

УДК 551.465.45

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПРЕБЫВАНИЯ РЕЧНЫХ ВОД НА ШЕЛЬФЕ ВОСТОЧНОГО СЕКТОРА АРКТИКИ

© 2025 г. Г. А. Платов*, Е. Н. Голубева

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
пр. Академика Лаврентьева, 6, Новосибирск, 630090 Россия*

**e-mail: plat@ommfao.ssc.ru*

Поступила в редакцию 26.07.2024 г.

После доработки 20.12.2024 г.

Принята к публикации 05.03.2025 г.

С помощью численного моделирования с использованием крупномасштабной модели циркуляции океана и морского льда и данных атмосферного реанализа исследуются особенности циркуляции Сибирского шельфа в период с 1985 по 2014 г. Показано, что в последние два десятилетия время пребывания речных трассеров в шельфовой области сократилось в 2–4 раза. Наиболее вероятной причиной такого сокращения является увеличение продолжительности безледного периода в сочетании с преобладающим ветровым воздействием, способствующим выносу трассеров в глубоководную часть Северного Ледовитого океана.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, шельфовые моря, траектории трассеров, сибирские реки, речной сток, арктическая осцилляция океана

DOI: 10.31857/S0002351525030085

ВВЕДЕНИЕ

Сток арктических рек является одним из основных физических механизмов, формирующих состояние Северного Ледовитого океана. Его инструментальное изучение крайне затруднено из-за условий крайнего севера и во многом основывается на периодах отсутствия льда в регионе.

Тем не менее в работе [Osadchiev et al., 2020] авторы, используя гидрографические данные и спутниковые снимки, полученные в безледные периоды 1979–2019 гг., а также атмосферный реанализ, показали, что процесс распространения речных вод сильно подвержен влиянию синоптической изменчивости ветрового воздействия, что в значительной мере определяет изменчивость переноса пресной воды из Карского моря в море Лаптевых.

Наличие ледового покрова существенно ограничивает возможности натурных наблюдений. Однако, даже на основании имеющихся измерений, выполненных в Карском море незадолго до и во время ледового сезона, в рабо-

те [Osadchiev et al., 2023] удалось показать, что поздняя осенняя конвекция в речном плюме незадолго до образования льда и последующее образование твердого морского ледяного покрова изолируют речные воды от воздействия ветра, что приводит к образованию мощного прибрежного течения в восточном направлении.

Цель настоящей работы состоит в численном исследовании траекторий распространения пресных вод наиболее полноводных сибирских рек: Оби, Енисея и Лены не только в безледные периоды и межсезонье, когда существенна зависимость от состояния атмосферной динамики, но и в условиях устойчивого ледяного покрова. Межгодовая изменчивость гидрологических и ледовых полей Северного Ледовитого океана и его шельфовых морей, вызванная изменчивостью динамики атмосферы, исследовалась на основе численных экспериментов, проведенных с использованием трехмерной крупномасштабной модели океана и морского льда [SibCIOM] (Siberian Coupled Ice-Ocean Model), разработка

которой в ИВМиМГ СО РАН (бывшем ВЦ СО АН СССР) была инициирована Г. И. Марчуком в 70–80-х г. [Марчук и др., 1975; Marchuk and Kuzin, 1983]. В наши дни модель используется как компонента разрабатываемой модели климатической системы [Platov et al., 2017].

МОДЕЛЬ

Для изучения траекторий движения вод сибирских рек мы использовали трехмерную численную модель океана и морского льда SibCIOM [Golubeva and Platov, 2007; Голубева и Платов, 2009]. Модель океана основана на примитивных уравнениях, усредненных по Рейнольдсу, с использованием гидростатического приближения и приближения Буссинеска. Вопрос корректности использования приближения Буссинеска для моделирования тонкого речного плюма с большими скачками плотности требует дальнейшего изучения, однако отчасти его применение оправдано тем, что изменения плотности составляют величину порядка 2–3% от референсной. Уравнения модели следуют из законов сохранения тепла, соли и импульса и записаны в ортогональных криволинейных координатах по горизонтали и z-системе координат по вертикали. Некоторые важные физические процессы, которые численная модель не может адекватно разрешить, описаны с помощью параметризаций, таких как параметризация вертикального турбулентного перемешивания и формирования потоков плотных вод вдоль наклонного дна [Платов, 2011].

Модель циркуляции океана объединена с моделью морского льда CICE v.3 [Hunke and Dukowicz, 1997]. Ледовый блок позволяет моделировать реологию и термодинамику нескольких категорий морского льда [Bitz and Lipscomb, 1999], а также его адвекцию на основе полулагранжевой схемы [Lipscomb and Hunke, 2004]. Модельная область, включающая Арктику и Атлантический океан к северу от 20° ю.ш., опирается на трехполярную численную сетку с разрешением 0.5° в Атлантическом океане. Горизонтальный размер сетки в Арктике варьируется от 10 до 25 км, и составляет в среднем 18 км. По вертикали имеется 38 неравномерно расположенных уровня с максимальным разрешением 5 м в верхнем 20-метровом слое. При построении области моделирования использовалась батиметрия ИВСаО [Jakobsson et al., 2008]. Минимальная глубина шельфа — 12.5 м.

