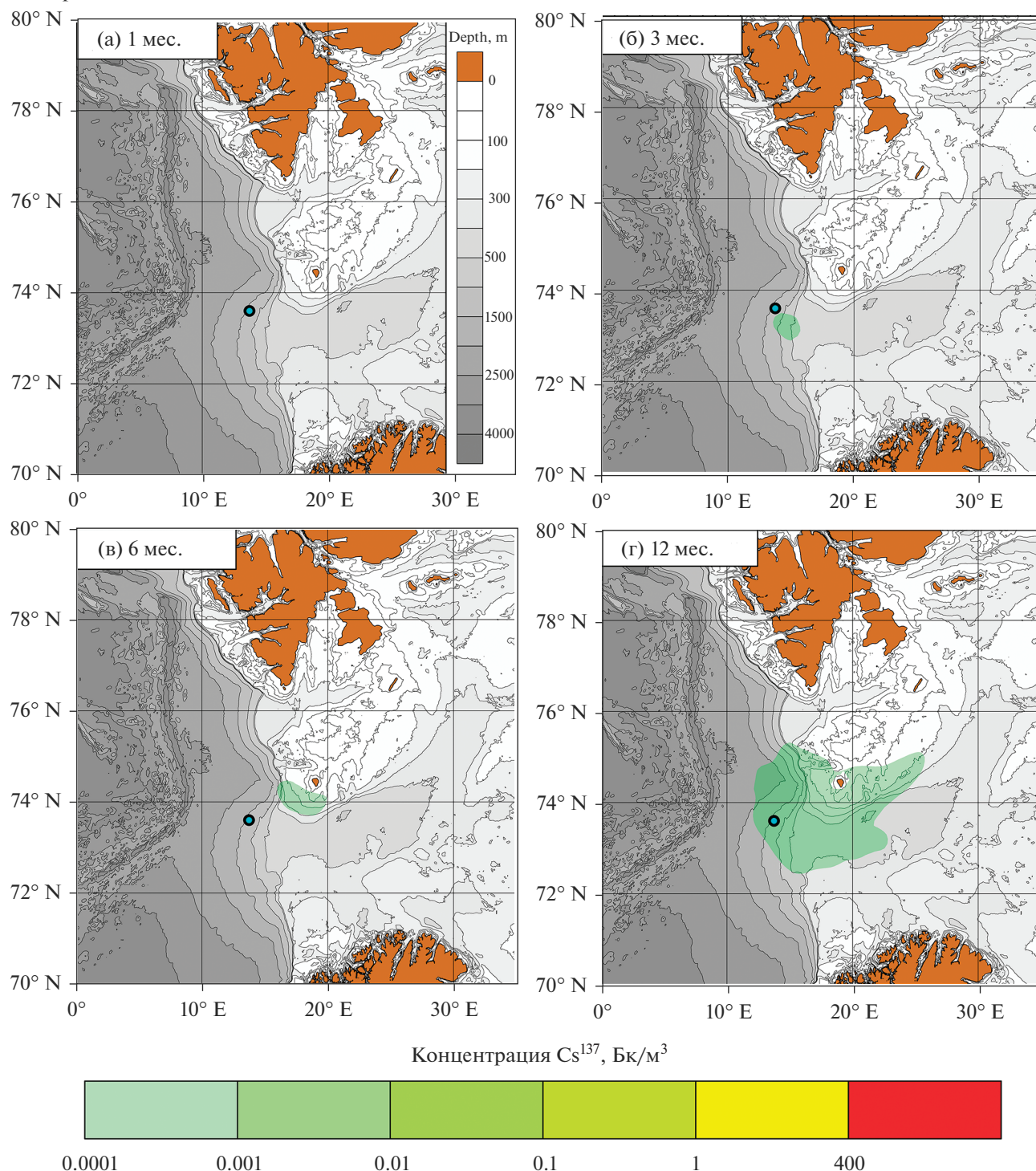


Рис. 5. Распределение концентрации РЗ в Норвежском море в поверхностных водах через 1 (а), 3 (б), 6 (в) и 12 мес. (г) при постоянном источнике от АПЛ “Комсомолец” 0.57 Бк/м^3 .

