

УДК 502.51:621.6.033(268.46)
DOI 10.17513/use.38440

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ В БЕЛОМ МОРЕ

¹Толстикова А.В. ORCID ID 0000-0002-7690-3404, ²Чернов И.А.

¹ФГБУН «Институт водных проблем Севера» Карельского НЦ РАН,
Россия, Петрозаводск, e-mail: alexeytolstikov@mail.ru;

²ФГБУН «Институт прикладных математических исследований»
Карельского НЦ РАН, Россия, Петрозаводск

Утечки нефти и нефтепродуктов в морской среде представляют серьезную проблему для экосистем и экономики. Между тем отследить перемещение пятна загрязнителя в морской среде – задача трудная и ресурсоемкая, существующие для этого математические модели не учитывают многих параметров. Поэтому целью исследования стало моделирование переноса нефти и мазута в различных районах Белого моря в зависимости от сезона с помощью трехмерной численной модели JASMINE. Данный программный комплекс разработан авторами и предназначен для численного моделирования состояния Белого моря. Горизонтальная регулярная сетка модели около 3 км, шаг по времени 3 минуты, вертикальная сетка между горизонтами 5 или 10 м в зависимости от глубины. Граничные условия представляют собой тип излучения: втекающая вода имеет заданную соленость и температуру. Нефть задана как плавучая примесь, мазут – как трехмерная примесь. Было показано распространение пятна сырой нефти от портов Белого моря в течение одного года и нескольких лет. Выполнена имитация разлива мазута в Онежском заливе в сентябре 2003 г. Результаты сравнивались с доступными источниками данных. Согласно расчетам, нефтепродукты в Онежском заливе могут задерживаться почти на 5 лет. Подобная авария влияет на экосистемы всех районов Белого моря. При отсутствии информации ежесуточного распространения пятен загрязнителей в водоеме результаты моделирования могут быть востребованы органами власти, природоохранными организациями, портовыми службами. Таким образом, представление нефти как плавучей примеси, а мазута как трехмерной примеси при моделировании оправдано с точки зрения учета распространения этих видов загрязнителей в морской среде в зависимости от характера течений и ветровых условий.

Ключевые слова: моделирование примеси, Белое море, JASMINE, нефть, мазут

MODELLING THE SPREAD OF OIL AND OIL PRODUCTS IN THE WHITE SEA

¹Tolstikov A.V. ORCID ID 0000-0002-7690-3404, ²Chernov I.A.

¹Northern Water Problems Institute of Karelian Research Centre of RAS, Russia,
Petrozavodsk, e-mail: alexeytolstikov@mail.ru;

²Institute of Applied Mathematical Research of Karelian Research Centre
of RAS, Russia, Petrozavodsk

Oil and oil product spills in the marine environment pose a serious problem for ecosystems and economy. Meanwhile, tracking the movement of a pollutant in the marine environment is a difficult and resource-intensive task; existing mathematical models do not take into account many parameters. Therefore, the aim of the study was to model the transfer of oil and fuel oil in different areas of the White Sea depending on the season using the 3D numerical model JASMINE. This software package was developed by the authors and is intended for numerical modeling of the state of the White Sea. The horizontal regular grid is about 3 km, the time step is 3 minutes, the vertical is 5-10 m. The boundary conditions represent a type of radiation: the inflowing water has a salinity and temperature specified by the measured data. Oil is defined as a floating impurity, fuel oil as a three-dimensional impurity. The spread of a crude oil slick from ports over one year and several years was shown. A fuel oil spill in the Onegzskiy Bay in September 2003 was simulated. The results are compared with available data sources. Oil products could linger in Onegzskiy Bay for 5 years. Such an accident would impact on ecosystems of the all parts of the White Sea. In the absence of information on the daily spread of pollutants, the modeling results may be in demand by government, environmental organizations, ports services. The presentation of oil as a floating impurity and fuel oil as a three-dimensional impurity is justified depending on the nature of the currents and wind conditions.

Keywords: modeling of impurity, the White Sea, JASMINE, oil, fuel oil

Введение

В настоящее время при активном освоении ресурсов Арктики усиливается роль Северного морского и Беломорско-Балтийского водных путей, а соответственно, в планах их модернизации предусмотрено изменение береговой инфраструктуры для уве-

личения в будущем объемов перевозимых грузов, в том числе нефти и нефтепродуктов. Предполагается строительство новых нефтеналивных терминалов, повышение грузооборота. Что касается транспортировки мазута и нефти по Беломорско-Балтийскому водному пути, то в настоящее время

она не осуществляется, хотя в начале XXI в. такие работы выполнялись, и существовали проекты по ежегодному наращиванию объемов [1, с. 21]. Однако в дальнейшем от этих планов отказались. Безусловно, нефть и нефтепродукты – опасные загрязнители для моря и прибрежных экосистем [2; 3], однако в воде происходят их физические и химические изменения [4]: растекание, испарение, диспергирование, эмульгирование, растворение, окисление и т.д. Часть материала осаждается на дно, что-то попадает на берег [5; 6]. Лед также оказывает влияние на распространение нефтяного пятна, адсорбируя значительные объемы углеводородного загрязнения [7; 8]. Поэтому в различные сезоны года распространение нефти при одинаковых объемах будет отличаться.