В случае меньших глубин в зависимости от геометрии береговой линии глубина принималась равной нулю (суша) или равной минимальному значению (океан). Данные атмосферного реанализа NCEP/NCAR [Kalnay et al., 1996] используются для определения воздействия на поверхность океана и морского льда. Начальные поля температуры, солёности взяты равными среднеклиматическим, поля скорости течений нулевыми, а распределение морского льда получено в результате 5-летнего разгонного эксперимента. На боковых границах, соответствующих побережьям континентов и островах, граничные условия соответствуют отсутствию потоков тепла и соли и нулевой скорости течения. Следует иметь в виду, что применение последнего условия может привести к некоторой недооценке скорости дрейфа речной воды в случае вдольберегового распространения речного плюма. Приток воды на открытых границах имеет заданный расход, температуру и солёность. Поступающая вода Берингова пролива имеет характеристики, рекомендованные климатологическими данными [Woodgate, 2018]. В случае речного притока вертикальное распределение температуры и солёности полагается однородным. Предполагается, что вертикальное распределение возникает уже далее в процессе взаимодействия речных вод с морскими и описывается в рамках крупномасштабной модели. При этом приходится считаться с недостаточно подробным разрешением этого взаимодействия в модели, поэтому мы не будем акцентировать внимание на детальном описании того, как эта вода поступает, а сконцентрируемся на характере ее дальнейшего распространения. Температура речного стока равна полученной в [Whitefield et al., 2015], а его солёность равна нулю. Расход рек соответствует среднемесячным климатическим значениям [R-ArcticNET]. Ранее модель прошла ряд испытаний в скоординированных экспериментах международного проекта FAMOS (Форум синтеза арктических наблюдений и моделирования, [FAMOS]) и сравнений с данными наблюдений [Proshutinsky et al., 2011; Aksenov et al., 2016; Proshutinsky et al., 2019].

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для анализа времени нахождения речных вод на шельфе арктических морей мы использовали метод лагранжевых частиц нейтральной

плавучести (трассеров), позволяющий отслеживать траектории их распространения. При этом частицы считаются невзаимодействующими с биохимической системой моря, так как и сама модель океана не включает биохимический блок. Начиная с января 1985 г. по декабрь 2013 г. частицы периодически выпускались в расчетную область в узлах сетки, соответствующих устьям рек Оби, Енисея и Лены и в процессе непрерывного счета океанической модели переносились далее со скоростью модельных течений. Таким образом, выпускаемые частицы могут покидать бассейны рассматриваемых морей и возвращаться обратно в случае возникновения обратного течения. Перенос частиц также сопровождался диффузией, которая считалась случайным процессом с гауссовым распределением. Положение частицы, попавшей в слой конвективного или ветрового перемешивания, определялся также стохастически на основе равномерного распределения в перемешанном слое. Выпущенная частица представляла объем $V_0 = 0.6859 \text{ км}^3$. Временной интервал между двумя последовательными выбросами частиц вычислялся как $\Delta t = V_0 / R(t)$, где $R(t)$ — текущий расход реки в $\text{км}^3/\text{с}$, определяемый на основе среднемесячных климатических данных [Völösmarty et al., 1998]. В ходе расчета для каждой частицы сохранялись трехмерные координаты ее нахождения и параметры среды, в которой она находилась в соответствующий момент. Для простоты возможность перехода частиц из морской среды в лед была исключена. Однако это не означает, что перенос речных вод льдом является малым и в дальнейшем планируется более детальное исследование его вклада в распространение речных вод.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Одной из особенностей современного состояния морей сибирского шельфа является раннее освобождение от ледяного покрова и более поздние сроки формирования сплоченного льда, в частности, припайного льда, блокирующего водные массы от динамического атмосферного воздействия. Результаты проведенного численного эксперимента показывают сокращение площади ледового покрова и увеличение продолжительности периода открытой воды (рис. 1), что согласуется с данными наблюдений. Увеличение продолжительности безледного пе-

риода способствует увеличению прогрева морских вод и усилению влияния ветра на формирование циркуляционного режима окраинных морей.

Используемая в расчетах система пассивных трассеров позволяет проследить межгодовую и межсезонную изменчивость циркуляции вод шельфовых морей. По результатам численного эксперимента распространение трассеров рек Оби и Енисея, поступающих в Карское море, происходит в основном по двум траекториям: восточная характеризует струю вдоль побережья Евразии с выходом через пролив Вилькицкого (рис. 2а), вторая траектория, северная, проходит по центральной части моря в направлении пролива между островами Земли Франца-Иосифа и Северной Земли (рис. 2б). Интенсивность этих двух ветвей различная в разные годы и может меняться в течение года. Как правило, в условиях установившегося ледового покрова, с ноября по июль, основное распространение трассеров происходит вдоль побережья Евразии в направлении пролива Вилькицкого с выходом в море Лаптевых. Это происходит в соответствии с динамикой речного плюма в северном полушарии [de Boer et al., 2006] в отсутствие значимого ветрового воздействия. Однако расход рек становится значительным только в конце этого периода, начиная с июня. При освобождении моря ото льда динамика атмосферы является определяющим фактором в установлении траектории. По модельным расчетам появление трассеров речных вод, выпущенных в течение лета, случается редко в проливе Вилькицкого. Наиболее часто в численном расчете в летний период формируется траектория северного направления в сторону глубоководной части океана.

Ранее в работе [Golubeva et al., 2018] по результатам наших расчетов анализировались наиболее характерные режимы циркуляции моря Лаптевых и траектории распространения трассеров реки Лены в различные периоды атмосферной циркуляции. Было показано, что речные трассеры, поступающие на шельф моря Лаптевых, в течение безледного периода могут выноситься в северном направлении в область внешнего шельфа или распространяться в восточном направлении через проливы Санникова и Дмитрия Лаптева в Восточно-Сибирское море. Представление о сложном характере циркуляции шельфа, меняющейся под действием атмос-