ные в процессе мониторинга, проведенного норвежскими исследователями в районе затонувшей АПЛ “Комсомолец” [6], показывают, что, за исключением периода с 1991 по 1993 гг., значения РЗ в придонной пробе вод обычно были ниже,

чем в поверхностной. В этой работе повышенные концентрации РЗ в поверхностных водах не связывают с АПЛ “Комсомолец”. Как сказано в [6], эти значения, вероятно, отражают глобальный перенос разрешенных выбросов с ядерных пере-

рабатывающих предприятий в Северной Европе. Наши результаты подтверждают версию того, что повышение РЗ в поверхностных водах не может быть вызвано выбросами из АПЛ “Комсомолец”.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки радиационной опасности от АПЛ “Комсомолец” в связи с выходом радионуклидов из реакторного отсека в окружающую морскую воду в настоящей статье использован метод расчета распространения радиоактивного загрязнения с помощью гидродинамического моделирования. Следует отметить, что АПЛ “Комсомолец” находится на большой глубине, что приводит к дополнительным трудностям восстановления придонной циркуляции, особенно для т. н. z -моделей [11]. Поэтому расчеты распространения от нее РЗ в Норвежском море проведены с помощью σ -модели INMOM, хорошо зарекомендовавшей себя при расчете течений в придонных разломах Атлантического океана и субарктического бассейна [12–15].

Для расчета распространения РЗ как пассивной примеси использовалась гибридная схема переноса-диффузии, которая в горизонтальной плоскости соответствует схеме направленных разностей, а в вертикальном направлении используется центрально-разностная схема с заданием коэффициента вертикальной диффузии как для температуры и солёности.

В данной работе выполнены расчеты распространения РЗ от ^{137}Cs как пассивной примеси от местоположения АПЛ “Комсомолец” в водах Норвежского моря. Расчеты показывают, что в основном РЗ распространяется вдоль свала глубин к северу и югу от источника с некоторым преобладанием северного направления, в соответствии с генеральным направлением придонных течений. Разнонаправленность переноса РЗ вызвана изменчивостью придонных скоростей течений, которая хорошо подтверждается данными измерений [13]. С удалением от источника концентрация РЗ существенно уменьшается вследствие разбавления окружающими водами. Динамика распространения РЗ в течение года такова, что через месяц на расстоянии около 100 км от АПЛ она меньше на 8 порядков. Через год становится еще в 100 раз меньше, чем в источнике, а ближе к побережью Европы и Шпицбергена – меньше на 7 порядков.

Таким образом, результаты моделирования придонных течений подтверждаются данными наблюдений, и действительно распространение РЗ должно происходить в основном вдоль склона в обоих направлениях. Распространение РЗ поперек свала глубин менее интенсивное, чем вдоль

его склона. Однако его наличие свидетельствует и о наличии поперечных к склону течений, которые неминуемым образом возникают при перестройке вдоль-склоновых течений с одного направления на другое. По данным модельных расчетов, концентрация загрязнения у дна на расстоянии 200–300 км от источника через год оказывается на 10 порядков меньше, чем в источнике, а у берегов на 12 порядков меньше, чем в источнике. Таким образом, согласно нашим расчетам вероятного РЗ от АПЛ “Комсомолец”, оно фактически не превышает фоновый уровень радиоактивного загрязнения.

Показано поступление вероятного РЗ в приповерхностные воды за счет турбулентного перемешивания и конвективных движений вод с глубин на поверхность в сложной трехмерной структуре циркуляции Норвежского моря. В толще моря концентрация в 100 раз меньше, чем в источнике.

Подъем РЗ со дна моря к поверхности за счет турбулентной диффузии и вертикальных движений воды приводит к его распространению в поверхностных слоях. Однако здесь концентрация РЗ резко падает. Максимум загрязнения смещается на восток за счет переноса поверхностными течениями. Через год концентрация на поверхности над источником на дне на два порядка меньше, чем на дне.

Результаты измерений содержания ^{137}Cs около затонувшей АПЛ “Комсомолец” [6], показывают, что, за исключением периода с 1991 по 1993 гг., значения в придонной пробе вод обычно были ниже, чем в поверхностной. В этой работе повышенные концентрации РЗ в поверхностных водах не связывают с АПЛ “Комсомолец”. Как сказано в [6], эти значения, вероятно, отражают глобальный перенос разрешенных выбросов с ядерных перерабатывающих предприятий в Северной Европе. Наши результаты подтверждают версию того, что повышение РЗ в поверхностных водах не может быть вызвано выбросами из АПЛ “Комсомолец”.