К сожалению, в Белом море чаще всего отсутствуют документальные свидетельства поэтапного распространения пятна нефтепродуктов в зависимости от времени, либо доступны материалы эпизодических экспедиций в различных участках акватории, по которым достаточно трудно восстановить полную картину поведения загрязнителя. Наиболее хорошо документирован случай, произошедший в сентябре 2003 г. Тогда в Онежском заливе произошла утечка нефтепродуктов при аварии двух танкеров, и в море попало 54 т мазута [9]. Последствия для экосистем наблюдались в течение многих лет [10]. Также известно об аварийных разливах нефти в других районах моря, например у порта Витино (вершина Кандалакшского залива) [1, с. 35]. Порты Белого моря участвуют в логистике перегрузочных мероприятий и стыковке с железнодорожным транспортом и трубопроводами [1, с. 16-19]. В относительно небольшой акватории скапливаются суда, использующие в качестве топлива продукты переработки нефти (дизтопливо, мазут, газойль), на рейде курсируют так называемые челночные танкеры. Таким образом, порты – наиболее опасные импактные зоны для морской среды, где велик риск попадания загрязнителей (в первую очередь нефтепродуктов) в воду. В [11, с. 83-90] показаны интегральные карты экологической уязвимости Белого моря. Весь Онежский залив в данной работе отмечен как наиболее уязвимый во все сезоны.

Одним из инструментов оценки последствий техногенных катастроф являются математические модели, с помощью которых можно рассчитывать объемы, «поведение» и скорости распространения пятен загрязнителя в море при реальных или гипотети-

ческих разливах нефти и нефтепродуктов. Такие модели разрабатываются и применяются регулярно [12; 13], в том числе и для Белого моря [11, с. 106]. Однако лишь трехмерная численная модель позволяет комплексно учитывать сочетание всех факторов среды (погодные условия, динамику речного стока, ледяной покров, ветер и т.д.), одновременно моделировать распространение загрязнителя из нескольких источников, рассчитывать его перемещение и трансформацию за многолетний период. Это особенно важно, когда критически не хватает данных натурных наблюдений. В настоящее время для Белого моря функционирует лишь одна трехмерная численная модель JASMINE [14; 15]. При отсутствии информации ежегодного распространения пятен загрязнителей в акватории Белого моря результаты моделирования могут быть востребованы органами власти, природоохранными организациями, портовыми службами.

Цель исследования: моделирование переноса нефти и мазута в различных районах Белого моря в зависимости от сезона с помощью трехмерной численной модели JASMINE.

Материалы и методы исследования

В расчетах распространения нефтяных пятен и очищения Белого моря после загрязнения нефтепродуктами используется программный комплекс JASMINE [15], основанный на конечно-элементной модели Северного Ледовитого океана FEMAO [16]. Он разработан авторами и подробно описан в работах [14; 15] (в последней внимание уделено воспроизведению основных термогидродинамических и биогеохимических процессов, а также верификации данных). В модели FEMAO используется схема вертикального смешивания уровня 2,5 Меллора и Ямады [17], изопокического перемешивания Гента – Мак-Вильямса [18] с параметризацией переноса вихрей, пространственный масштаб которого зависит от шага сетки. Коэффициенты горизонтальной турбулентной вязкости и диффузии заданы $0,05 \text{ м}^2/\text{с}$ для скалярных полей и $0,1 \text{ м}^2/\text{с}$ для импульса.

Программный комплекс JASMINE позволяет воспроизводить поля течений, температуры и солености, различных характеристик морского льда, поведение примесей различной природы. Можно рассчитывать распространение различных видов примеси, в том числе *плавучей* – сосредоточенной на поверхности моря и переносимой

горизонтальными течениями по той же схеме, что и поля, описывающие морской лед, и *трехмерной с нулевой плавучестью* (аналогично себя ведет, например, поле солености). Для качественного описания поведения загрязнения нефтепродуктами удобно такое разделение примеси на два класса: плавучие, которые существенно легче воды, и поэтому их вертикальным распространением можно пренебречь, и с нулевой плавучестью, если плотность вещества близка к плотности воды и характерно именно пространственное распределение загрязнения в водной толще. Так, нефть можно считать *плавучей*, а мазут – *трехмерной* примесью.