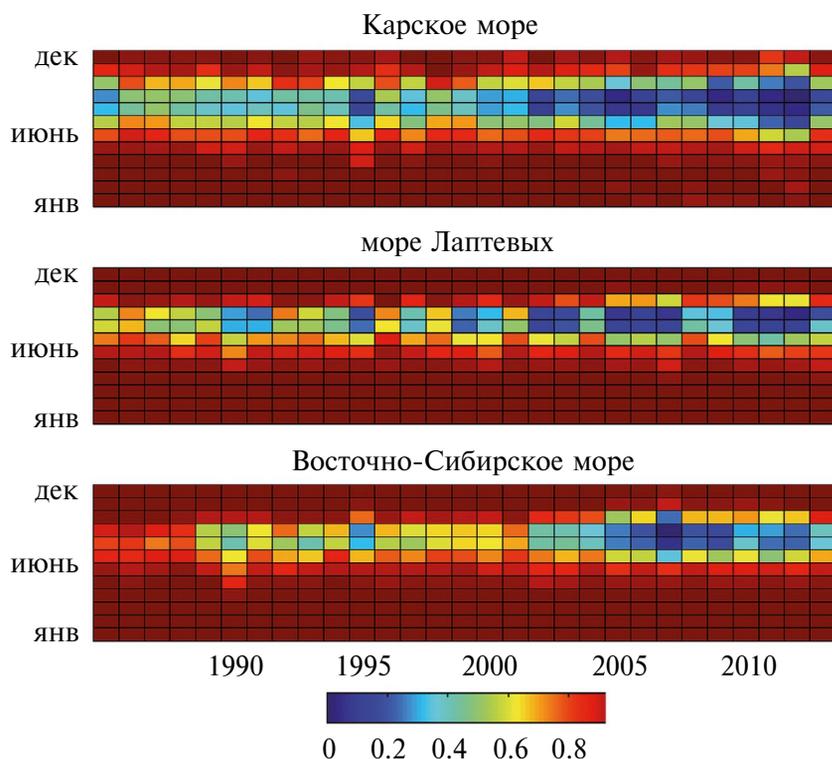


Рис. 1. Изменение площади ледового покрова сибирских шельфовых морей относительно площади моря (с 1985 по 2013 г. по горизонтальной оси и в течение года — по вертикальной) по результатам моделирования. Значение 1 означает, что море полностью покрыто льдом, 0 — ледовый покров отсутствует

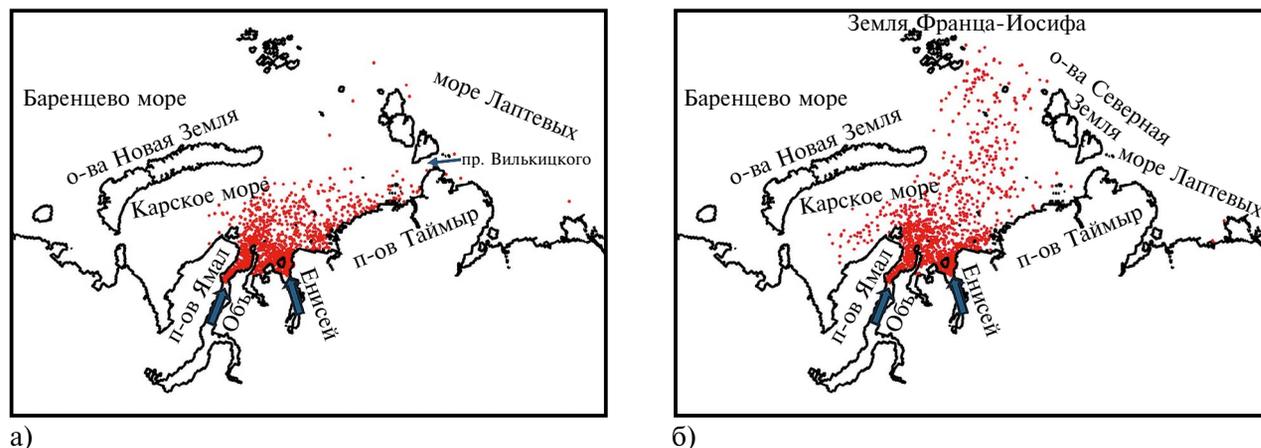


Рис. 2. Расположение трассеров рек Обь и Енисей, выпущенных в модельном расчете: (а) — в 2009 г. (вдольбереговая мода) и (б) — в 2013 г. (мода выхода в глубоководную часть Северного Ледовитого океана)

ферных процессов, можно получить из рис. 3, где показаны траектории выбранных пяти наиболее характерных трассеров, выпущенных в 2005 г. (рис. 3а) и 2007 г. (рис. 3б). Сложившаяся в августе 2005 г. циркуляция вод по нашим расчетам имела довольно сложный характер, в поле течений присутствовали несколько вих-

ревых образований, которые способствовали выносу трассеров к Новосибирским островам. Вышедшие на внешний шельф трассеры в дальнейшем включились в циркуляцию Арктического бассейна. Однако в сентябре поле течений уже было более однородным и обеспечивало перенос других трассеров в юго-восточ-

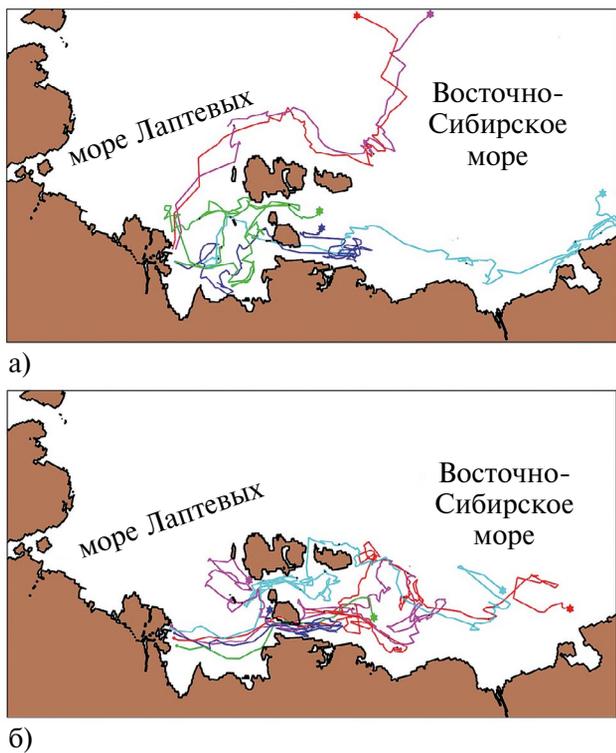


Рис. 3. Траектории пяти трассеров реки Лены, выпущенных в модельном расчете: (а) — в 2005 г. (антициклонический режим летней циркуляции моря Лаптевых) и (б) — в 2007 г. (циклонический режим). Траектории показаны с момента выхода трассера до окончания расчета. Конечное положение трассера (декабрь 2013) обозначено звездой