Следует отметить, что наши расчеты носят предварительный характер. Они только очерчивают круг проблем, которые необходимо разрешать. В дальнейшем необходимо уточнять сценарии расчетов, проводить их на более длительные сроки до установления квазиравновесного состояния и использовать модель более высокого пространственного разрешения как по горизонтали, так и по вертикали, что позволит снизить влияние численной вязкости на картину переноса. Кроме того, желательно учитывать и приливные движения, т.к. остаточная приливная циркуляция все же может вносить вклад в перенос РЗ, о

чем свидетельствует ее интенсивность в придонном слое, показанная на рис. 3а. Кроме того, надо быть готовыми и к непредвиденным ситуациям с АПЛ “Комсомолец”. Например, при возникновении гипотетических аварий одновременно в двух реакторах с самоподдерживающейся цепной реакцией в затонувшей в Баренцевом море АПЛ Б-159 возможен залповый выброс в окружающую среду ^{137}Cs активностью 5×10^{13} Бк [5]. В этом случае концентрация РЗ около АПЛ может превышать в 20000 раз принятую в нашей работе согласно данным измерений.

В настоящее время находится на стадии испытаний новая версия INMOM с 4-км пространственным разрешением для всего Арктического бассейна. Эта модель будет более точно воспроизводить циркуляцию вод в Норвежском море и изменчивость придонных течений около АПЛ “Комсомолец”. На основе данных измерений было показано, что придонные течения в районе Комсомольца характеризуются большой изменчивостью величине и направлению. В свою очередь это может повлиять на скорость выхода ^{137}Cs и загрязнение окружающих вод. Численное моделирование поможет решить и эту проблему.

5. ВЫВОДЫ

Анализ результатов моделирования распространения радиоактивного загрязнения в Норвежском море от источника на дне показал, что разнонаправленность переноса РЗ вызвана изменчивостью придонных скоростей течений, которая подтверждается данными наблюдений. Распространение РЗ должно происходить в основном вдоль склона в обоих направлениях. Распространение РЗ поперек свала глубин менее интенсивное, чем вдоль его склона. С удалением от источника концентрация загрязнений существенно уменьшается вследствие разбавления окружающими водами. Через год концентрация РЗ на расстоянии 100 км от источника становится в 100 раз меньше, чем в источнике, а ближе к побережью Европы и Шпицбергена она уменьшается на много порядков.

Авторы выражают благодарность проф. В.Л. Высоцкому за ценные замечания при написании статьи.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания Института океанологии им. П.П. Ширинова РАН (тема 0149-2019-0004) и поддержана проектами РФФИ № 18-05-80089 (анализ распространения загрязнений) и № 20-35-70039 (обработка данных измерений). Работа, связанная с подготовкой специализированной версии модели INMOM, выполнена в рамках проекта РНФ № 17-17-01295. Численные