Регулярная сетка 200 на 200 узлов с шагом около 3 км (шаг по долготе зависит от широты местности) покрывает все Белое море и небольшую часть южной акватории Баренцева моря. Жидкая граница области проходит по 70° с. ш. Шаг вертикальной z-сетки составляет 5 метров до глубины 150 м и глубже этого горизонта 10 м. На свободной поверхности моря действует линеаризованное кинематическое условие. Реки описываются как пресноводные проливы со среднемесячными расходами, и в них задается температура воды, а также, при необходимости, концентрации пассивной примеси. Поток примеси через дно и берега моря отсутствует, как и через поверхность моря. На границе области, проходящей по акватории Баренцева моря, ставится условие Флезера: при вытекании беломорской воды выносятся трехмерная концентрация *in situ*, а при поступлении баренцевоморской воды – заданная граничным условием нулевая концентрация, температура и соленость воды из данных измерений. Физически это условие интерпретируется как быстрое рассеивание примеси в обширном Баренцевом море, так что возвратом вещества можно пренебречь. Для плавучей примеси, сосредоточенной на поверхности моря, граничное условие на «жидкой границе» ставится аналогично условию для морского льда: концентрация по обе стороны границы предполагается одинаковой, так что поле мало чувствительно к колебательным движениям на границе.

Атмосферное воздействие задается из данных реанализа NOAA NCEP/NCAR [19]: температура воздуха на высоте 2 м от поверхности, влажность, атмосферное давление, скорость ветра на высоте 10 м, облачность, осадки. Для расчета потоков явного, скрытого тепла и суммарного (восходящего

и нисходящего) потока длинноволновой радиации использовались балк-формулы; поток коротковолновой солнечной радиации с поправкой на облачность рассчитывался в зависимости от времени суток и широты местности. Вода, лед и снег излучают длинноволновую радиацию по формуле черного тела с коэффициентами черноты 0,9, 0,99 и 0,97 соответственно. Альbedo воды постоянно и равно 0,1, альbedo льда и снега рассчитывается в зависимости от температуры (сухой/мокрый лед или снег). Касательное напряжение трения ветра рассчитано на основе заданной скорости ветра. Шаг по времени составил 3 минуты, что обусловлено требованиями устойчивости расчетных схем, прежде всего условием Куранта: это минимальный шаг, при котором расчет устойчив.

Модельный комплекс JASMINE достаточно хорошо воспроизводит динамику и биогеохимические процессы в Белом море [15], температурные и соленостные поля, а фронтальные зоны согласуются с данными, полученными в ходе экспедиций ИВПС КарНЦ РАН [20]. Результаты сравнения модельных и экспедиционных данных приведены, например, в [15] и показывают хорошую согласованность.

Было рассмотрено два модельных сценария: одновременного поступления нефти из портов Белого моря; поступление мазута в вершине Онежского залива (имитация утечки 2003 г.). Исходя из того, что плотность нефти составляет 855 кг/м³, она описана как плавучая примесь. Плотность мазута марки М-100 близка к плотности воды (975 кг/м³ при 20°), и он описывается как трехмерная примесь с нулевой плавучестью.

Результаты исследования и их обсуждение

Распространение примеси в Белом море зависит от динамики течений, скорости и направления ветра, а также нелинейных взаимодействий этих движений. Течения в Белом море возникают под действием прилива, ветра, атмосферного давления, стока рек, на них оказывает влияние морфометрия и рельеф дна. На рисунке 1 представлена модельная схема поверхностных течений, которая хорошо согласуется со схемой из классической работы по Белому морю [21, с. 124]. Зимой скорости и направления течений несколько отличаются от периода открытой воды, а в районе устьевых областей рек, где находятся порты Белого моря, эти различия существенны [22].

