

Численное моделирование распространения пассивных примесей в Белом море

© 2023. И. А. Чернов¹, к. ф.-м. н., с. н. с.,

А. В. Толстиков², к. г. н., с. н. с., руководитель лаборатории,

¹Институт прикладных математических исследований Карельского НЦ РАН, 180001, Россия, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11,

²Институт водных проблем Севера Карельского НЦ РАН, 185030, Россия, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, д. 50, e-mail: iachernov@yandex.ru, alexeytolstikov@mail.ru

При отсутствии возможности наблюдений переноса потенциально опасных примесей в акватории моря для расчёта рисков с успехом применяется численное моделирование. В Белом море, транспортном узле и стратегически важном объекте для добычи природных ресурсов, необходимо иметь сценарии развития ситуаций, когда загрязняющие вещества попадают в его воды. Модельный комплекс JASMINE, содержащий блок переноса примесей, способен помочь ответить на ряд вопросов, связанных с распространением загрязнителей и любых пассивных примесей, то есть веществ, не влияющих на плотность воды и динамику вод и льда в Белом море. Выполнены численные эксперименты, показывающие распространение плавучих примесей в акватории Белого моря от дельта-источников, расположенных в устьях крупных рек, а также расчёт сроков освобождения моря от плёнок загрязняющих веществ, изначально равномерно покрывающих всю акваторию. Показано, что сроки выноса поллютантов определяются морфометрическими особенностями залива. Обмен веществом между заливами крайне мал, за исключением переноса Онежский-Двинский-Мезенский, который согласуется с картиной геострофических течений.

Ключевые слова: примеси, адвективный перенос, численное моделирование, Белое море, JASMINE.

Numerical simulation of the passive tracer advection in the White Sea

© 2023. I. A. Chernov¹ ORCID: 0000-0001-7479-9079[†]

A. V. Tolstikov² ORCID: 0000-0002-7690-3404[†]

¹Institute of Applied Mathematical Research of Karelian Research Center of RAS, 11, Pushkinskaya St., Petrozavodsk, Russia, 180001,

²Northern water problems institute of Karelian Research Center of RAS, 50, Nevskogo Avenue, Petrozavodsk, Russia, 185030, e-mail: iachernov@yandex.ru, alexeytolstikov@mail.ru

It is hardly possible to make experiments on transport of potentially dangerous tracers in a sea. Therefore numerical simulation is successfully used to assess the risks and consequences of various events like oil spills, flux of toxicants with river runoff after industrial accidents or phytoplankton in case of harmful algae bloom. As the White Sea is a transport hub and a strategically important location for extraction of natural resources, so it is important to know the most likely scenarios of pollutants behavior. The JASMINE numerical model, based on the FEMA0 (Finite-Element Model of the Arctic Ocean) simulates evolution of sea state, including three-dimensional currents, temperature and salinity, and sea ice, and is able to calculate tracer advection, so giving answers to a number of questions related to how pollution evolves in the White Sea. We describe numerical experiments to study advection of floating tracers in the White Sea when the initial distribution is delta-like and located in the mouths of main rivers. Also, we calculate the time of almost complete removal of an initially homogeneous concentration of a passive tracer. Spatial resolution is 3 km, vertical grid is 5 m down to the depth level of 150 m (10 m for depths more than 150 m). The time step is 360 s. NOAA/NCEP atmospheric reanalysis is used for atmospheric forcing. Five main rivers are taken into account with the monthly-mean runoff taken from the multi-year observation data. We have estimated the time needed to remove most of the matter from the sea; it depends on morphometric characteristics of the bays and is the highest for the Onezhskiy bay. Matter exchange between the bays is low, only Dvinskiy-Onezhskiy-Mezenskiy transport is present, as we would expect from the geostrophic current pattern.

Keywords: passive tracer, advection, numerical simulation, the White Sea, JASMINE.

Исследование переноса примесей различной природы в море с помощью трёхмерного численного моделирования важно для прогнозирования, например, последствий разливов нефти, утечки радиоактивных веществ из могильников, выяснения путей распространения загрязняющих веществ (ЗВ). Зная источник распространения вещества, его концентрацию, физические свойства (плёнка, трёхмерная примесь и т. д.) и динамику течений водоёма, относительно просто рассчитать пространственно-временную динамику трасера и, в частности, адвекцию трёхмерными течениями. Кроме оценки уронов, нередко возникают задачи расчётов распространения определённых видов живых организмов внутри отдельно взятого водоёма или между водоёмами [1].

Белое море представляет собой удобный полигон для отработки методов численного моделирования, поскольку это относительно небольшой полузамкнутый водоём, к тому же достаточно хорошо исследованный [2].

