

УДК 551.465.52

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТИХООКЕАНСКИХ ВОД В ОХОТСКОМ МОРЕ

© 2021 г. П. А. Файман^а, С. В. Пранц^а, * , М. В. Будянский^а, М. Ю. Улейский^а

^аТихоокеанский океанологический институт Дальневосточного отделения РАН,
ул. Балтийская, 43, Владивосток, 690041 Россия

*e-mail: prants@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 26.10.2020 г.

После доработки 19.01.2021 г.

Принята к публикации 17.02.2021 г.

В работе изучаются водообмен между Тихим океаном и Охотским морем через Курильские проливы, а также распространение тихоокеанских и охотоморских вод в пределах Охотского моря по результатам численных экспериментов в рамках вихре-допускающей модели RIAMOM в 1991–2000 гг. и их лагранжевого анализа. Показано, что основной вклад в водообмен вносят семь проливов: Буссоль, Крузенштерн, Фриза, Екатерина, Четвертый Курильский, Надежда и Уруп (в порядке убывания значимости), совокупный вклад которых достигает 95% от общего водообмена. Наши результаты говорят о том, что ранние исследования существенно переоценивали вклад проливов Буссоль и Крузенштерна. В активном верхнем 200-метровом слое вклад Четвертого Курильского пролива, проливов Фриза и Екатерины сопоставим с вкладом проливов Крузенштерна и Буссоль. Оценки объемного расхода, интегрированного по глубине и в отдельных слоях модели, показывают, что воды северо-западной части Тихого океана проникают в Охотское море главным образом через северные Курильские проливы, а именно проливы Крузенштерна и Четвертый Курильский. Охотоморская вода выходит в Тихий океан через верхний 200-метровый слой через проливы Фриза, Екатерины, Буссоль и Уруп (в порядке убывания значимости). Лагранжевое моделирование выявило основные пути переноса тихоокеанских и охотоморских вод. В поверхностных и приповерхностных слоях тихоокеанская вода переносится на северо-западный шельф моря Западно-Камчатским течением (особенно зимой и весной) и обеими ветвями Северо-Охотского течения. Затем тихоокеанские воды попадают в Восточно-Сахалинское течение. На глубинах ниже 200 м тихоокеанская вода не достигает северного шельфа. На глубинах 500 м и более водообмен между океаном и Охотским морем незначителен из-за слабых течений. Результаты моделирования согласуются с результатами инструментальных и спутниковых измерений.

Ключевые слова: Охотское море, модель океана RIAMOM, водообмен через Курильские проливы, лагранжевы карты

DOI: 10.31857/S0002351521030044

1. ВВЕДЕНИЕ

Охотское море (ОМ) — окраинное море, соединенное с северо-западной частью Тихого океана цепью Курильских островов и с Японским морем через проливы Соя/Лаперуза и Невельского (рис. 1). Теплая и соленая вода Японского моря поступает в ОМ через пролив Соя/Лаперуза, тогда как обмен между Японским морем и ОМ через очень узкий пролив Невельского незначителен. Вода северо-западной части Тихого океана (здесь и далее — воды, проникающие через северные Курильские проливы, именуется тихоокеанскими водами, а воды, образующиеся на северо-западном шельфе Охотского моря — охотоморскими водами) попадает в ОМ через северные Курильские проливы, в основном через Четвертый Ку-

рильский пролив и пролив Крузенштерна [1–5]. Затем она частично переносится Западно-Камчатским течением в направлении северного побережья, где адвектируется Северо-Охотским течением на запад и юго-запад [6–8]. Тихоокеанская вода также переносится Срединным течением на северо-восточный шельф острова Сахалин, где впадает в Восточно-Сахалинское течение [9].

Считается, что перенос по обоим путям осуществляется в поверхностном слое [10]. Перенос воды с северо-западного шельфа ОМ в океан изучался с помощью многочисленных инструментальных измерений [11–16], данных дрейфующих буев Арго [17], данных альтиметрии AVISO [18] и численного моделирования [10, 19]. Перенос тихоокеанской воды на северный и северо-западный шельф ОМ через северные Курильские про-