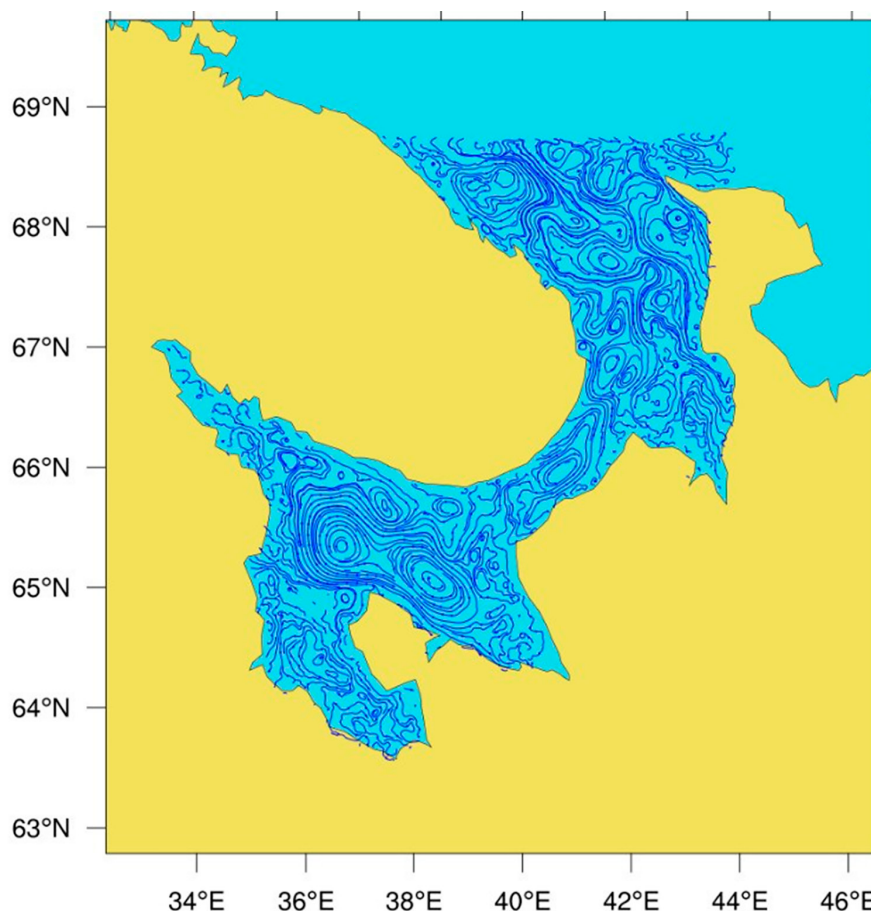


Рис. 1. Схема поверхностных течений Белого моря, среднегодовые модельные данные
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

Если рассматривать квазипостоянные течения (термохалинные, ветровые, дрейфовые, остаточные приливные), видно (рис. 1), что генеральная система движения для Белого моря – против часовой стрелки. Скорости сильно отличаются в зависимости от района моря [21, с. 125-126]: от 0,1 м/с в мелких губах до 0,5-0,8 м/с в проливах и возле мысов, максимально до 3 м/с. В Белом море есть квазипостоянные вихревые образования, как циклональные, так и антициклональные (рис. 1), фронтальные зоны, связанные с действием прилива и стоком крупных рек.

Пассивная примесь переносится течениями, которые, в свою очередь, обусловлены воздействием ветра, приливной циркуляцией и, в меньшей степени, другими факторами. Оказывает влияние ледовый режим. В данном исследовании сделано оправданное с точки зрения методологии допущение: если в численной модели адекватно воспроизводится картина течений, ветер и лед,

то можно считать, что перенос примеси также будет в целом отражать реальность.

Была смоделирована ситуация утечки сырой нефти в шести портах Белого моря, начиная с 1 января для 2010 года (рис. 2). 2010 год выбран, поскольку для него в базе ИВПС КарНЦ РАН [20] содержится наиболее подробная информация, на основе которой верифицировалась модель, и результаты представлены в [15].

Видно (рис. 2), что, согласно модельным расчетам, из порта Архангельск (1) пятно нефти за 10 дней будет распространяться на север. Поскольку в Двинском заливе действует сильное течение, сформировавшееся под действием влияния стока крупнейшей реки, впадающей в Белое море – Северной Двины, общая система течений Белого моря прижимает пятно к правому берегу. Интервал времени в 10 суток выбран произвольно для демонстрации возможностей модели. Расчет выполнялся по-существу на период 10 лет.