При моделировании переноса примесей в Белом море остро встаёт вопрос о верификации моделей. Данных по зарегистрированным утечкам нефти или других опасных веществ для этого водоёма объективно недостаточно, но опасность развития таких событий всегда сохраняется. Одними из самых уязвимых районов в этом отношении являются крупные порты Белого моря (рис. 1): Архангельск, Онега, Кандалакша, Беломорск, Кемь, Мезень [3, 4]. Поэтому для разработки алгоритмов действий в чрезвычайных ситуациях при опасности развития экологических катастроф важно иметь сценарии перемещения ЗВ из портов при различных условиях (в зависимости от структуры загрязнителя, его концентрации, сезона, направления ветра и т. д.). Численное моделирование переноса пассивных примесей успешно вписывается в программу современных задач мониторинга водных объектов [5]. Моделированию примесей в водоёмах посвящён ряд работ [6–15], в которых рассматриваются подходы к численному воспроизведению переноса ЗВ. Например, перенос нефтяных пятен [16, 17], ртути [18], радиоактивных веществ [19].

Программный комплекс JASMINE [20–21] позволяет моделировать распространение различных видов примесей, под которыми понимаются любые компоненты органической или неорганической природы, входящие в состав водной среды. Примеси могут быть плавучими, то есть сосредоточенными на поверхности моря и переносимыми горизонтальными течениями

по той же схеме, что и поля, описывающие морской лёд; трёхмерными с нулевой плавучестью (аналогичными, например, солёности); тонущими (обладающими вертикальной скоростью относительно воды – к ним относятся органические останки (детрит); с заданной плотностью (такие примеси могут тонуть в менее плотной воде и всплывать в более плотной). Пассивные примеси (не оказывающие влияния на динамику вод и льда) могут также меняться в силу воздействия различных процессов, а не только перемешиваться течениями: так, биогеохимические поля взаимодействуют в рамках модели экосистемы комплекса JASMINE, компоненты экосистемы морского льда обмениваются веществом с пелагиалью, примеси могут преобразовываться в ходе химических реакций и под воздействием живых организмов.

Моделирование переноса вещества из устьев крупных рек, впадающих в Белое море, проводилось с целью выделения участков акватории, подверженных наибольшему воздействию ЗВ, поступающих с водосбора. Рабочая гипотеза заключалась в том, что время нахождения ЗВ в Белом море будет зависеть от морфометрических особенностей района и устойчивости фронтальных зон, которые, в свою очередь, подвержены внутригодовой изменчивости.

Выполнены модельные расчёты переноса примесей (поверхностных и трёхмерных) в Белом море. Рассмотрены варианты распространения твёрдых примесей, нефти. Результаты экспериментов помогают проследить миграцию веществ в заливах Белого моря и открытых участках акватории.



Рис. 1. Берега и районы Белого моря
Fig. 1. Coasts and parts of the White Sea

Цель работы: с помощью численного моделирования определить сроки и концентрации загрязняющих веществ в Белом море при их поступлении с водосбора с речным стоком.

Объекты и методы исследования

Объектом является поверхностный слой Белого моря, предметом – распространение твёрдых примесей от устьев крупных рек.

Модельный комплекс JASMINE, основанный на конечно-элементной модели Северного Ледовитого океана FEMAO [24, 25], описан в работах [20, 21]. Он позволяет воспроизводить поля течений, температуры и солёности, различных характеристик морского льда. Рабочее разрешение для Белого моря улучшено (по сравнению с упомянутыми работами) до 3 км по горизонтали (море вписано в квадрат 200 на 200 узлов сетки), сетки по вертикали насчитывают 40 горизонтов (используется z-координата и свободная поверхность моря). Шаг по вертикальной оси 5 м, на глубинах более 150 метров шаг составляет 10 м. Условие Флезера на открытой границе обеспечивает сохранение среднего (за достаточно большое время) объёма жидкости. Реки описаны как пресноводные проливы с заданным среднемесячным потоком воды, в них задаётся температура воды и концентрации пассивных примесей. Используются данные по рекам водосбора Белого моря из имеющейся базы [26, 27].

Вычисление переноса скаляров реализовано одношаговым методом Ньютона–Галёркина с коррекцией потоков, обеспечивающим квазимонотонность схемы на приемлемом уровне. К числу скаляров относятся температура и солёность, а также пассивные примеси произвольной природы. Двумерные скалярные поля – это лёд и плавучие примеси произвольной природы.

При переносе примесей необходимо задавать граничные условия на «жидких границах» и в устьях рек. В Белом море одна «жидкая граница» (с Баренцевым морем). Граничное условие для трёхмерного переноса относится к типу Флезера, так что вытекающая вода имеет вычисленную концентрацию примесей, а втекающая – некоторую заданную. Это граничное значение равно нулю, что имеет физический смысл быстрого рассеивания примесей в граничащем с Белым морем Баренцевом море, так что возврат вещества в Белое море отсутствует. Это оправдано, так как баланс водообмена смещён в сторону вы-

текания [6], что подтверждается и в модели: испарение и осадки практически точно компенсируют друг друга, так что годовой водообмен Белого моря практически совпадает с годовым стоком рек.