ном направлении. Летом 2007 г. по результатам расчетов сформировался не столь частый в XXI столетии для моря Лаптевых случай устойчивой циркуляции вод, благоприятный для фор-

мирования течения восточного направления. Траектории трассеров 2007 г. (рис. 3б) направлены в сторону Восточно-Сибирского моря, где они длительное время находятся в шельфовой области.

Вынос трассеров на внешний шельф моря Лаптевых, граничащий с глубоководной частью океана, не означает включение в систему крупномасштабной циркуляции Арктического бассейна. Численная модель показывает, что для моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря характерен интенсивный обмен вод, который происходит как через проливы, так и на внешнем шельфе. Трассеры могут несколько раз переходить через проливы из одного моря в другое, а также возвращаться из области внешнего шельфа в центральную часть моря, пока не выйдут в область материкового склона, преимущественно в районе хребта Ломоносова или самой восточной части Восточно-Сибирского моря на границе с Чукотским морем. Здесь трассеры включаются в систему циркуляции глубоководной части Северного Ледовитого океана.

На рис. 4 показаны графики изменения количества трассеров в морях сибирского шельфа с течением времени, характерные для прошлого и настоящего столетия. Трассеры выпускались в течение одного года в 1985 г. и в 2000 г., в соответствии с расходом сибирских рек. Представленные графики показывают интенсивное накопление трассеров в течение года в Карском море и море Лаптевых в соответствии с посту-

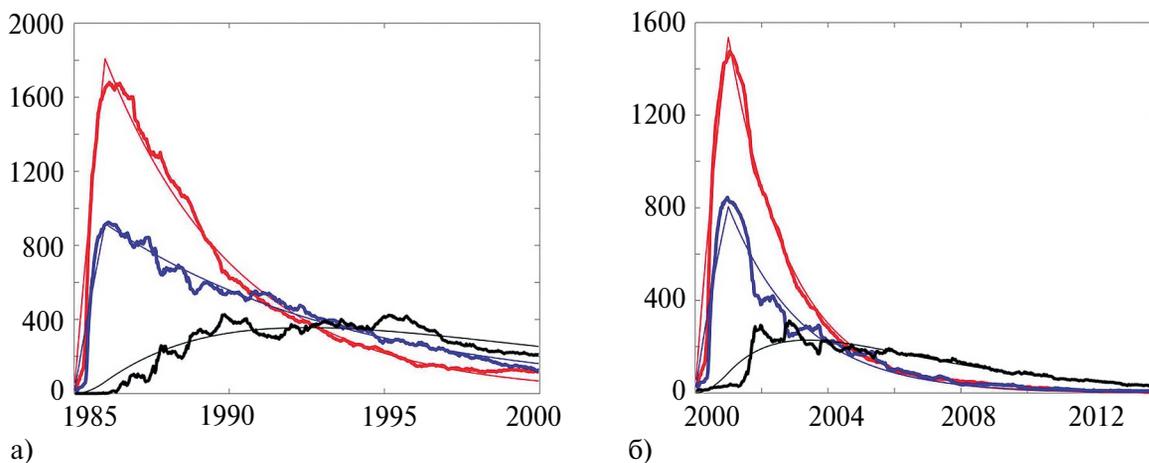


Рис. 4. Количество речных трассеров рек Обь, Енисей и Лена в бассейнах Карского моря (красная кривая), моря Лаптевых (синяя) и Восточно-Сибирского моря (черная), выпущенных в течение (а) 1985 г. и (б) 2000 г. Жирные линии построены по результатам численного эксперимента, тонкие — согласно упрощенному аналитическому решению

плением с водами Оби, Енисея и Лены и последующее сокращение их количества в связи с выходом их из акватории соответствующего моря. На представленном распределении отчетливо виден водообмен между морями Лаптевых и Восточно-Сибирским так что сокращение числа трассеров в море Лаптевых согласуется с увеличением их числа в Восточно-Сибирском море и наоборот. Рисунок показывает также сокращение времени нахождения трассеров в шельфовой области в современный период. Например, для Карского моря после 5 лет сохраняется 35% трассеров, выпущенных в 1985 г., и только 14% трассеров, выпущенных в 2000 г.

По нашим оценкам, среднее время нахождения трассеров рек Обь и Енисей в акватории Карского моря в современный период равняется 3.2 годам. Анализ результатов моделирования показал, что в предыдущий период, до 2000 г., это время равнялось примерно 5–6 годам. Дальнейшее распространение трассеров и время их нахождения в глубоководной части зависит от начальной траектории выхода на материковый склон и режима циркуляции вод Арктического бассейна. При антициклонической моде поверхностной циркуляции Арктического бассейна для трассеров, вышедших через пролив между островами, требуется еще один год, чтобы выйти за пределы шельфовой области и включиться в интенсивный поток, выносящий арктические воды в сторону Гренландии. При этих же условиях для трассеров, вышедших через пролив Вилькицкого, требуется примерно на год больше времени. При циклонической моде поверхностной циркуляции вод трассеры, вышедшие за пределы шельфа, распространяются в направлении хребта Ломоносова и в последствии, даже при смене режима циркуляции, могут еще длительное время находиться в Арктическом бассейне, включаясь в циркуляцию Канадского бассейна (круговорот моря Бофорта).