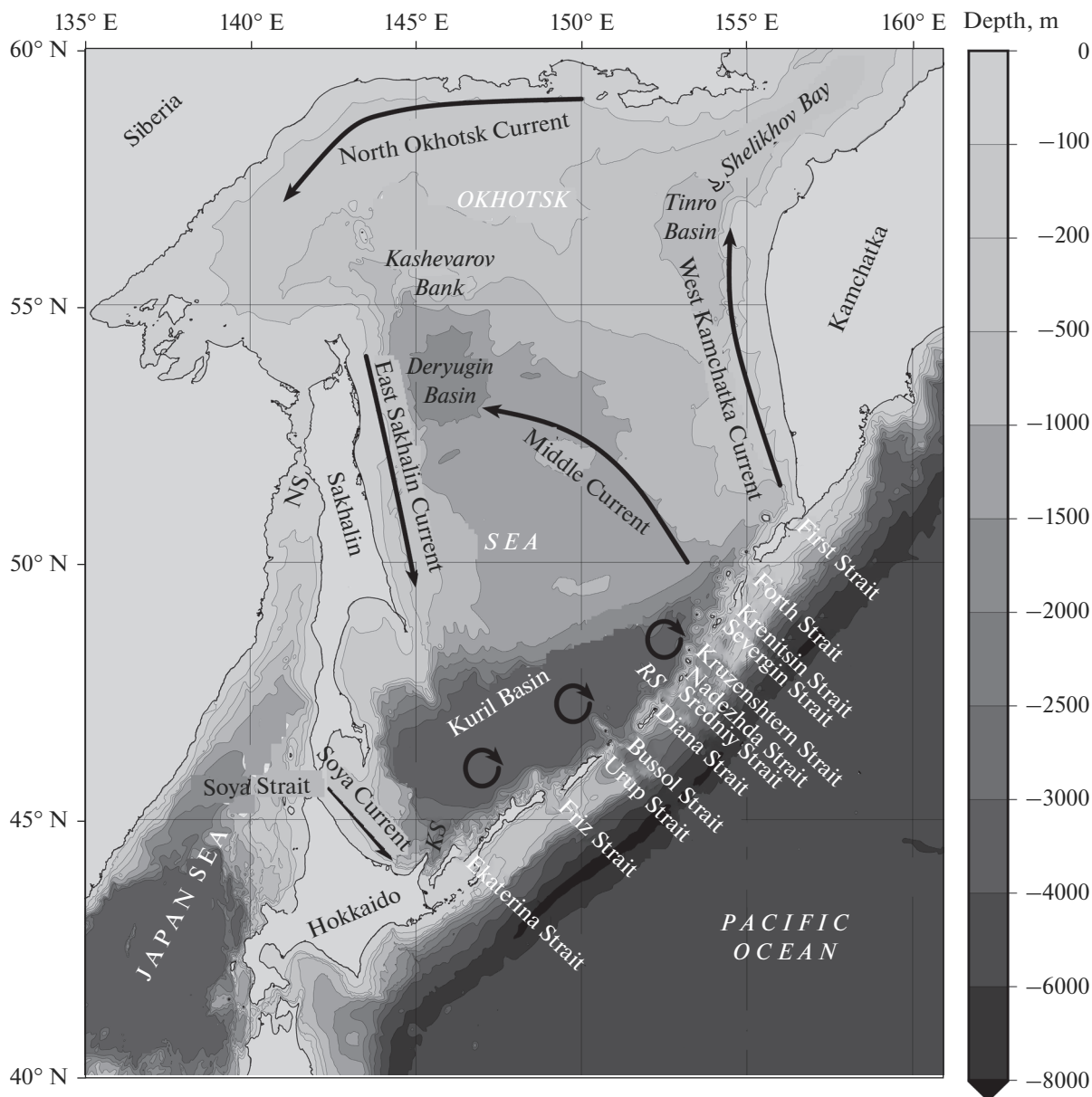


Рис. 1. Батиметрия Охотского моря со схемой основных течений. NS, RS и KS – проливы Невельского, Рикорда и Кунаширский соответственно.

ливы изучен недостаточно. Недавние исследования показали, что циркуляция ОМ имеет сложную сезонную изменчивость – для каждого сезона существует ряд уникальных особенностей. Кроме того, Северо-Охотское течение имеет сложную структуру и состоит из двух ветвей: прибрежной и надсклоновой [20]. По этим причинам тихоокеанская вода может распространяться в ОМ очень сложным образом.

В данной работе используются вихре-допускающая модель циркуляции RIAMOM и лагранжевый подход для следующих целей: 1) моделирование путей переноса тихоокеанской воды из океана на

северный шельф ОМ через северные Курильские проливы; 2) уточнение путей переноса охотоморской воды с северо-запада ОМ в Тихий океан через южные Курильские проливы; 3) оценка водообмена через основные Курильские проливы и их сезонной изменчивости.

2. МОДЕЛЬ И ДАННЫЕ

Используемая в работе модель океана RIAMOM была разработана в Научно-исследовательском институте прикладной механики Университета Кюсю. Область моделирования имеет прямо-

угольную форму и лежит в пределах 129°E – 165°E и 40°N – 65°N с горизонтальным разрешением $1/18^{\circ}$ (в диапазоне 3–6 км). Вертикальное разрешение от 10 до 125 м от поверхности до 2500 м и на 250 м ниже глубины 2000 м. Модель основана на трехмерных примитивных уравнениях движения в z -системе координат с граничным условием “свободная поверхность”, предполагающим гидростатическое приближение и приближение Буссинеска. Модель была подробно описана в [21], а недавно – в [20, 22]. Поэтому ниже дается только краткое описание.

Данные батиметрии брались с банка данных GEBCO One Minute Grid. Начальные условия и условия на жидкой границе брались из результатов моделирования, полученных с использованием модели Тихого Океана с разрешением $1/6^{\circ}$ [23]. На открытой границе используется тип граничных условий nudging-layer [24]. Это граничное условие применяется к уровню моря, к u - и v -компонентам скорости течений, к температуре и солёности. Толщина nudging-layer около 100 км. Использование nudging-layer приводит к условию Дирихле в узлах на открытой границе. В зоне nudging-layer шириной 100 км вдоль открытых границ данные моделирования релаксируются по отношению к внешним данным.

В работе используется простой метод усвоения сплоченности морского льда из данных спутниковых наблюдений (NOAA/National Climatic Data Center) для расчета потоков тепла, соли и количества движения на поверхности воды подо льдом. Предполагается, что эти потоки обратно пропорциональны сплоченности морского льда. Таким образом, если сплоченность льда близка к единице, то атмосферные потоки тепла и соли близки к нулю. В этом случае полный поток тепла рассчитывается на основе спутниковой температуры поверхности океана, а полный поток соли – по климатическим данным солёности на поверхности (подробнее см. [20]). Увеличение солёности морской воды из-за сброса рассола во время роста морского льда с декабря по февраль и уменьшение солёности поверхностных вод во время таяния льда в марте–апреле были учтены восстановлением наблюдаемой поверхностной солёности из Атласа Мирового океана 2001. Потоки тепла и пресной воды были пересчитаны с использованием данных о концентрации морского льда, взятых из NOAA/National Climatic Data Center.