Однако примеси, изначально сосредоточенные близко к «жидкой границе», исчезают слишком быстро: по-видимому, сроки очищения моря от таких примесей в модели занижены. Если изначально примеси сконцентрированы западнее Горла (рис. 1), влияние границы уже не так значительно.

В реках заданы постоянные концентрации примесей, так что явно описан поток вещества с речным стоком (в частности, нулевой, если в речной воде примеси отсутствуют).

Для плавучих примесей условия задаются иначе. На границе Белого и Баренцева морей условие при втекании воды означает, что концентрация примесей по обе стороны границы одна и та же, то есть при втекании воды концентрации не меняются. Условие проверено для льда и хорошо себя зарекомендовало [7]. Поток плавучих веществ с речным стоком возможен, но, в отличие от трёхмерных примесей, концентрации не уменьшает даже чистая вода: плавучие вещества просто всплывают.

Модельный комплекс JASMINE удовлетворительно воспроизводит динамику и биогеохимические процессы в Белом море, температурные и солёностные поля, фронтальные зоны согласуются с данными измерений [4].

Все модельные данные верифицируются по результатам многолетних исследований Белого моря ИВПС КарНЦ РАН и отражены в работах [5, 8].

Результаты и обсуждение

С помощью численного моделирования на программном комплексе JASMINE был рассмотрен модельный сценарий одновременного поступления ЗВ из устьев рек: Северная Двина, Онега, Мезень, Кемь и Ковда. Моделирование проводили на произвольно взятый период 2015–2017 гг., начиная с 1 января 2015 г., с целью отследить внутригодовую динамику. Исследовали модельные двумерные и трёхмерные примеси, распространяющиеся по поверхности Белого моря без источников и стоков и при нулевых граничных значениях (нет источников на границах).

Различные пассивные примеси изначально были сосредоточены в одном узле сетки (отвечающем устью реки) каждая. Размерность концентрации не влияет на динамику, поэтому

играет роль только относительное её изменение. Начальная концентрация выбрана 100 единиц на 1 м². Под очисткой каждого района моря от примесей подразумеваем снижение концентрации в 20 и более раз (до 5 ед. на 1 м² и менее). Расчёт динамики концентрации этих полей на срок несколько десятков месяцев выявил следующие процессы.

Самый опасный район по накоплению загрязнителей – Онежский залив. Вещество, поступающее сюда либо с водосбора с течением р. Онега, либо проникающее через проливы Соловецкие салмы удерживается здесь длительное время (несколько месяцев). Из Двинского залива ЗВ, наоборот, удаляются достаточно быстро вдоль восточного берега (1–2 месяца). В Кандалакшском заливе водообмен также происходит быстро (1 месяц). В Мезенском заливе этот период аналогично составляет около 1–2 месяцев, однако, учитывая небольшое расстояние от устья р. Мезень до Воронки (около 100 км), вещество покидает этот залив в течение длительного периода времени (по сравнению с другими районами моря).

Параллельно рассчитывалась динамика концентрации, изначально равномерной по

акватории; это соответствует загрязнению всего моря тонкой плёнкой вещества.

Общая последовательность такова: 1) распределение концентрированных примесей по акватории всего моря в поверхностном слое; 2) снижение концентрации в Кандалакшском и Двинском заливах; 3) вещество выносится из моря, но концентрация остаётся заметной в Онежском и Мезенском заливах, у Терского берега. При смене ветра пятно примесей может кратковременно заноситься в Кандалакшский, либо в Двинский залив. В Онежском и Мезенском заливах концентрация выше, чем в соседних районах, вплоть до полного рассеивания вещества. Эксперимент проводили с целью поиска зон длительного удержания поллютантов в акватории Белого моря.

На основании полученных данных была построена схема границ распространения вещества, поступающего с речным стоком (рис. 2).

Показанные границы изменяются в зависимости от сезона года. Так, весной, при наблюдающемся половодье на реках водосбора Белого моря, а также после паводков границы смещаются в мористую часть, при летней и зимней межени – к устьям рек.