Среднее время нахождения трассеров реки Лена на шельфе сибирских морей согласно данным моделирования оценивается равным семи годам, к этому времени их количество уменьшается на порядок и не превосходит 100. В расчетах до 2000 г. этот же период оценивается в 15 лет.

Анализ результатов моделирования показал также повышение средней скорости течений на Сибирском шельфе в направлении глубоковод-

ной части Северного Ледовитого океана. Для Карского моря этот процесс получен на средне-годовом осреднении, для моря Лаптевых — на осреднении с июля по октябрь. Полученные результаты объясняют причины сокращения сроков нахождения трассеров в шельфовой области.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленные на рис. 4 графики зависимости количества речных трассеров в бассейнах Карского моря, моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря могут быть описаны в рамках простой линейной модели. Следуя [Dukhovskoy et al., 2021], представим скорость изменения количества трассера в бассейне U в линейном приближении в виде

$$\frac{dU}{dt} = -k_1 U + F_1(t),$$

где первое слагаемое в правой части $-k_1 U$ представляет скорость, с которой трассер убывает, перетекая в соседние бассейны, а второе слагаемое $F_1(t)$ скорость поступления трассера от внешних источников, в данном случае из речного стока. При этом коэффициент k_1 математически является коэффициентом релаксации и может быть представлен в виде $k_1 = \frac{1}{\tau_1}$, где τ_1 масштаб времени, в течение которого при отсутствии источников количество трассера убывает в e раз вследствие перетекания в соседние бассейны. Данное уравнение является упрощенной формой, которая позволяет качественно описать динамику интегрального поступления и расхода трассеров в бассейне на основе резервуарного подхода. Конечно, нелинейная динамика может иметь решающее значение, поэтому резервуарный подход может быть использован только как оценочный для времени пребывания частиц τ_1 на шельфе морей в случае реализации наиболее характерных мод циркуляции шельфовых вод. В рамках этого подхода трассер, попадающий в резервуар за счет источника $F_1(t)$, начинает сразу же расходоваться через внешние границы, несмотря на то что требуется еще дополнительное время для того, чтобы он смог до этих границ физически распространиться. Тем не менее с помощью этого уравнения можно качественно оценить количество трассера в бассейне Карского моря по-

скольку здесь практически отсутствует или пренебрежимо мало поступление речных вод из других бассейнов. Решением этого уравнения на интервале времени $[t_0, t_0 + t]$ будет

$$U(\tilde{t}) = \left(U_0 + \int_0^{\tilde{t}} F_1(t') e^{k_1 t'} dt' \right) e^{-k_1 \tilde{t}}, \quad \theta(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$$

где $\tilde{t} = t - t_0, U_0$ — начальное количество трассера при $t = t_0$.

Для моря Лаптевых помимо местного речного стока возможно также поступление речных трассеров Оби и Енисея из Карского моря через пролив Вилькицкого. В пределах бассейна Восточно-Сибирского моря поступление речного трассера кроме местного речного стока возможно через проливы Санникова и Дмитрия Лаптева. Скорость изменения речного трассера в таких бассейнах V можно представить в виде

$$\frac{dV}{dt} = -k_2 V + \tilde{k}_1 U + F_2(t),$$

где первое слагаемое в правой части $-k_2 V$ скорость убывания трассера через границы этого бассейна, второе слагаемое $\tilde{k}_1 U$ скорость поступления трассера через проливы из соседних бассейнов, а третье слагаемое $F_2(t)$ скорость поступления трассера в этот бассейн от местных рек. Решением этого уравнения на интервале времени $[t_0, t_0 + t]$ будет:

Для поиска близкого аналитического решения и исходя из того, что трассеры испускаются начиная с некоторого момента времени, предположим, что источники F_1 и F_2 можно представить в виде тета-функции

$$\theta(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$$

с амплитудами \overline{F}_1 и \overline{F}_2 , то есть

$$F_1(\tilde{t}) = \overline{F}_1 \theta(\tilde{t}), \quad F_2(\tilde{t}) = \overline{F}_2 \theta(\tilde{t}),$$

а количество трассера в бассейнах при $t = t_0$ равно нулю $U_0 = V_0 = 0$. Фактически мы пренебрегаем сезонной изменчивостью речного стока, полагая что сток постоянен в течение всего года. Тогда, интегрируя, получим

$$U(\tilde{t}) = \overline{F}_1 \frac{(1 - e^{-k_1 \tilde{t}})}{k_1},$$

$$V(\tilde{t}) = \overline{F}_1 \frac{\tilde{k}_1 (e^{-k_2 \tilde{t}} - e^{-k_1 \tilde{t}})}{(k_2 - k_1)} + \left(\overline{F}_2 + \overline{F}_1 \frac{\tilde{k}_1}{k_1} \right) \frac{(1 - e^{-k_2 \tilde{t}})}{k_2}$$

Поскольку в описанных экспериментах, трассер испускался в течение ограниченного отрезка времени T ($T = 1$ год), представим источники в виде ступенчатой функции с отличным от нуля значением на интервале $[0, T]$, то есть

$$F_1(t) = \overline{F}_1 (\theta(t) - \theta(t - T)), \quad F_2(t) = \overline{F}_2 (\theta(t) - \theta(t - T)).$$

$$V(\tilde{t}) = \left\{ V_0 + \int_0^{\tilde{t}} \tilde{k}_1 \left(U_0 + \int_0^{t''} F_1(t') e^{k_1 t'} dt' \right) e^{-k_1 t''} + F_2(t'') e^{k_2 t''} dt'' \right\} e^{-k_2 \tilde{t}}.$$

Таким образом, решение на отрезке $[t_0, t_0 + t]$ можно представить либо в виде $U(\tilde{t})$, либо в виде $V(\tilde{t})$. Представленные на рис. 4 графики, позволяют сделать предположение, что поступление вод Оби и Енисея в море Лаптева незначительно сказывается на изменении количества трассера в бассейне этого моря. Поэтому в дальнейшем мы будем предполагать, что решение для моря Лаптевых будет определяться согласно выражению для $U(\tilde{t})$.