Расчеты проводились за период с 1 января 1991 г. по 31 декабря 2000 г. Суточные данные сплоченности морского льда, спутниковой температуры на поверхности, скорости ветра, потока тепла, потока испарение–осадки были сглажены скользящим средним с интервалом в пять суток. Остальные внешние поля усреднялись по месяцам. В данном исследовании анализировались результаты моде-

лирования за каждый день с 1991 по 2000 гг. Модельные поля скорости течения, температуры и солёности сравнивались с данными наблюдений за этот период, когда было достаточно океанографических наблюдений для валидации модели. Результатами модели являются среднесуточные поля температуры, солёности, уровня и течений за период с 1991 по 2000 гг., которые будут использоваться для лагранжевого моделирования в разделе 4.

3. ОЦЕНКА ВОДООБМЕНА МЕЖДУ ТИХИМ ОКЕАНОМ И ОХОТСКИМ МОРЕМ ЧЕРЕЗ КУРИЛЬСКИЕ ПРОЛИВЫ

Обобщенная схема циркуляции ОМ представлена на рис. 1. Что касается водообмена море–океан, то тихоокеанская вода проникает в ОМ в основном через северные Курильские проливы и переносится Западно-Камчатским и Срединным течениями. Срединное течение следует изобате 500 м. Западно-Камчатское течение следует по материковому склону и разделяется на северную ветвь, впадающую в залив Шелихова, и надсклоновую ветвь Северо-Охотского течения, которая следует по северному континентальному склону между котловиной ТИНРО и банкой Кашеварова (рис. 1). Срединное течение и надсклоновая ветвь Северо-Охотского течения сходятся восточнее банки Кашеварова и впадают в надсклоновую ветвь Восточно-Сахалинского течения. Прибрежная ветвь Северо-Охотского течения проходит по северному шельфу, а прибрежная ветвь Восточно-Сахалинского течения – по западному шельфу. В циркуляции ОМ наблюдается сильная сезонная изменчивость с четырьмя различными типами, каждый для своего сезона, тогда как внутри-сезонная изменчивость слабая.

Ранние исследования транспорта вод через Курильские проливы дают только приблизительные оценки, основанные либо на синтезе разрозненных инструментальных измерений [25–32], либо на диагностических моделях [9, 33–35]. Эти оценки не согласуются друг с другом. Например, транспорт вод из Тихого океана в ОМ через Четвертый Курильский пролив оценивается в очень широком диапазоне: от 0.62–0.86 Св [33] и 0.8 Св [10] до 10.92 Св [35]. Что касается транспорта через этот пролив из ОМ в Тихий океан, он оценивается в 0.5 Св в августе и 0.7 Св в декабре [34]. Относительно подробные инструментальные измерения проводились только в проливах Буссоль и Крузенштерна.

Транспорт через пролив Крузенштерна оценивается примерно в 4 Св, но может достигать 12 Св из-за сезонной изменчивости [36]. Измерения с помощью акустического доплеровского измерителя течений летом 1999 г. показали выток из ОМ 1.6 Св в верхнем слое и вток в ОМ 1.3 Св в нижнем слое. Суммарный выток из ОМ через пролив Кру-

зенштерна оценивается в 0.3 Св [37]. Измерения в проливе Крузенштерна и гидрографические данные в августе и сентябре 1999 г. показали выток около 1.3 Св [38]. Обобщая результаты инструментальных измерений в проливе Буссоль, было установлено, что вток в ОМ составляет от 5 Св [39] до 9.8 Св [40], а выток из ОМ оценивается в 2.5 Св [41]. Измерения в проливе Буссоль показали отток 2.1 Св в августе–сентябре 1999 г. [38] и 8.2–8.8 Св в сентябре 2001 г. [42]. Большинство исследований сходятся во мнении, что: 1) тихоокеанские воды проникают в ОМ через северные проливы, тогда как охотоморская вода проникает в океан через южные проливы [43–46]; 2) транспорт из океана в море прямо пропорционален объемному переносу Курило-Камчатским течением [36, 47].

Таким образом, общепринятых оценок водообмена через Курильские проливы нет. Далее на основе результатов моделирования анализируется водообмен через разные проливы. Разрешение по горизонтали $1/18^\circ$ эквивалентно 3–6 км и позволяет нам выделить 14 Курильских проливов из 26. Результаты моделирования показывают, что наиболее важными из этих 14 проливов являются семь: Четвертый, Крузенштерна, Надежда, проливы Буссоль, Уруп, Фриз и Екатерина (табл. 1 и 2). Их вклад в общий водообмен между Тихим океаном и Охотским морем оценивается примерно в 95%. Тихоокеанские воды проникают в ОМ через северные проливы, а охотоморские вытекают через южные проливы. Средний расход вод в ОМ через проливы Крузенштерна, Четвертый и Надежда оцениваются в 1.1, 0.46 и 0.18 Св соответственно. Средний расход вод из ОМ через проливы Буссоль, Фриз и Екатерина составляют 0.79, 0.81 и 0.4 Св соответственно.

Среднемесячные значения расходов через основные проливы показаны в табл. 1 и на рис. 2 для интегрированного по глубине переноса и для переноса в отдельных слоях модели. Что касается интегрированного по глубине переноса, то он имеет два локальных максимума: первый – при переходе от зимы к весне и второй – от осени к зиме, и минимум при переходе от лета к осени (рис. 2а). Наиболее важными из них являются проливы Буссоль и Крузенштерна, на долю которых приходится половина общего водообмена. Тихоокеанские воды проникают в ОМ через Четвертый Курильский пролив в течении всего года. Максимальный расход 1.1 Св – в феврале, минимальный – в августе. Тихоокеанские воды проникают в ОМ через пролив Крузенштерна с января по сентябрь, а отток происходит с октября по декабрь с максимальным втоком 3.6 Св в марте и максимальным вытоком 1.3 Св в ноябре. Тихоокеанские воды проникают в ОМ через пролив Надежда круглый год с максимальным втоком 0.3 Св в декабре и минимальным – в июне–июле.