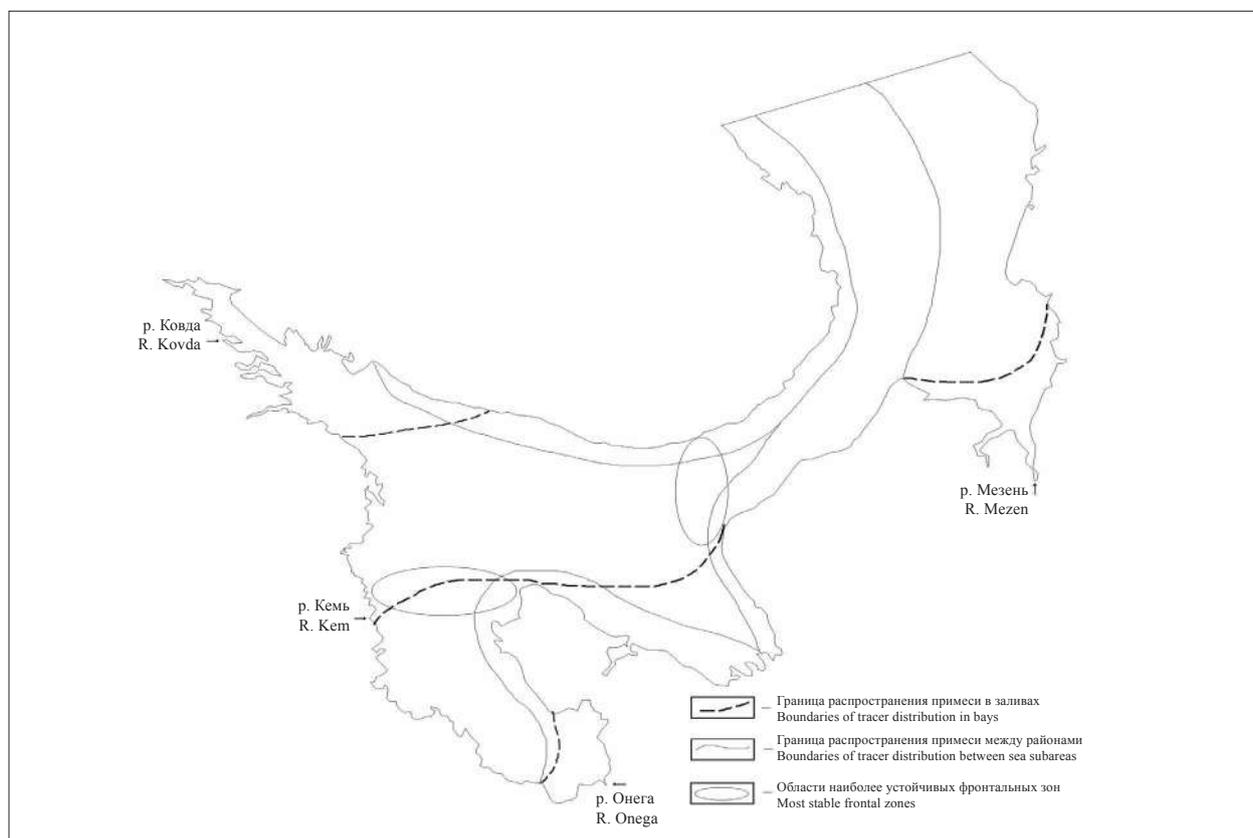


Рис. 2. Границы распространения вещества, поступившего в Белое море с речным стоком рек Северная Двина, Онега, Мезень, Кемь и Ковда
Fig. 2. Boundaries of tracer distribution that entered the White Sea with the river flow of the Northern Dvina, Onega, Mezen, Kem' and Kovda rivers

И. А. Чернов, А. В. Толстик
«Численное моделирование распространения
пассивных примесей в Белом море». С. 21.

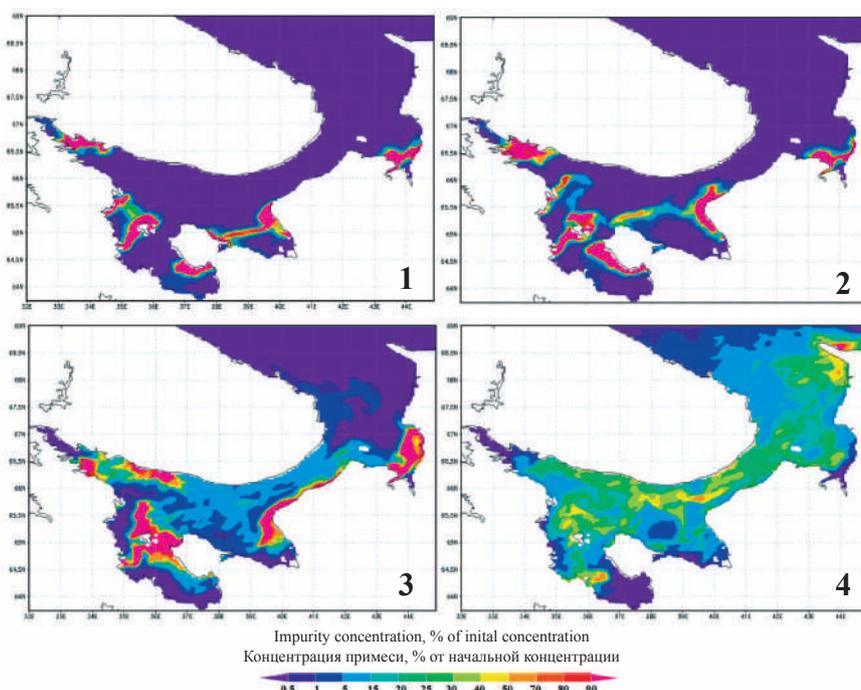


Рис. 3. Распространение примесей из устьев пяти рек (Северная Двина, Онега, Мезень, Кем', Ковда), в процентах от начальной концентрации. Расчёт: 1) 31 января 2015 г.; 2) 25 февраля 2015 г.; 3) 21 апреля 2015 г.; 4) 20 июля 2015 г.