Тогда решение можно представить в виде:
Для t из интервала $0 < t \leq T$

$$U(t) = \overline{F}_1 \frac{(1 - e^{-k_1 t})}{k_1},$$

$$V(t) = \overline{F}_1 \frac{\tilde{k}_1 (e^{-k_2 t} - e^{-k_1 t})}{(k_2 - k_1)} + \left(\overline{F}_2 + \overline{F}_1 \frac{\tilde{k}_1}{k_1} \right) \frac{(1 - e^{-k_2 t})}{k_2},$$

для $t > T$

$$V(t) = \bar{F}_1 \frac{\tilde{k}_1}{k_1} \frac{U(t) \bar{F}_1 \left(e^{-k_1(t-T)} - e^{-k_1 t} \right)}{\left(e^{-k_1 t} \bar{F}_1 - e^{-k_1 t} \tilde{k}_1 e^{-k_2(t-T)} + e^{-k_2 t} \right)} + \left(\bar{F}_2 + \bar{F}_1 \frac{\tilde{k}_1}{k_1} \right) \frac{\left(e^{-k_2(t-T)} - e^{-k_2 t} \right)}{k_2}.$$

Так как в эксперименте учитывались только трассеры Оби, Енисея и Лены, значение \bar{F}_2 для Восточно-Сибирского моря можно положить равным нулю. Значения параметров \bar{F}_1 , \bar{F}_2 , k_1 , k_2 и \tilde{k}_1 оценивалось с помощью стандартной процедуры `fminsearch` поиска минимума функции пакета Matlab. При этом минимизировались функции ошибок Err_1 или Err_2 , определяемые как сумма квадратов разности значений количества трассеров, полученного в численном эксперименте $W(t)$ и полученного с помощью выражений для $U(t)$ или $V(t)$:

$$Err_1 = \sum_{j=1}^N \left(W(t_j) - U(t_j) \right)^2, Err_2 = \sum_{j=1}^N \left(W(t_j) - V(t_j) \right)^2.$$

Поиск минимумов Err_1 и Err_2 , таким образом соответствует методу наименьших квадратов. Результаты представлены в таблице.

Согласно таблице, периоды 1985–2000 и 2000–2014 гг. существенно отличаются. Период e -кратного сокращения количества трассера в Карском море в период 1985–2000 гг. составляет 4.25 лет, в то время как в период 2000–2014 гг. всего 1.84 лет. То есть сокращается более чем в

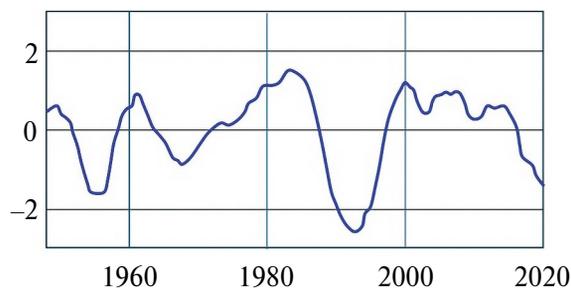
два раза. Еще более существенное сокращение с 8.04 до 2.24 лет имеет в море Лаптевых, то есть почти в четыре раза. В Восточно-Сибирском море также имеет место уменьшение срока e -кратного сокращения количества трассера с 6.13 до 3.74 лет, то есть примерно в 1.6 раз. При этом примерно во столько же раз сокращается и время e -кратного увеличения за счет поступлений речного трассера из моря Лаптевых с 7.03 до 4.53 лет. Все это указывает на то, что характер динамики речных вод в периоды 1985–2000 и 2000–2014 гг. имеют принципиальное отличие.

Представленные на рис. 4 графики решений для трех морей в случае реализации береговой и внебереговой моды показывают их качественную близость к результатам трехмерного моделирования (количественная близость обеспечивается минимизацией Err_1 и Err_2), что указывает на возможность использования резервуарного подхода для оценки количества речных вод и времени их пребывания на шельфе этих морей.

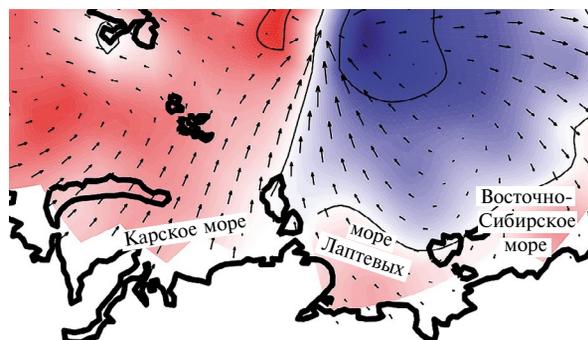
В работе [Platov et al., 2020] на основе данных реанализа NCEP/NCAR [Kalnay et al., 1996] отмечалось, что поле ветра в Арктике имеет три значимые моды: первая в значительной степени ассоциируется с арктической осцилляцией океана (АОО — Arctic Ocean Oscillation [Proshutinsky and Johnson, 1997]), усиливая или ослабляя циклоническую циркуляции в районе моря Бофорта, вторая с усилением или ослаблением Трансполярного дрейфа за счет “арктического диполя” [Watanabe et al., 2006], третья связа-

Таблица. Оптимальные наборы параметров для решений $U(t)$ или $V(t)$, в случае $V(t)$ величина \bar{F}_2 не оптимизировалась, а полагалась равной нулю