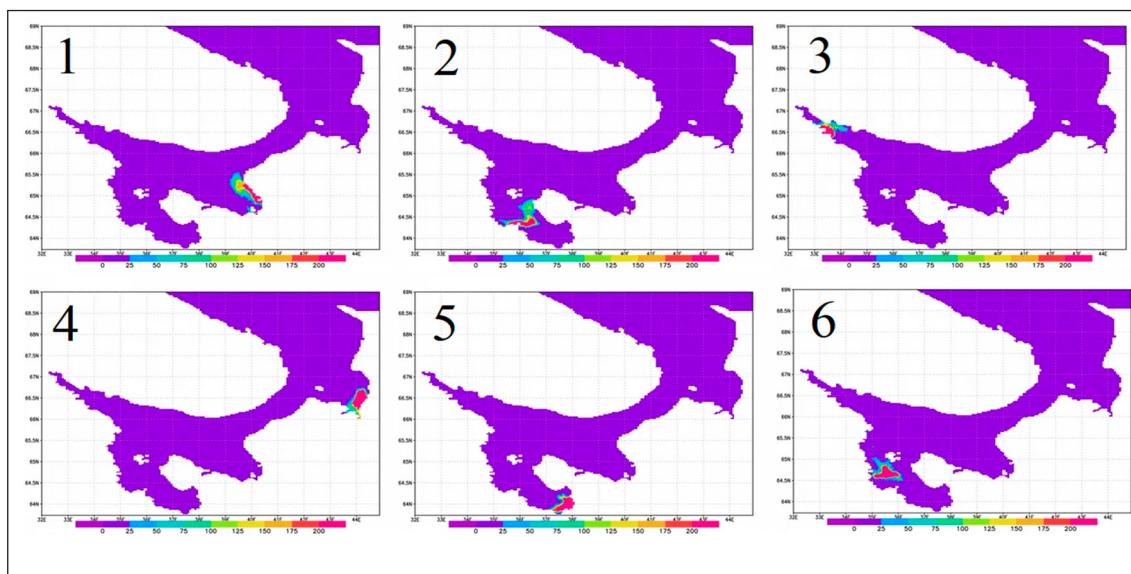


Рис. 2. Распространение нефтяного пятна из портов Белого моря на 10-е сутки после разлива (1 – Архангельск, 2 – Беломорск, 3 – Кандалакша, 4 – Мезень, 5 – Онега, 6 – Кемь)
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

Учитывая систему течений в Онежском заливе, пятно из порта Беломорск (рис. 2 (2)) в первую очередь будет стремиться на юг, при этом размываясь и растягиваясь на мелководье, встречая сопротивление во фронтальной зоне центральной части залива, где происходит изменение его формы, и часть вещества направляется на север. От Кандалакши (3) пятно нефти достаточно быстро распространяется на юг, но в то же время «растаскивается» течениями вдоль берега, а какая-то часть может попасть в квазипостоянный вихрь на границе Кандалакшского залива и Бассейна. Кроме этого, Кандалакшский залив и Бассейн – наиболее глубокие районы моря. Если примесь достаточно быстро оседает на дно (не в случае нефти), то значительная его часть будет захораниваться в глубоководных участках, в меньшей степени попадая на берега.

Гипотетический разлив нефти в Мезенском заливе (4) менее опасен для центральной части моря, поскольку течения направят его на север в сторону Воронки вдоль правого берега, однако, учитывая квазипостоянные вихри Воронки, часть вещества снова может попасть в Горло, а следовательно, оказаться в центральной части моря, в Бассейне. Причем распространение пятна загрязнителя здесь происходит быстрее по сравнению с другими заливами, поскольку скорости течений в этом районе

моря высокие. В районе устьевой области р. Онеги (5) действует своеобразная гидродинамическая ловушка, о которой авторы сообщали ранее [14], и вещество здесь может удерживаться в течение многих месяцев и даже лет. Поэтому данный район можно назвать наиболее уязвимым в Белом море. Об этом также свидетельствуют исследования [9; 10]. Пятно из порта г. Кемь (п. Рабочеостровск) (6) в целом ведет себя так же, как из г. Беломорска. Оно в большей степени распространится на юг, загрязняя Онежский залив. Однако в зоне действия фронтальных зон, расположенных в проливах Соловецкие Салмы, часть вещества задержится возле Соловецкого архипелага.

Таким образом, аварии в портах Кемь и Беломорск, вероятно, могут причинить наибольший ущерб прибрежным экосистемам Белого моря, поскольку примесь последовательно будет проходить из Онежского залива, надолго в нем задерживаясь, далее распространяться в Бассейн, Двинский залив, Горло, смещаясь течениями в сторону берега.

Наибольший интерес представляет моделирование распространения мазута, поскольку его попадание в море более вероятно, по сравнению с сырой нефтью. Был рассмотрен случай утечки мазута марки М-100 у островов Осинки в Онежском заливе в 2003 г. [1, с. 33-34], и данная авария была смоделирована и показано ее влияние на другие районы моря (рис. 3).