Fig. 3. Propagation of tracers initially concentrated in mouths of five rivers (Northern Dvina, Onega, Mezen, Kem', Kovda), percent of the initial concentration. Map is for: 1) Jan 31, 2015; 2) Feb 25, 2015; 3) Apr 21, 2015; 4) Jul 20, 2015

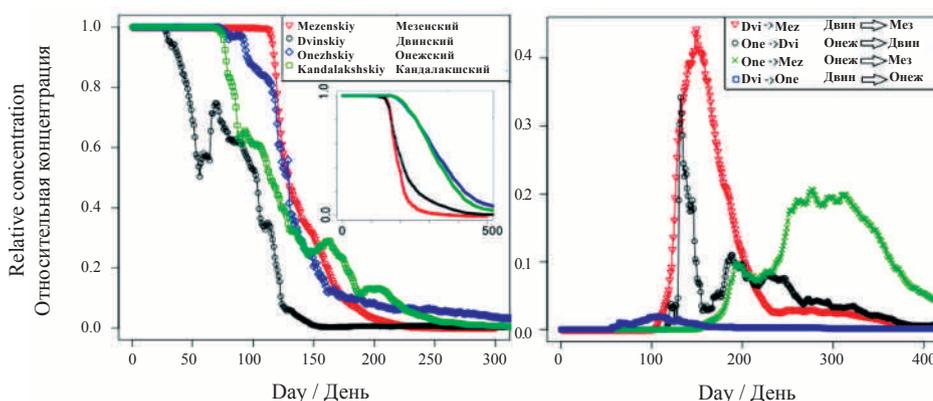


Рис. 4. Слева: поверхностная концентрация плавучих примесей, средняя по акватории залива, в зависимости от времени (сутки), для Мезенского, Двинского, Онежского и Кандалакшского заливов, доля от начальной концентрации. Справа: поверхностная концентрация плавучих примесей, средняя по акватории одного залива относительно начальной концентрации, средней по акватории другого залива; показывает перенос примесей из залива в залив: из Двинского в Мезенский, из Онежского в Двинский и Мезенский, из Двинского в Онежский

Fig. 4. Left: surface concentration of floating tracer, bay-mean, relative to the initial concentration, as a function of time (days) for Mezenskiy, Dvinskiy, Onezhskiy, and Kandalakshskiy bays. Right: surface concentration of floating tracer, bay-mean, relative to initial bay-mean concentration, with initial distribution concentrated in another bay; demonstrates matter exchange between the bays: Dvinskiy-Mezenskiy, Onezhskiy-Dvinskiy, Ontzhskiy-Mezenskiy, and Dvinskiy-Onezhskiy

Полученные данные распространения модельного вещества согласуются с результатами работ [9, 10], в которых выделены районы экологического воздействия на акваторию Белого моря.

Ниже приведены несколько карт для разных дат, показывающие распространение плавучих модельных примесей на поверхности (рис. 3, см. цв. вкладку I).

На рисунке 3 видно, что примеси накапливаются согласно приведённой схеме (рис. 2). Хорошо выделяется фронт в Онежском заливе, границы распространения в Кандалакшском и Двинском заливах, шлейф проникающего вещества из Онежского залива в Двинский и из Двинского залива в Горло, границы в Мезенском заливе. Максимальные концентрации ЗВ прослеживаются у правых берегов заливов или сосредоточены вдоль фронтальных зон, что отражено на рисунке 2.

Актуальной представляется задача определения путей обмена веществом между районами моря. Для этого были рассчитаны сроки и концентрации веществ во всех заливах Белого моря при распространении пассивных плавучих примесей, изначально сосредоточенных в одном узле сетки. Рассчитывалась динамика относительной концентрации. На рисунке 4 (см. цв. вкладку I) слева приведена динамика средней по заливу концентрации как функции времени (в сутках), на врезке показана концентрация, осреднённая по всей акватории моря (этот график позволяет сравнить темпы выноса вещества из моря). Справа показана динамика средней по заливу концентрации примесей, сосредоточенной в другом заливе (относительно начальной средней плотности по его акватории). Она позволяет оценить перенос вещества между заливами. Так, значительная доля вещества, ожидаемо, перетекает из Двинского залива в Мезенский, а из Онежского – в Двинский, и далее в Мезенский. Обратный перенос концентрации этого вещества (из Двинского в Онежский) выражен значительно слабее, а обмен между другими заливами вообще практически отсутствует. Также графики демонстрируют, что вещество в Онежском заливе удерживается дольше всего. Интересно, что эффект гидродинамической ловушки, когда веществу легче попасть в Онежский и Мезенский заливы, чем покинуть их, позволяет загрязнителю удерживаться дольше 100 сут в пределах своего района моря и лишь затем относительно быстро распространиться в направлении против часовой стрелки. Для Кандалакшского залива, где свободному

водообмену с Бассейном ничто не препятствует, подобных процессов не наблюдается. Вещество быстро покидает район загрязнения.