Охотоморская вода вытекает в океан через пролив Буссоль с января по сентябрь, а тихоокеанские воды проникают в море через этот пролив с октября по декабрь с максимальным вытоком 3.1 Св в марте и максимальным втоком 2.1 Св в ноябре. В проливе Уруп вода вытекает в океан круглый год с максимальным переносом 0.3 Св в ноябре и декабре. Вода ОМ вытекает в океан через пролив Фриза в течение года с максимальным значением 1.4 Св с февраля по апрель и минимальным значением с августа по сентябрь. Охотоморская вода вытекает в океан через пролив Екатерины круглый год с максимальным значением 0.7 Св в период с ноября по декабрь и минимальным значением в период с июня по июль.

Помимо интегрированного по глубине переноса, табл. 1 содержит значения переноса в четырех репрезентативных слоях модели, 1-м, или поверхностном (0–10 м), 5-м (40–50 м), 15-м (190–215 м) и 23-м уровне (495–545 м). Их сезонный ход показан на рис. 2б–д. Сезонная изменчивость водообмена через Курильские проливы в слоях ниже 100 м (где влияние ветра незначительно) оказывается аналогичной интегральному водообмену. В поверхностном слое тихоокеанская вода проникает в море в основном через северные проливы (Четвертый Курильский, Крузенштерна и Надежды), а охотоморская вода выходит в океан через южные проливы (Буссоль, Уруп, Фриза и Екатерины). Вклад всех проливов примерно одного порядка для поверхностного слоя. Пролиты Крузенштерна и Буссоль вносят наибольший вклад в водообмен из-за своей глубины (рис. 2д). Транспорт через пролив Надежды слабый и отсутствует через другие проливы, которые слишком мелководны. В табл. 2 показан процентный вклад каждого пролива в водообмен между Тихим океаном и ОМ от дна к поверхности, а также в каждом представительном слое модели.

Наши подробные оценки водообмена между ОМ и Тихим океаном подтверждают общее мнение [5, 18, 48], основанное на данных альтиметрии, дрейфующих буев и поверхностных дрейфтеров, а также на редких гидрографических исследованиях (см. ссылки во Введении), что усиление водообмена происходит в холодное время года с ноября по май, при этом вток в ОМ происходит через северные проливы, а выток – через южные проливы.

Было обнаружено, что проливы Крузенштерна и Буссоль пропускают воду в двух направлениях: в море и из моря (см. табл. 1 и рис. 2). Моделируя распространение виртуальных лагранжевых частиц в модельном поле скоростей, в следующем разделе мы покажем, что большая часть тихоокеанских вод, впадая в ОМ через пролив Крузенштерна, глубоко проникает в море, участвует в циклонической циркуляции и вытекает обратно

Таблица 1. Сезонный ход интегрированного по глубине переноса (в свердрупах) и переноса в отдельных слоях модели через семь основных Курильских проливов (в 0.01 Свердрупа). Положительные (отрицательные) значения соответствуют втоку в Охотском море (вытоку из Охотского моря)