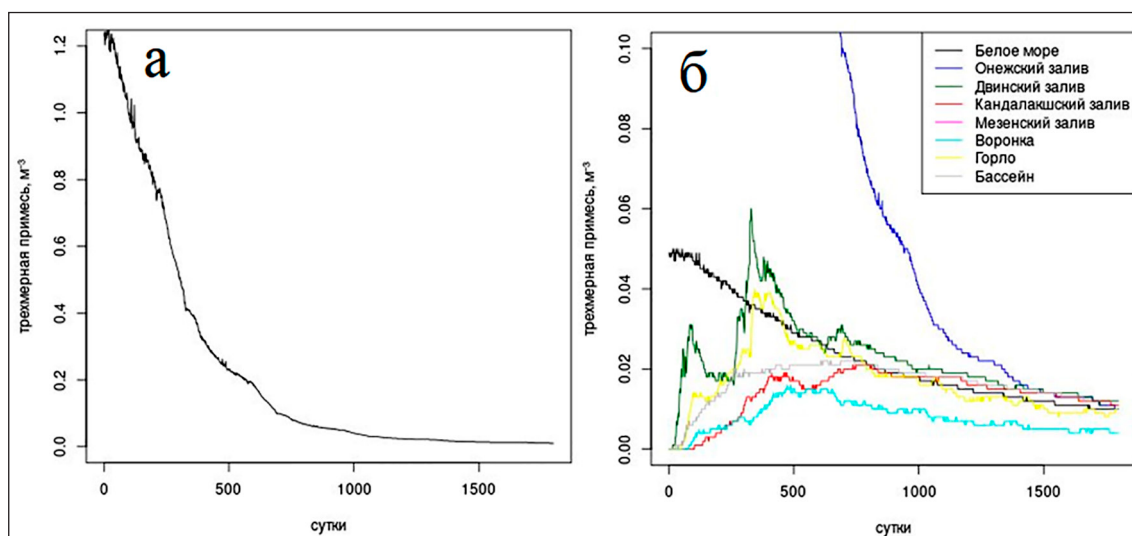


Рис. 3. Концентрация трехмерной примеси (мазута) в Онежском заливе (а) и в различных районах моря после его попадания из Онежского залива (б)
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

В данной работе авторы не ставили своей задачей показать воздействие на экосистемы Белого моря, оценки этих процессов представлены, например, в [9; 10]. Здесь авторы показывают только модельный перенос мазута, удержание и вынос пятна, учитывая его частичное оседание на дно.

На графике левой части рисунка 3а видно, что время нахождения мазута в Онежском заливе, после его попадания в этот залив, составит почти 5 лет. Это самый большой срок по сравнению с другими районами моря (рис. 3б).

В работах [9; 10] показано, через 2 года после аварии 2003 г. сгустки мазута еще находились на мелководье и побережье залива, несмотря на то что примерно 9 т было собрано в первый год. В течение еще нескольких лет следы мазута обнаруживались. В 2012 г. была проведена экспедиция [10], результаты которой показали, большая часть мазута к этому времени утилизирована. Тем не менее локальные источники вторичного загрязнения фиксировались на западном берегу Онежского залива и в 2013 г.

Согласно расчетам (рис. 3б), вещество из Онежского залива попадет в Бассейн и Двинский залив. Изначально концентрация мазута в Онежском заливе после аварии высокая, поэтому синяя линия резко отличается от остальных. Учитывая размеры и объем воды каждого района, для Двинского залива загрязнение скажется более остро по сравнению с Бассейном, что и наблюдаем на графиках. Часть мазутного

пятна из Двинского залива может попасть в Бассейн, кроме этого, сам загрязнитель может поступать в соседний залив порциями. Это видно по второму пику графика для Двинского залива (рис. 3б). Так, концентрация вещества, понизившись до $0,02 \text{ м}^3$, затем снова повышается до $0,06 \text{ м}^3$ и далее продолжает равномерно снижаться через 2 года с момента аварии до полного очищения залива через несколько лет. Это хорошо согласуется с данными наблюдений [10]. Из Горла пятно нефтепродуктов следует в Мезенский залив и Воронку. По мере разбавления концентрация мазута в Горле и Воронке последовательно снижается. Для Онежского залива концентрация понизится до значения $0,02 \text{ м}^3$ только на 4-й год, а до полного очищения залива должен пройти еще около 1 года. По черной линии на рисунке 3б понятно, что авария в Онежском заливе оказывает значительное влияние на весь водоем, поскольку время нахождения мазута в море в любом случае исчисляется годами. Согласно модельным расчетам, все районы Белого моря испытали воздействие утечки мазута в 2003 г.