Заключение

Выполнен расчёт переноса примесей различной природы и показаны наиболее опасные районы по накоплению загрязняющих веществ, пути и сроки их перемещения в крупных заливах Белого моря и в целом по всему морю.

Подтвердилась гипотеза о влиянии морфометрических особенностей района моря и фронтальных зон. Так, благодаря этим особенностям вещество удерживается в южной части Онежского и Мезенского заливов; быстро разбавляется и покидает Кандалакшский залив; в Двинском заливе возможен возврат вещества после его выноса течениями.

Наиболее опасный район по накоплению вещества – Онежский залив. Вещество, поступающее с течением р. Онега, либо проникающее через проливы Соловецкие салмы, удерживается здесь недели и месяцы. В Кандалакшском заливе водообмен с Бассейном происходит быстро (1 месяц). Из Двинского залива загрязняющие вещества удаляются достаточно быстро вдоль восточного берега (1–2 месяца). В Мезенском заливе этот период аналогично составляет около 1–2 месяцев, но, учитывая небольшое расстояние от устья р. Мезень до Воронки стоит отметить, что вещество покидает этот залив в течение длительного времени.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-27-20014, проводимого совместно с органами власти Республики Карелия с финансированием из Фонда венчурных инвестиций Республики Карелия (ФВИ РК).

Литература

1. Евсеенко С.А., Мишин А.В. О распределении личинок и локализации нерестовых стад беломорской сельди *Clupea pallasii marisalbi* // Вопросы ихтиологии. 2011. Т. 51. № 6. С. 809–821.
2. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / Под ред. Н.Н. Филатова, А.Ю. Тержевика. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 335 с.
3. Кадашова Н.А. Антропогенная нагрузка на водосборе Белого моря // Известия РАН. Серия географическая. 2007. № 2. С. 104–112.

4. Матишов Г.Г., Дженюк С.Л., Булавина А.С. Интегральная оценка потенциального воздействия материкового стока на водную среду Белого моря // Доклады Академии наук. 2018. Т. 481. № 2. С. 203–206.

5. Кутявина Т.И., Ашихмина Т.Я. Современное состояние и проблемы мониторинга поверхностных водных объектов России (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 13–21.

6. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Опыт создания математических моделей, описывающих процессы стока и выноса примесей с водосбора // Общество. Среда. Развитие. 2017. № 1 (42). С. 80–84.

7. Камышников Т.В. Вывод двумерной модели распространения загрязняющих примесей в мелководном водоёме // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск: Актуальные проблемы математического моделирования. 2009. № 8 (97). С. 24–30.

8. Цыденов Б.О. Численное моделирование ветрового воздействия на перенос примеси загрязняющих веществ в Селенгинском мелководье оз. Байкал в период существования осеннего термобара // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2020. № 1. С. 52–56.

9. Зарипов Ш.Х., Марданов Р.Ф., Гильфанов А.К., Шарифудинов В.Ф., Никоненкова Т.В. Математические модели переноса загрязнений в окружающей среде. Казань: Казанский университет, 2018. 47 с.

10. Климок В.И., Дударев А.В. Математическое моделирование динамики пассивной примеси в центральной части озера Селигер // Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2007. № 1 (4). С. 29–36.

11. Жұрбас В.М., Элькен Ю., Вяли Г., Кузьмина Н.П., Пака В.Т. Пути переноса взвешенных частиц в придонном слое южной Балтики в зависимости от ветровых условий (численные эксперименты) // Океанология. 2010. Т. 50. № 6. С. 890–903.

12. Голенко М.Н., Голенко Н.Н. Исследование распространения пассивной примеси и лагранжевых частиц в прибрежной зоне юго-восточной части Балтийского моря // Вестник БФУ им. И. Канта. Серия: естественные и медицинские науки. 2014. Вып. 1. С. 42–50.

13. Шульга Т.Я., Суслин В.В. Исследование эволюции пассивной примеси в поверхностном слое Азовского моря на основе усвоения данных сканера MODIS-Aqua в гидродинамическую модель // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11. № 3. С. 73–81.

14. Пьянова Э.А. Численное исследование влияния водоёма на перенос примеси от точечного источника // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13. Спец. вып. 3. С. 57–63.