эксперименты проводились на вычислительных ресурсах Центра коллективного пользования “Дальневосточный Вычислительный ресурс” ЦКП ДВ ВР (<https://www.cc.dvo.ru>) и “Межведомственного Суперкомпьютерного центра РАН” МСЦ РАН (<http://old.jscs.ru>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саркисов А.А., Сивинцев Ю.В., Высоцкий В.Л., Никитин В.С. Атомное наследие холодной войны на дне Арктики. Радиоэкологические и технико-экономические проблемы радиационной реабилитации морей. М.: Юлис, 2015. 699 с.
2. Архипов Б.В., Солбаков В.В., Соболев И.О. и др. Моделирование рассеивания радиоактивности в морской среде. М.: ВЦ им. А.А. Дородницына РАН, 2012. 31 с.
3. Heldal H., Vikebø F., Johansen G. Dispersal of the radionuclide caesium-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 Pollution 180. Bergen, Inst. of Marine Research, 2013. P. 190–198.
4. Антипов С.В., Билашенко В.П., Высоцкий В.Л., Калантаров В.Е., Кобринский М.Н., Саркисов А.А., Сотников В.А., Шведов П.А., Ибраев Р.А., Саркисян А.С. Прогноз и оценка радиоэкологических последствий гипотетической аварии на затонувшей в Баренцевом море АПЛ “Б-159” // Атомная энергия. 2015. Т. 119. № 6. С. 106–113.
5. Саркисов А.А., Антипов С.В., Высоцкий В.Л., Кобринский М.Н., Шведов П.А., Билашенко В.П., Хохлов И.Н. Прогноз радиоэкологических последствий гипотетических аварий на ядерных и радиационно опасных объектах, находящихся на дне Баренцева и Карского морей // Атомная энергия. 2018. Т. 125. № 6. С. 343–350.
6. Gwynn J.P., Heldal H.E., Flo J.K., Sværen I., Gäfvert T., Haanes H., Føyn L., Rudjord A.L. Norwegian monitoring (1990–2015) of the marine environment around the sunken nuclear submarine Komsomolets // J. Environ. Radioact. 2018. V. 182. P. 52–62.
7. Nies H., Harms I.H., Karcher M.J., Dethleff D., Bahe C. Anthropogenic radioactivity in the Arctic Ocean, review of the results from the joint German project // Sci. Total Environ. 1999. V. 237. P. 181–191.
8. Miroshnichenko O.N., Paraskiv A.A., Gulín S.B. Cesium-137 Concentration in the surface waters of Eurasian Seas: Evidence from the expedition research of 2017 // Geochemistry International. 2019. V. 57. № 12. P. 1349–1354.
9. Антипов С.В., Дианский Н.А., Гусев А.В. Особенности распространения радиоактивного загрязнения в северо-западной части Тихого океана // Изв. РАН. Энергетика. 2006. № 6. С. 52–70.
10. Дианский Н.А., Гусев А.В., Фомин В.В. Особенности распространения загрязнений в северо-западной

- части Тихого океана // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 2. С. 247–266.
11. *Griffies S.M.* Some Ocean Model Fundamentals // *Ocean Weather Forecasting. E.P. Chassignet, J. Verron (Eds.)*. Dordrecht: Springer, 2006. P. 19–73. https://doi.org/10.1007/1-4020-4028-8_2
 12. *Frey D.I., Novigatsky A.N., Kravchishina M.D., Morozov E.G.* Water structure and currents in the Bear Island Trough in July–August // *Russ. J. Earth. Sci.* 2017. V. 17. P. ES3003. <https://doi.org/10.2205/2017ES000602>
 13. *Morozov E.G., Frey D.I., Diansky N.A., Fomin V.V.* Bottom circulation in the Norwegian Sea // *Russ. J. Earth Sciences*, 2019. V. 19. P. ES2004. <https://doi.org/10.2205/2019ES000655>
 14. *Frey D.I., Morozov E.G., Fomin V.V., Diansky N.A., Tarakanov R.Y.* Regional modeling of Antarctic Bottom Water flows in the key passages of the Atlantic // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2019. V. 124. № 11. P. 8414. <https://doi.org/10.1029/2019JC015315>
 15. *Фрей Д.И., Морозов Е.Г., Фомин В.В., Дианский Н.А.* Пространственная структура потока антарктических вод в разломе Вима Срединно-атлантического хребта // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 6. С. 727–732. <https://doi.org/10.1134/S0002351518060068>
 16. *Zalesny V.B., Marchuk G.I., Agoshkov V.I., Bagno A.V., Gusev A.V., Diansky N.A. et al.* Numerical simulation of large-scale ocean circulation based on the multicomponent splitting method // *Russian J. Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2010. V. 25. № 6. P. 581–609. <https://doi.org/10.1515/rjnamm.2010.036>
 17. *Дианский Н.А.* Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит. 2013. 272 с.
 18. *Володин Е.М., Гусев А.В., Дианский Н.А., Ибраев Р.А., Ушаков К.В.* Воспроизведение циркуляции мирового океана по сценарию CORE-II с помощью численных моделей // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 1. С. 97–111. <https://doi.org/10.7868/S0003351518010105>
 19. *Дианский Н.А., Панасенкова И.И., Фомин В.В.* Исследование отклика верхнего слоя Баренцева моря на прохождение интенсивного полярного циклона в начале января 1975 года // *Морской гидрофизический журн.* 2019. Т. 35. № 6. С. 530–548. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-6-530-548>
 20. *Brydon D., San S., Bleck R.* A new approximation of the equation of state for seawater, suitable for numerical ocean models // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104(C1). P. 1537–1540.
 21. *Яковлев Н.Г.* Восстановление крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана в 1948–2002 гг. Часть 1: Численная модель и среднее состояние // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 3. С. 1–16.
 22. *Коротаев Г.К., Холод А.Л., Мизюк А.И., Ратнер Ю.Б.* Прототип отечественной системы непрерывного анализа и прогноза полей Мирового океана, Арктического и Азово-Черноморского бассейнов // *Морские информационно-управляющие системы*. 2020. Т. 17. № 1. С. 40–47.
 23. *Zweng M.M., Reagan J.R., Antonov J.I., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Boyer T.P., Garcia H.E., Baranova O.K., Johnson D.R., Seidov D., Biddle M.M.* World Ocean Atlas 2013. Volume 2: Salinity // *S. Levitus, A. Mishonov (Eds.)*. Technical Ed. NOAA Atlas NESDIS. 2013. 39 p.
 24. *Ibrayev R.A.* Model of enclosed and semi-enclosed sea hydrodynamics // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling*. 2001. V. 16. № 4. P. 291–304.
 25. *Атомная энергетика и перспективные энергетические технологии*. М.: Рос. науч. Центр “Курчат. ин-т”, 2008. С. 56–59.
 26. *Алейник Д.Л., Бышев В.И., Щербинин А.Д.* Измеренные течения в придонном слое Норвежского моря в районе катастрофы атомной подводной лодки “Комсомолец” // *Доклады РАН*. 1999. Т. 369. № 4. С. 1393–1397.
 27. *Дианский Н.А.* Временные связи и пространственные формы совместных мод аномалий высоты изобарической поверхности 500 мб и температуры поверхности океана зимой в Северной Атлантике // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1998. Т. 34. № 2. С. 197–213.
 28. *Дымников В.П.* Устойчивость и предсказуемость крупномасштабных атмосферных процессов. М.: ИВМ РАН, 2007. 283 с.