Заключение

Воспроизведено распределение нефтяного пятна из портов Белого моря. При критическом отсутствии данных наблюдений представлены трассеры и время распространения данного вида загрязнителя из портов Белого моря на 10-е сутки после разлива, тенденции перемещения пятна

нефти. Показано, что наибольшую опасность в плане утечек мазута и нефти представляет Онежский залив. Загрязнитель из этого района моря будет последовательно проходить из самого залива, надолго в нем задерживаясь (несколько лет), далее распространяться в Бассейн, Двинский залив, Горло, смещаясь течениями в сторону берега. Была смоделирована авария сентября 2003 г. в Онежском заливе, когда в воду поступило 54 т мазута, и рассмотрено влияние этой аварии на все районы моря. Согласно модельным расчетам, после аварии мазут находился в Онежском заливе около 5 лет, результаты согласуются с данными, имеющимися в открытых источниках. Представление нефти как плавучей примеси, а мазута как трехмерной примеси при моделировании оправдано с точки зрения учета их распространения в морской среде в зависимости от характера течений и ветровых условий. Программный комплекс JASMINE позволяет задавать концентрацию вещества и скорость его осаждения.

Список литературы

1. Бамбуляк А., Францен Б. Транспортировка нефти из Российской части Баренцева моря по состоянию на январь 2005 года // Отчет. Сванхвд Экологический центр. 2005. 92 с. URL: https://www.nhm.uio.no/kunnskapsunivers/zoologi/fugl/ringmerking/PDF/Oil_Report_Russian_net.pdf (дата обращения: 28.08.2025).
2. Александрова А.Г., Александрова Н.В. Нефтяные загрязнения на морской поверхности (моря Западной Арктики) // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2023. Т. 9(19). Вып. 1. С. 221-231. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/neftnyanye-zagryazneniya-na-morskoy-poverhnosti-morya-zapadnoy-arktiki> (дата обращения: 28.08.2025).
3. Зацепя С.Н., Ивченко А.А., Книжников А.Ю., Солбаков В.В. Подход к анализу гидрометеорологических условий, определяющих задержку в реагировании на морские разливы нефти в Арктической зоне Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. 2023. Т. 13. № 3. С. 369-381. URL: <http://arctica-ac.ru/article/647/> (дата обращения: 28.08.2025). DOI: 10.25283/2223-4594-2023-3-369-381.
4. Bonvicini S., Bernardini G., Scarponi G. E., Cassina L., Collina A., Cozzani V. A methodology for Response Gap Analysis in offshore oil spill emergency management. *Marine Pollution Bulletin*. 2022. Vol. 174. P. 113272. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35090267/> (дата обращения: 28.08.2025). DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.113272.
5. Немировская И.А., Флинт М.В. Особенности поведения органических соединений в воде и донных осадках в Карском море во время схода сезонного льда // Океанология. 2022. Т. 62. № 1. С. 64-74. URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=danzem&y=2021&v=498&n=1&a=DA NZem2105012Nemirovskaya> (дата обращения: 28.08.2025). DOI: 10.31857/S0030157422010117.
6. Глязнецова Ю.С., Немировская И.А., Флинт М.В. Изучение последствий аварийного разлива дизельного топлива в Норильске // Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле. 2021. 501(1) С. 113-118. URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=danzem&y=2021&v=501&n=1&a=DA NZem2111005Glyazentsova> (дата обращения: 28.08.2025). DOI: 10.31857/S2686739721110050.
7. Немировская И. А., Храмцова А. В. Углеводороды в поверхностном микрослое и льдах Карского моря // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 508. № 1. С. 44-49. EDN: GBIIHZ. URL: <https://journals.rcsi.science/2686-7397/article/view/135711/113645> (дата обращения: 28.08.2025). DOI: 10.31857/S2686739722601739.
8. Гончаров В.К. Исследование взаимодействия нефти с морским ледовым покровом // Прикладная механика и техническая физика. 2023. Т. 64. № 1. URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/4e0/4e067114a22d07e070477ba-0f57a4bcd.pdf> (дата обращения: 28.08.2025). DOI: 10.15372/PMTF202215112.
9. Андрианов В.В., Лукин Л.Р., Лебедев А.А., Неворова Н.В. Долговременные последствия аварийного разлива нефтепродуктов в южной части Онежского залива Белого моря // Биология моря. 2016. Т. 42. № 3. С. 169-178. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/posledstviya-avariynogo-razli-va-nefteproduktov-v-yuzhnoy-chasti-onezhskogo-zaliva-belo-go-morya> (дата обращения: 28.08.2025).
10. Воробьева Т.Я., Неворова Н.В., Андрианов В.В. Оценка долговременных последствий загрязнения мазутом прибрежных сообществ в Онежском заливе Белого моря // Биология моря. 2020. Т. 46. № 3. С. 191-199. URL: <https://new.ras.ru/upload/iblock/c24/xmalyszy1bwxcg80phl9g93p7ei-75wdj5.pdf> (дата обращения: 28.08.2025). DOI: 10.31857/S0134347520030122.
11. Совершенствование системы реагирования на аварийные разливы нефти и нефтепродуктов в арктических условиях для защиты особо чувствительных к нефтепродуктам прибрежных районов (на примере Баренцева и Белого морей) // Технический отчет. Т. 1. Мурманск: ООО «Рамболь Баренц». 2010. 218 с. URL: https://archive.iwlearn.org/npa-arctic.xwlearn.org/Documents/demos/new/rprts/models_white-sea-os.pdf (дата обращения: 28.08.2025).
12. Шильникова Е. А., Рослякова О.В. Процесс моделирования разложения нефтепродуктов в воде // Научные проблемы водного транспорта. 2023. № 75(2). DOI: 10.37890/jwt.vi75.380. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/protsess-modelirovaniya-razlozheniya-nefteproduktov-v-vode> (дата обращения: 28.08.2025).
13. Шалымова А.Е., Исахов А.А. Численное моделирование распространения нефти и нефтепродуктов при аварийном разливе на водной поверхности // Вестник Казахстанско-Британского технического университета. 2024. 21(2) С. 139-151. URL: <https://vestnik.kbtu.edu.kz/jour/article/view/1261> (дата обращения: 28.08.2025). DOI: 10.55452/1998-6688-2024-21-2-139-151.
14. Чернов И.А., Толстиков А.В. Численное моделирование распространения пассивных примесей в Белом море // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 3. С. 21-27. URL: <http://www.envjournal.ru/ari/v2023/v3/23302.pdf> (дата обращения: 28.08.2025). DOI: 10.25750/1995-4301-2023-3-021-027.
15. Chernov I., Lazzari P., Tolstikov A., Kravchishina M., Iakovlev N. Study Hydrodynamical and biogeochemical spatio-temporal variability in the White Sea: A modeling // *Journal of Marine System*. 2018. Vol. 187. P. 23-35. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924796317300672> (дата обращения: 28.08.2025). DOI: 10.1016/j.jmarsys.2018.06.006.
16. Яковлев Н.Г. О воспроизведении полей температуры и солености Северного Ледовитого океана // Известия РАН. 2012. ФАО. Т. 48. № 1. С. 100-116.
17. Meier H.E.M., Höglund A. Studying the Baltic Sea Circulation with Eulerian Tracers // Soomere T., Quak E. Preventive Methods for Coastal Protection. 2013. Springer, Heidelberg. P. 101-129. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-00440-2_4 (дата обращения: 28.08.2025). DOI: 10.1007/978-3-319-00440-2_4.
18. Gent P.R., McWilliams J.C. Isopycnal mixing in ocean circulation models // *Journal of Physical Oceanography*. 1990.