15. Сухинов А.И., Никитина А.В., Пескова О.Ю. Математическое моделирование процессов распространения загрязнений и эволюции фитопланктона применительно к акватории Таганрогского залива // Известия ТРТУ. 2001. № 2 (20). С. 32–36.

16. Глухенький И.Ю., Лаврентьев А.В., Попова Г.Г. Моделирование аварийных разливов нефти в Керченском проливе // Безопасность в техносфере. 2011. № 6. С. 3–6.

17. Дембицкий С.И., Лаврентьев А.В., Ларионов А.В., Уртенев М.Х. Динамика нефтяного пятна в море с учётом

процессов деструкции. Математические модели // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2004. № 1. С. 6–10.

18. Макухин В.Л., Потемкин В.Л. Моделирование переноса и трансформации загрязняющих примесей, в том числе ртути, на акватории оз. Байкал // Биосфера. 2012. Т. 4. № 3. С. 286–292.

19. Носов А.В., Крылов А.Л., Арон Д.В., Меркушов В.П. Обзор существующих подходов к моделированию распространения радиоактивных веществ в водных объектах суши в рамках разработки РПК «БАКИС». Препринт № ИБРАЕ-2018-04. М.: ИБРАЭ РАН, 2018. 43 с.

20. Chernov I., Lazzari P., Tolstikov A., Kravchishina M., Iakovlev N. Hydrodynamical and biogeochemical spatiotemporal variability in the White Sea: A modeling study // Journal of Marine Systems. 2018. No. 187. P. 23–35.

21. Chernov I., Tolstikov A., Iakovlev N. Simulating dynamics and ecology of the sea ice of the White Sea by the coupled ice-ocean numerical model // Water. 2022. V. 14. Article No. 2308.

22. Chernov I., Tolstikov A., Baklagin V., Iakovlev N. Winter ice dynamics in a semi-closed ice covered sea: Numerical simulations and satellite data // Fluids. 2022. V. 7. Article No. 324.

23. Чернов И.А., Толстиков А.В., Яковлев Н.Г. Комплексная модель Белого моря: гидротермодинамика вод и морского льда // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 8. С. 116–128.

24. Яковлев Н.Г. К вопросу о воспроизведении полей температуры и солёности Северного Ледовитого океана // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 1. С. 100–116.

25. Яковлев Н.Г. Восстановление крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана в 1948–2002 гг. Часть 2: Состояние ледового и снежного покрова // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 4. С. 1–18.

26. Карпечко В.А., Махальская Н.И., Балаганский А.Ф., Толстиков А.В. Сток рек бассейна Белого моря // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2018621833. Заявление: 2018621418, 08.10.2018. Дата публикации: 19.11.2018. Бюлл. 587.

27. Толстиков А.В., Филатов Н.Н., Здоровеннов Р.Э. Белое море и его водосбор // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2010620435. Заявление: 2010620284, 21.06.2010. Дата публикации: 16.08.2010. Бюлл. 360.

References

1. Evseenko S.A., Mishin A.V. On distribution of larvae and localization of spawning herds of White-sea herring *pallasii marisalbi* // Journal of Ichthyology. 2011. V. 51. No. 6. P. 809–821 (in Russian).

2. The White Sea and its watershed under the influence of climatic and anthropogenic factors / Ed. N.N. Filatov, A.Yu. Terzhevnik. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchniy centr RAN, 2007. 335 p. (in Russian).