Период	Море	\bar{F}_1	\bar{F}_2	1		2		1 ®	
				k_1	τ_1	k_2	τ_2	\tilde{k}_1	$\tilde{\tau}_1$
1985–2000	Карское	2029	–	0.235	4.25	–	–	–	–
	Лаптевых	976	–	0.124	8.04	–	–	–	–
	Восточно-Сибирское	976	0	–	–	0.163	6.13	0.142	7.03
2000–2014	Карское	1992	–	0.544	1.84	–	–	–	–
	Лаптевых	997	–	0.446	2.24	–	–	–	–
	Восточно-Сибирское	997	0	–	–	0.268	3.74	0.220	4.53



а)



б)

Рис. 5. Первая мода арктического поля ветра согласно [Platov et al., 2020], соответствующая арктической осцилляции океана АОО [Proshutinsky and Johnson, 1997]: (а) — временной ход главной компоненты (в единицах стандартного отклонения), (б) — распределение поля ветра (стрелки) и его завихренности (изолинии и цвет: красный — положительная завихренность, синий — отрицательная)

на с усилением или ослаблением циклонической циркуляции в северных морях Атлантики [Barton et al., 2018]. В данном случае наибольшее влияние оказывает состояние первой моды. Характер изменений главной компоненты этой моды в период с 1948 по 2020 г. представлен на рис. 5а. Из рисунка видно, что в период с 1985 по 1995 г. главная компонента моды была существенно отрицательной, что с учетом распределения поля ветра (рис. 5б), характерного для этой моды, означает ослабление антициклонической циркуляции ветра в канадском бассейне Арктики и соответственно ослабление вовлечения шельфовых вод в круговорот моря Бофорта из-за сокращения экмановского переноса в верхнем слое.

В период с 2000 по 2014 г., наоборот, имеет место небольшая, но положительная фаза этой моды, что способствует наибольшему оттоку поверхностных шельфовых вод в сторону открытого океана и в условиях увеличения продолжительности безледного периода приводит к сокращению в 2–4 раза времени пребывания трассеров рек в районе этих морей.

ВЫВОДЫ

Трехмерное численное моделирование с использованием крупномасштабной модели циркуляции океана и морского льда и данных атмосферного реанализа позволяет выявить особенности циркуляции Сибирского шельфа в современном периоде. На основе проведенного численного эксперимента показано, что, в последние два десятилетия сократилось время пребывания трассеров в шельфовой области.

В качестве причины сокращения сроков нахождения наиболее вероятными являются увеличение продолжительности безледного периода и преобладающая атмосферная циркуляция, способствующая выносу трассеров в глубоководную часть Северного Ледовитого океана.

Используемая в расчетах система речных трассеров и оценка времени нахождения их на шельфе может отражать распространение любой плавучей примеси, характеризующей загрязнение шельфовых вод и последующее загрязнение глубоководной части Северного Ледовитого океана.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа проводилась при поддержке РФФ, грант № 20-11-20112.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Голубева Е.Н., Платов Г.А. Численное моделирование отклика Арктической системы океан-лед на вариации атмосферной циркуляции 1948–2007 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 1. С. 145–160.
<https://doi.org/10.1134/S0001433809010095>

Марчук Г.И., Залесный В.Б., Кузин В.И. О методах конечных разностей и конечных элементов в задаче глобальной ветровой циркуляции океана // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1975. Т. 11. № 12. С. 1294–1300.

Платов Г.А. Численное моделирование формирования глубинных вод Северного Ледовитого океана. Часть I: идеализированные тесты // Изв. РАН.

- Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 3. С. 393–408.
<http://dx.doi.org/10.1134/S0001433811020071>
- Aksenov Y., Karcher M., Proshutinsky A., Gerdes R., de Cuevas B., Golubeva E., Kauker F., Nguyen A.T., Platov G.A., Wadley M., Watanabe E., Coward A.C., Nurser A.J.G.* Arctic pathways of Pacific Water: Arctic Ocean Model Intercomparison experiments // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2016. V. 121. P. 27–59.
<https://doi.org/10.1002/2015JC011299>
- Barton B.I., Lenn Y., Lique C.* Observed Atlantification of the Barents Sea causes the polar front to limit the expansion of winter sea ice // *J. Phys. Oceanography*. 2018. V. 48. P. 1849–1866.
<https://doi.org/10.1175/JPO-D-18-0003.1>
- Bitz C.M., Lipscomb W.H.* An energy-conserving thermodynamic model of sea ice // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 15669–15677.
<https://doi.org/10.1029/1999JC900100>
- de Boer G.J., Pietrzak J.D., Winterwerp J.C.* On the vertical structure of the Rhine region of freshwater influence // *Ocean Dynamics*. 2006. V. 56. P. 198–216.
<https://doi.org/10.1007/s10236-005-0042-1>
- Dukhovskoy D.S., Yashayaev I., Chassignet E.P., Myers P.G., Platov G., Proshutinsky A.* Time Scales of the Greenland Freshwater Anomaly in the Subpolar North Atlantic // *J. Climate*. 2021. V. 34. P. 8971–8987.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0610.1>
- FAMOS: Forum for Arctic Modeling and Observational Synthesis. Available online: <https://web.whoi.edu/famos> (Дата посещения 24/07/2024 г.)
- Golubeva E.N., Platov G.A.* On improving the simulation of Atlantic Water circulation in the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. C04S05.
<https://doi.org/10.1029/2006JC003734>
- Golubeva E., Platov G., Malakhova V., Kraineva M., Iakshina D.* Modelling the Long-Term and Inter-Annual Variability in the Laptev Sea Hydrography and Subsea Permafrost State. *Polarforschung*. 2018. V. 87. № 2. P. 195–210.
<https://doi.org/10.2312/polarforschung.87.2.195>
- Hunke E.C., Dukowicz J.K.* An elastic-viscous-plastic model for ice dynamics // *J. Phys. Oceanography*. 1997. V. 27. P. 1849–1867.
[https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1997\)027<1849:AEVPMF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1997)027<1849:AEVPMF>2.0.CO;2)
- Jakobsson M., Macnab R., Mayer L., Anderson R., Edwards M., Hatzky J., Schenke H.W., Johnson P.* An improved bathymetric portrayal of the Arctic Ocean: Implications for ocean modeling and geological, geophysical and oceanographic analyses // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L07602.
<https://doi.org/10.1029/2008GL033520>
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1996. V. 77. P. 437–471.
[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)
- Lipscomb W.H., Hunke E.C.* Modeling Sea Ice Transport Using Incremental Remapping // *Mon. Weather Rev.* 2004. V. 132. P. 1341–1354.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<C1341:MSITUI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<C1341:MSITUI>2.0.CO;2)
- Marchuk G.I., Kuzin V.I.* On the combination of finite element and splitting-up methods in the solution of parabolic equations // *Journal of Computational Physics*. 1983. V. 52. № 2. P. 237–272.
[https://doi.org/10.1016/0021-9991\(83\)90030-X](https://doi.org/10.1016/0021-9991(83)90030-X)
- Osadchiev A.A., Pisareva M.N., Spivak E.A., Shchuka S.A., Semiletov I. P.* Freshwater transport between the Kara, Laptev, and East-Siberian seas // *Scientific Reports*. 2020. V. 10. Article number: 13041.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-70096-w>
- Osadchiev A., Sedakov R., Frey D., Gordey A., Rogozhin V., Zabudkina Z., Spivak E., Kuskova E., Sazhin A., Semiletov I.* Intense zonal freshwater transport in the Eurasian Arctic during ice-covered season revealed by in situ measurements // *Scientific Reports*. 2023. V. 13. Article number: 16508.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-43524-w>
- Platov G., Krupchatnikov V., Martynova Y., Borovko I., Golubeva E.* A new earth's climate system model of intermediate complexity, PlaSim-ICMMG-1.0: Description and performance // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2017. V. 96. P. 012005.
<http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/96/1/012005>
- Platov G., Iakshina D., Krupchatnikov V.* Characteristics of Atmospheric Circulation Associated with Variability of Sea Ice in the Arctic // *Geosciences*. 2020. V. 10. № 9. P. 359.
<https://doi.org/10.3390/geosciences10090359>
- Proshutinsky A., Johnson M.A.* Two circulation regimes of the wind driven Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. 12493–12514.
<https://doi.org/10.1029/97JC00738>
- Proshutinsky A., Aksenov Y., Kinney C.J., Gerdes R., Golubeva E., Holland D., Holloway G., Jahn A., Johnson M., Popova E., Steele M., Watanabe E.* Recent advances in Arctic ocean studies employing models from the Arctic

- Ocean Model Intercomparison Project // *Oceanography*. 2011. V. 24. P. 102–113.
<https://doi.org/10.5670/oceanog.2011.61>
- Proshutinsky A., Krishfield R., Toole J.M., Timmermans M.-L., Williams W., Zimmermann S., Yamamoto-Kawai M., Armitage T.W.K., Dukhovskoy D., Golubeva, E., Manucharyan G.E., Platov G., Watanabe E., Kikuchi T., Nishino S., Itoh M., Kang S.-H., Cho K.-H., Tateyama K., Zhao J.* Analysis of the Beaufort Gyre freshwater content in 2003–2018 // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2019. V. 124. P. 9658–9689.
<https://doi.org/10.1029/2019JC015281>
- R-ArcticNET: <https://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/index.html> (дата посещения 24/07/2024 г.)
- SibCIOM: <https://icmmg.nsc.ru/en/content/pages/sibciom-siberian-coupled-ice-ocean-model> (дата посещения 24/07/2024 г.)
- Völösmarty C.J., Fekete B.M., Tucker B.A.* Global river discharge, 1807–1991, Version 1.1 (RivDis) // ORNL Distributed Active Archive Center Datasets. 1998. Oak Ridge Tennessee, USA.
<https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/199>
- Watanabe E., Wang J., Sumi A., Hasumi H.* Arctic dipole anomaly and its contribution to sea ice export from the Arctic Ocean in the 20th century // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. L23703.
<https://doi.org/10.1029/2006GL028112>
- Whitefield J., Winsor P., McClelland J., Menemenlis D.* A new river discharge and river temperature climatology dataset for the pan-Arctic region // *Ocean Model.* 2015. V. 88. P. 1–15.
<https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2014.12.012>
- Woodgate R.A.* Increases in the Pacific inflow to the Arctic from 1990 to 2015, and insights into seasonal trends and driving mechanisms from year-round Bering Strait mooring data // *Prog. Oceanogr.* 2018. V. 160. P. 124–154.
<https://doi.org/10.1016/j.pocan.2017.12.007>

NUMERICAL STUDY OF THE RIVERINE WATER RESIDENCE TIME ON THE SHELF OF THE EASTERN ARCTIC

© 2025 G. A. Platov*, E. N. Golubeva

*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
 pr. Lavrentiev, 6, Novosibirsk, 630090 Russia*

**e-mail: plat@ommfao.sccc.ru*

The circulation features of the Siberian shelf in the period from 1985 to 2014 are studied using numerical large-scale model of ocean and sea ice circulation and atmospheric reanalysis data. It is shown that in the last two decades the residence time of river tracers in the shelf area has 2-4 times decreased. The most likely reason for this reduction is an increase in the duration of the ice-free period, combined with the prevailing wind effect, favorable for transport of tracers into the deep part of the Arctic Ocean.

Keywords: Arctic ocean, shelf seas, tracer trajectories, Siberian rivers, river runoff, Arctic ocean oscillation