№20 (1). P. 150-155. URL: https://pordlabs.ucsd.edu/pcessi/theory2016/gent_mcowilliams_90.pdf (дата обращения: 28.08.2025).

19. The NOAA Physical Sciences Laboratory (PSL). NCEP-NCAR Reanalysis 1. [Электронный ресурс]. URL: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> (дата обращения: 28.08.25).

20. Толстиков А.В., Филатов Н.Н., Богданова М.С., Литвиненко А.В., Карпечко В.А., Дерусова О.В., Балаганский А.Ф. Электронный атлас Белого моря и его водосбора // База данных. Свидетельство о государственной регистрации № 2017620252 от 01 марта 2017.

21. Глуховский Б.Х. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР // Справочник «Проект «Моря СССР». Белое море. Т. II. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеиздат. 1991. 240 с.

22. Демиденко Н.А. Динамика взвешенного вещества и динамика седиментации в макроприливных эстуариях Мезени и Кулоя // Известия РАН. Серия географическая, 2022. Т. 86. № 6. С. 1002-1022. EDN: OOMYUG. URL: <https://science-journals.ru/view-article/?j=izvgeo&y=2022&v=86&n=6&a=IzvGeo2206004Demidenko> (дата обращения: 28.08.2025). DOI: 10.31857/S2587556622060048.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Данное исследование выполнено в рамках государственного задания Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН по теме № FMEN-2021-0004 «Комплексные исследования Белого моря и водосбора в интересах развития Арктической зоны РФ».

Financing: This study was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Water Problems of the North of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences on topic No. FMEN-2021-0004 “Comprehensive studies of the White Sea and watershed in the interests of the development of the Arctic zone of the Russian Federation”.