Интегрированный по глубине												
	янв	фев	мар	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек
Четвертый Курильский	1.0	1.1	0.9	0.6	0.3	0.2	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.7
Крузенштерн	1.3	3.0	3.6	3.2	2.1	1.3	0.4	0.0	0.1	-0.4	-1.3	-0.6
Надежды	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3
Буссоль	-0.3	-2.3	-3.1	-2.6	-1.9	-1.5	-0.8	-0.5	-0.5	0.4	2.1	1.8
Уруп	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3
Фриза	-1.2	-1.4	-1.4	-1.4	-1.1	-0.6	-0.4	-0.1	-0.1	-0.2	-0.5	-0.9
Екатерины	-0.6	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.0	-0.2	-0.4	-0.5	-0.7	-0.7
Первый слой (0–10 м)												
	янв	фев	март	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек
Четвертый Курильский	8.4	8.3	5.8	4.1	2.0	1.0	0.2	0.1	0.9	1.1	-1.7	4.3
Крузенштерн	2.7	4.6	5.0	5.9	4.5	3.7	1.8	0.5	0.1	-2.1	-6.3	-2.6
Надежды	1.3	1.2	0.4	0.4	0.2	-0.1	0.0	-0.2	0.0	-0.7	-2.0	-0.1
Буссоль	-3.6	-7.1	-7.0	-4.6	-5.0	-4.9	-3.9	-3.3	-2.5	-4.6	-6.1	-5.0
Уруп	-2.1	-1.9	-2.3	-1.9	-2.4	-1.3	-1.3	-1.3	-1.8	-3.8	-5.5	-4.2
Фриза	-10.8	-11.9	-10.1	-8.2	-6.1	-3.5	-2.7	-2.7	-3.1	-6.5	-9.5	-10.9
Екатерины	-8.7	-6.8	-5.2	-3.5	-1.2	0.4	-0.3	-2.7	-5.0	-7.6	-8.9	-10.2
Пятый слой (40–50 м)												
	янв	фев	март	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек
Четвертый Курильский	6.3	6.7	5.3	3.7	2.1	1.0	0.3	0.4	1.3	2.1	1.6	4.4
Крузенштерн	2.8	5.2	6.5	6.4	5.1	3.9	2.5	1.7	1.7	1.3	0.0	0.5
Надежды	0.6	0.3	0.4	0.6	0.6	0.1	0.1	0.2	0.5	0.6	0.6	0.7
Буссоль	0.0	-1.7	-3.2	-3.4	-3.7	-3.8	-2.8	-1.8	-1.0	-0.6	-0.1	0.5
Уруп	-1.0	-0.6	-0.9	-1.2	-1.3	-0.8	-0.7	-0.6	-0.8	-1.4	-1.9	-1.8
Фриза	-6.2	-6.2	-6.3	-6.1	-4.7	-2.8	-1.9	-1.3	-1.2	-2.8	-4.7	-5.9
Екатерины	-4.5	-3.1	-2.6	-1.8	-0.4	0.3	-0.3	-1.7	-3.2	-4.8	-5.4	-5.6
Пятнадцатый слой (190–215 м)												
	янв	фев	март	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек
Четвертый Курильский	4.1	4.8	4.2	3.0	1.6	0.8	0.1	0.3	0.7	0.7	0.8	2.8
Крузенштерн	5.4	11.9	14.8	13.8	10.2	7.1	3.7	1.9	1.8	0.2	-2.8	-1.1
Надежды	0.8	0.5	0.8	1.0	1.1	0.0	0.1	0.5	1.0	1.4	1.3	1.3
Буссоль	-0.8	-5.3	-7.6	-7.0	-5.6	-4.6	-3.1	-2.0	-1.6	-0.7	1.5	1.9
Уруп	-0.3	-0.4	-1.0	-1.2	-1.0	-0.6	-0.3	0.0	-0.2	-0.6	-0.4	-0.9
Фриза	-4.4	-6.0	-6.3	-6.3	-5.4	-3.4	-1.7	-0.1	0.6	0.4	-0.1	-2.3
Двадцать третий слой (495–545 м)												
	янв	фев	март	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек
Крузенштерна	3.8	10.2	12.1	9.9	5.2	1.5	-1.8	-2.9	-2.5	-4.3	-7.7	-4.3
Надежды	-0.3	0.1	0.9	0.8	0.7	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.2
Буссоль	-0.9	-8.9	-11.6	-9.1	-5.9	-4.0	-1.3	-0.3	-0.4	1.1	6.5	6.0

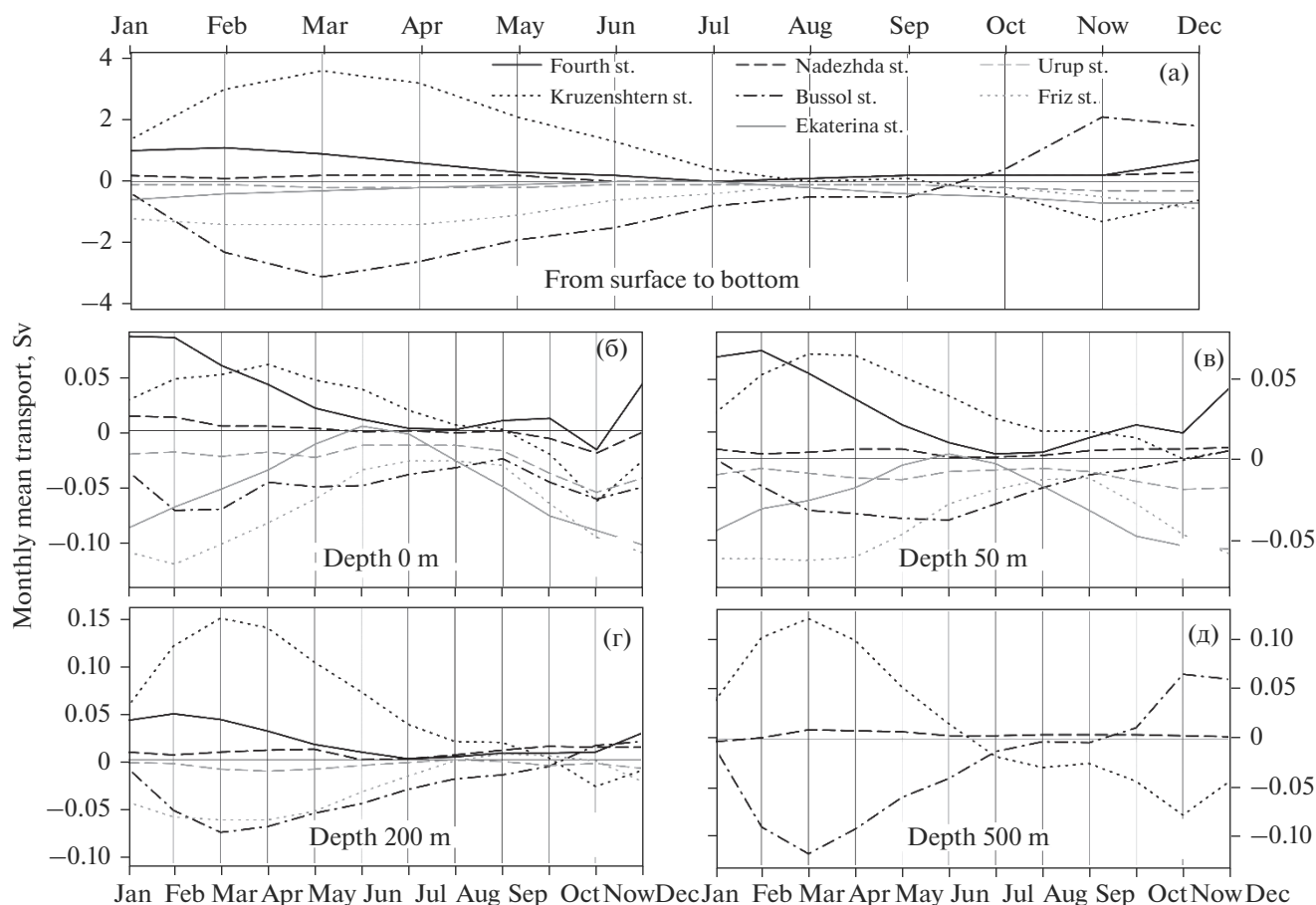


Рис. 2. Графики среднемесячного объемного расхода через основные Курильские проливы в Свердрупах. (а) интегрированный по глубине расход, (б), (в), (г) и (д) расход в 1-м, 5-м, 15-м и 23-м слоях модели. Положительные (отрицательные) значения указывают на вток в Охотское море (выток из Охотского моря).