Spreading of Pollution in the Norwegian Sea from a Bottom Source

N. A. Diansky^{1,2,3}, E. G. Morozov^{4,*}, V. V. Fomin^{2,3}, and D. I. Frey⁴

¹Moscow State University, Leninskiye gory, 1, bld. 2, Moscow, 119991 Russia

²Zubov State Oceanographic Institute, Kropotkinskii per., 6, Moscow, 119034 Russia

³Marchuk Institute of Computational Mathematics, Russian Academy of Sciences, Gubkina str., 8, Moscow, 119333 Russia

⁴Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Nakhimovskii prosp., 36, Moscow, 119997 Russia

*e-mail: egmorozov@mail.ru

A method for calculating spreading of radioactive contamination using the INMOM model is proposed to assess the radiation threat from the “Komsomolets” nuclear submarine related to the release of radionuclides from the reactor compartment into the adjacent seawater. Calculations of spreading of radioactive contami-

nation (RC) from ^{137}Cs as a passive admixture from the location of the nuclear submarine “Komsomolets” have been performed. Calculations have shown that in the bottom layer, RC mainly spreads along the depth slope to the north and south of the source. Such variability of the direction of RC transport is caused by the variability of the bottom current velocities, which is well confirmed by the field data. At a distance from the source, the concentration of RC significantly decreases due to dilution in surrounding waters. The propagation of RC across the depth slope is less intense than along its slope; it is caused by the presence of currents transverse to the slope, which arise when the along-slope currents are rearranged from one direction to another. The entry of RC into surface waters due to convective motions from depths to the surface in a complex three-dimensional structure of the circulation of the Norwegian Sea is shown. In the deep sea, the concentration is 100 times smaller than in the source. It is shown that the observed excess of the surface concentration of RC over the bottom cannot be associated with emissions from the nuclear submarine “Komsomolets”. The near-surface concentration of contamination is most likely caused by the spread of RC from nuclear processing plants in northern Europe. In general, it has been shown that the currently possible RC from the “Komsomolets” nuclear submarine does not actually exceed the background level of radioactive contamination of the Norwegian Sea waters.

Keywords: eddy-resolving modeling, ocean currents, large-scale circulation, the Norwegian Sea, pollution transport, bottom layer