3. Kadashova N.A. Anthropogenic load in the watershed of the White Sea // *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. 2007. No. 2. P. 104–112 (in Russian).
4. Matishov G.G., Dzhenyuk S.L., Bulavina A.S. Integrated assessment of the potential impact of the continental runoff on the aquatic environment of the White Sea // *Doklady Akademii nauk*. 2018. V. 481. No. 2. P. 203–206 (in Russian). doi: 10.31857/S086956520001205-8
5. Kut'yavina T.I., Ashihmina T.Ya. Current state and problems of monitoring surface water bodies in Russia (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 2. P. 13–21 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-013-021
6. Kondrat'ev S.A., Shmakova M.V. Experience of runoff and substances transport modeling in catchment // *Society. Environment. Development*. 2017. No. 1 (42). P. 80–84 (in Russian).
7. Kamyshnikova T.V. Derivation of a two-dimensional model of the distribution of contaminants in a shallow water body // *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki. Thematic issue: Actual problems of mathematical modeling*. 2009. No. 8 (97). P. 24–30 (in Russian).
8. Tsydenov B.O. Numerical simulation of the effect of wind on the transport of contaminants in the Selenga shallow waters of Lake Baikal during the autumnal thermal bar // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3. Fizika. Astronomiya*. 2020. No. 1. P. 52–56 (in Russian).
9. Zaripov Sh.H., Mardanov R.F., Gil'fanov A.K., Sharafutdinov V.F., Nikonenkova T.V. Mathematical models of pollution transfer in the environment. Kazan': Kazanskiy universitet, 2018. 47 p. (in Russian).
10. Klimok V.I., Dudarev A.V. Mathematical modeling of passive admixture dynamics in the central part of Lake Seliger // *Vestnik TvGU. Seriya: Prikladnaya matematika*. 2007. No. 1 (4). P. 29–36 (in Russian).
11. Zhurbas V.M., El'ken Yu., Vyali G., Kuz'mina N.P., Paka V.T. Ways of transport of suspended particles in the bottom layer of the southern Baltic depending on wind conditions (numerical experiments) // *Okeanology*. 2010. V. 50. No. 6. P. 890–903 (in Russian).
12. Golenko M.N., Golenko N.N. Investigation of the propagation of passive impurities and Lagrangian particles in the coastal zone of the south-eastern part of the Baltic Sea // *Vestnik BFU im. I. Kanta. Seriya: estestvennye i meditsinskie nauki*. 2014. V. 1. P. 42–50 (in Russian).
13. Shul'ga T.Y., Suslin V.V. Investigation of the evolution of the suspended solids in the Sea of Azov based on the assimilation of satellite data in a hydrodynamic model // *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2018. V. 11. No. 3. P. 73–81 (in Russian).
14. P'yanova E.A. Numerical study of the influence of a reservoir on the transfer of impurities from a point source // *Vychislitelnye tekhnologii*. 2008. V. 13. Special issue 3. P. 57–63 (in Russian).
15. Suhinov A.I., Nikitina A.V., Peskova O.Yu. Mathematical modeling of the processes of pollution spreading and phytoplankton evolution in relation to the water area of the Taganrog Bay // *Izvestiya TRTU*. 2001. No. 2 (20). P. 32–36 (in Russian).
16. Gluhen'kiy I.Yu., Lavrent'ev A.V., Popova G.G. Simulation of oil spills in the Kerch Strait // *Bezopasnost' v tekhnosfere*. 2011. No. 6. P. 3–6 (in Russian).
17. Dembitskiy S.I., Lavrent'ev A.B., Larionov A.B., Urtenov M.H. Dynamics of an oil slick in the sea, taking into account the processes of destruction. Mathematical models // *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy Region. Estestvennye nauki*. 2004. No. 1. P. 6–10 (in Russian).
18. Makukhin V.L., Potiomkin V.L. Modeling of the transfer and transformation of pollutants, including mercury, in the lake Baikal basin // *Biosfera*. 2012. V. 4. No. 3. P. 286–292 (in Russian).
19. Nosov A.V., Krylov A.L., Aron D.V., Merkushev V.P. Review of existing approaches to modeling of dispersal of radioactive substances in surface water objects in the framework of development of CPS “BAKIS”. Preprint IBRAE-2018-04. Moskva: NSI RAS, 2018. 43 p. (in Russian).
20. Chernov I., Lazzari P., Tolstikov A., Kravchishina M., Iakovlev N. Hydrodynamical and biogeochemical spatiotemporal variability in the White Sea: A modeling study // *Journal of Marine Systems*. 2018. No. 187. P. 23–35. doi: 10.1016/j.jmarsys.2018.06.006
21. Chernov I., Tolstikov A., Iakovlev N. Simulating dynamics and ecology of the sea ice of the White Sea by the coupled ice-ocean numerical model // *Water*. 2022. V. 14. Article No. 2308. doi: 10.3390/w14152308
22. Chernov I., Tolstikov A., Baklagin V., Iakovlev N. Winter ice dynamics in a semi-closed ice covered sea: Numerical simulations and satellite data // *Fluids*. 2022. V. 7. Article No. 324. doi: 10.3390/fluids7100324
23. Chernov I.A., Tolstikov A.V., Yakovlev N.G. Comprehensive model of the White Sea: hydrothermodynamics of waters and sea ice // *Transactions of Karelian Research Centre of Russian Academy of Science*. 2016. No. 8. P. 116–128 (in Russian).
24. Yakovlev N.G. On the issue of reproducing the temperature and salinity fields of the Arctic Ocean // *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. 2012. V. 48. No. 1. P. 100–116 (in Russian).
25. Yakovlev N.G. Recovery of the large-scale state of the waters and sea ice of the Arctic Ocean in 1948–2002. Part 2: Condition of ice and snow cover // *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. 2009. No. 4. P. 1–18 (in Russian).
26. Karpechko V.A., Mahal'skaya N.I., Balaganskiy A.F., Tolstikov A.V. Runoff of the rivers of the White Sea basin // Certificate of state registration of the database No. 2018621833. Application: 2018621418, 08.10.2018. Date of publication: 19.11.2018. Bull. 587 (in Russian).
27. Tolstikov A.V., Filatov N.N., Zdrovennov R.E. The White Sea and its catchment // Certificate of state registration of the database No. 2010620435. Application: 2010620284, 21.06.2010. Date of publication: 16.08.2001. Bull. 360 (in Russian).