преимущественно через пролив Буссоль. Меньшая часть поступающей океанской воды не участвует в этой циркуляции, но на какое-то время задерживается в районе Курильской котловины (рис. 3), адвектируясь и перемешиваясь там разнонаправленными течениями и вихрями. В период с октября по декабрь она возвращается в океан.

Пролив Буссоль играет еще одну роль. Вода ОМ поступает в океан преимущественно через этот пролив, следуя основной циклонической циркуляции. Осенью тихоокеанская вода может впадать в море через пролив Буссоль, но на время задерживается в районе Курильской котловины (рис. 4).

Таблица 2. Вклад основных проливов (в процентах) в водообмен между Тихим океаном и Охотским морем

	Интегрированный по глубине	1-й слой (0–10 м)	5-й слой (40–50 м)	15-й слой (190–215 м)	23-й слой (495–545 м)
Четвертый Курильский	12	12	18	13	0
Круzenshtерна	29	6	19	38	37
Надежды	4	0	3	5	9
Буссоль	21	20	11	20	55
Уруп	5	10	7	4	0
Фриза	20	30	26	20	0
Екатерины	9	21	17	0	0

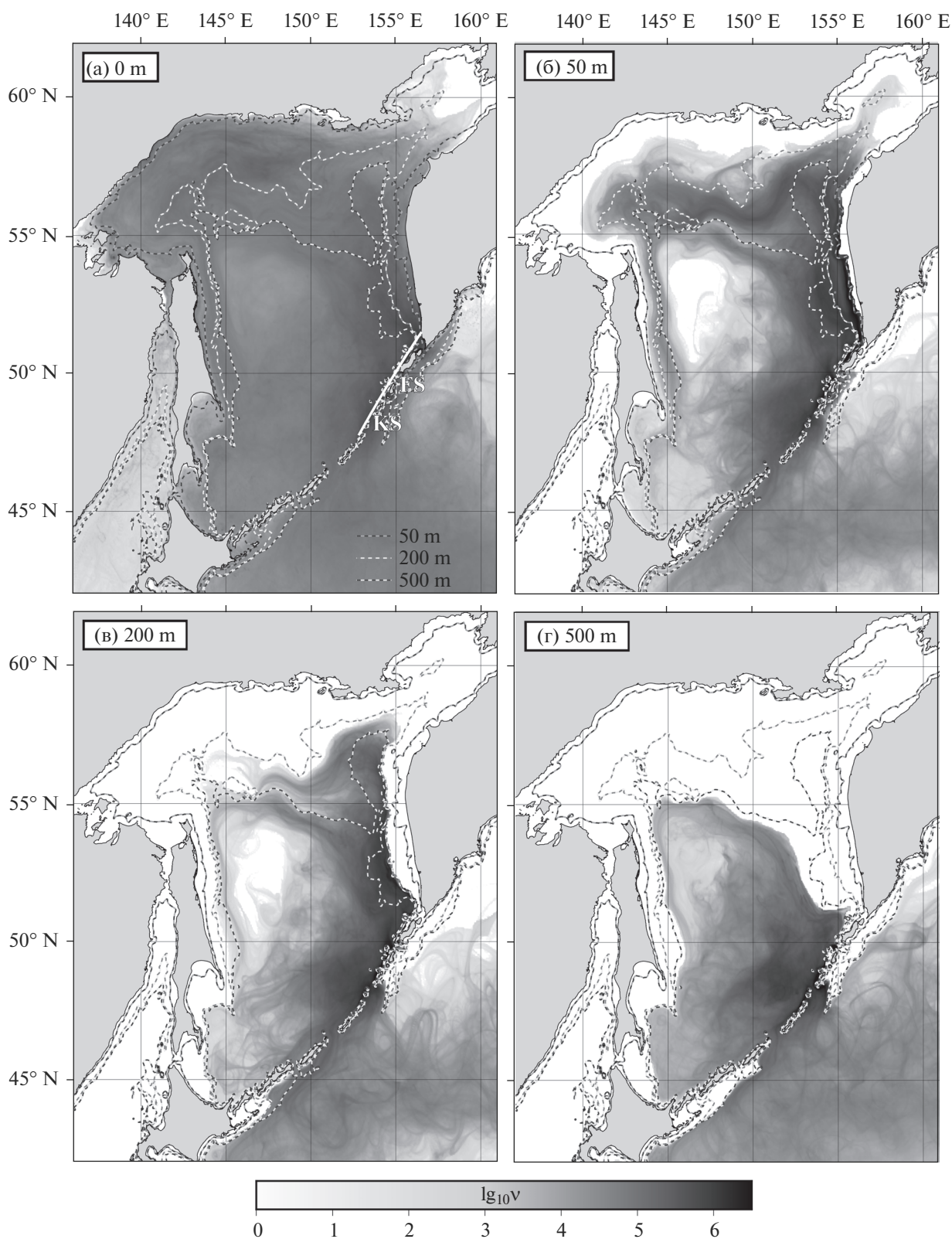


Рис. 3. Лагранжевы дазиметрические карты показывают пути переноса воды северо-западной части Тихого океана, втекающей в море через северные Курильские проливы в 1-м, 5-м, 15-м и 23-м модельных слоях. Графики плотности частиц показаны в логарифмическом масштабе с указанием изобат 50, 200 и 500 м. См. объяснение в тексте.

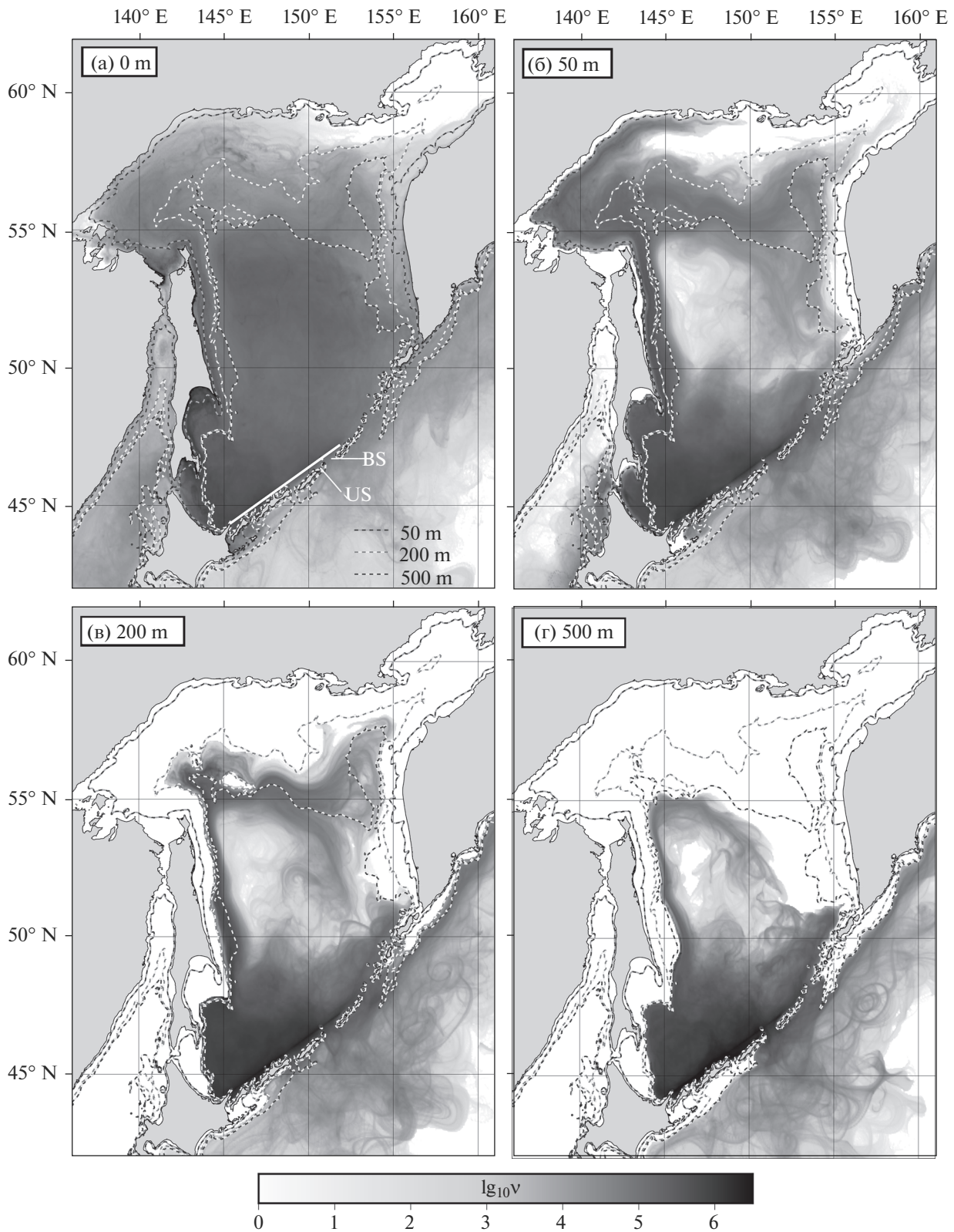


Рис. 4. Лагранжевы дазиметрические карты показывают пути переноса охотоморской воды, вытекающей из моря через южные и центральные Курильские проливы в 1-м, 5-м, 15-м и 23-м модельных слоях. См. объяснение в тексте.

4. ПУТИ ПЕРЕНОСА ТИХООКЕАНСКИХ И ОХОТОМОРСКИХ ВОД

В этом разделе мы применяем лагранжев подход [49–51] для моделирования распространения тихоокеанских и охотоморских вод. Траектории пассивных искусственных частиц внутри каждого модельного слоя вычисляются путем решения уравнений адвекции

$$\frac{d\lambda}{dt} = u(\lambda, \varphi, t), \quad \frac{d\varphi}{dt} = v(\lambda, \varphi, t), \quad (1)$$

где u и v – угловая зональная и меридиональная скорости, φ и λ – широта и долгота соответственно. Бикубическая интерполяция по пространству и полиномы Лагранжа третьего порядка по времени используются для вычисления двумерных траекторий путем интегрирования уравнений по схеме Рунге–Кутты четвертого порядка.

Чтобы выделить пути распространения тихоокеанских вод вдоль основных течений в ОМ, были рассчитаны карты плотности или дазиметрические карты [52, 53], как показано ниже. Искусственные частицы запускались каждые 3 дня с 1 января 1991 г. по 31 декабря 1999 г. на приморском участке (показанном на рис. 3а), пересекающем северные Курильские проливы от Надежды до Четвертого Курильского. В каждом эксперименте запускалось 30000 частиц, интегрировались уравнения адвекции (1) вперед во времени в поверхностном (0–10 м), 5-м (40–50 м) и 15-м (190–215 м) слоях в течение одного года и 1.5 лет в 23-м слое (495–545 м) из-за меньших скоростей в этом слое. Дазиметрические карты на рис. 3 получены путем подсчета для каждого слоя числа частиц, попавших в ячейки размером $0.058^\circ \times 0.044^\circ$ с общим количеством ячеек 500×500 , охватывающих ОМ и прилегающую территорию. Таким образом, панели на рис. 3 показывают в логарифмическом масштабе накопленную плотность траекторий за этот период времени. Это не набор траекторий частиц, а, скорее, плотность траекторий, показывающая пути входящих тихоокеанских вод.

Лагранжевое моделирование переноса тихоокеанских вод в поверхностном модельном слое показывает, что тихоокеанская вода покрывает практически всю поверхность моря, за исключением залива Шелихова (см. рис. 3а). Широкое распространение путей переноса наблюдается при сильных северных и северо-восточных ветрах. Важнейшие пути переноса тихоокеанских вод в поверхностном слое к северо-западному шельфу моря, особенно зимой и весной, проходят через Западно-Камчатское течение и над склоновой ветвью Северо-Охотского течения (рис. 3а). Часть тихоокеанских вод переносится Западно-Камчатским течением к северному побережью ОМ, затем эта вода переносится прибрежной ветвью

Северо-Охотского течения и в конечном итоге впадает в Восточно-Сахалинское течение. В апреле и мае тихоокеанская вода могла быть перенесена на северо-западный шельф Срединным течением.

Дазиметрические карты в логарифмическом масштабе на рис. 3 выделяют наиболее вероятные пути распространения тихоокеанских вод в ОМ. Значения плотности сильно различаются в разных частях моря. В подповерхностном 5-м слое основными путями распространения тихоокеанских вод являются надсклоновые ветви Западно-Камчатского течения и Срединного течения (см. карту на рис. 3б, на которой пути переноса тихоокеанских вод показаны более темным цветом). Результаты моделирования на основе RIAMOM хорошо соответствуют результатам, полученным в работе [53], где в течение длительного периода времени (1993–2012 гг.) проводилось обширное лагранжево моделирование приповерхностного переноса воды Аляскинского течения на основе альтиметрических данных. Там показано, что вода Тихого океана поступает в ОМ через северные Курильские проливы с интенсификацией в декабре–апреле и с уменьшением в мае–ноябре. График интегрированного по глубине объемного переноса через 4-й пролив и пролив Крузенштерна на рис. 2а показывает увеличение и уменьшение переноса через эти северные проливы в те же периоды времени. Что касается межгодовой изменчивости, то она определяется в основном периодами усиления и ослабления Аляскинского течения [53].

Поступающие из океана частицы переносятся к северному Сахалину по циклонической траектории, а затем выносятся на юг прибрежной и надсклоновой ветвями Восточно-Сахалинского течения. Для того чтобы тихоокеанские воды в подповерхностном слое достигли южных Курильских проливов и проникли в Тихий океан, одного года недостаточно (см. карту на рис. 3а, рассчитанную для одного года). Тихоокеанская вода достигает мелководной зоны вокруг банки Кашеварова в подповерхностном слое, но не распространяется в центральной части ОМ с глубинами 1000 м.

Численные эксперименты с частицами, запущенными через Четвертый Курильский пролив и пролив Крузенштерна по отдельности (соответствующие рисунки не приводятся), показывают, что тихоокеанская вода, проникающая в ОМ через Четвертый Курильский пролив, переносится прибрежной частью Западно-Камчатского течения. Тихоокеанская вода, проникающая через пролив Крузенштерна, частично адвектируется надсклоновой частью Западно-Камчатского течения и Срединным течением и частично захватывается в районе Курильской котловины, попа-

дая туда разнонаправленными течениями и водоворотами. Некоторая часть тихоокеанской воды после непродолжительного времени возвращается обратно в Тихий океан.

В промежуточном 15-м слое тихоокеанская вода адвектируется прибрежной частью Западно-Камчатского течения и Срединным течением. Затем она распространяется на юг в надсклоновой ветви Восточно-Сахалинского течения (рис. 3в). Тихоокеанская вода в промежуточном 23-м слое следует, в основном, по Срединному течению, а затем переносится надсклоновой ветвью Восточно-Сахалинского течения. Тихоокеанская вода в 23-м слое распространяется медленнее, чем в верхних слоях, и достигает той же широты, что и в 15-м слое, только через 1.5 года (см. карту на рис. 3г, рассчитанную для 1.5 года). Этот слой заполнен тихоокеанской водой в центральной части ОМ за исключением участка впадины Дерюгина с глубинами 1500 м. Картина в районе Курильской котловины аналогична таковой для других слоев.

Для моделирования вытока из Охотского моря в Тихий океан частицы запускались с 1 января 1992 г. по 31 декабря 2000 г. на приморском участке, пересекающем все южные и центральные Курильские проливы (см. рис. 4а) от острова Хоккайдо до пролива Буссоль. Уравнения адвекции (1) были интегрированы назад во времени в течение 1 года для 1-го, 5-го и 15-го слоев и в течение 1.5 лет для 23-го слоя. Подсчитывая частицы для каждого слоя и в каждой ячейке, можно получить дазиметрические карты в обратном времени на рис. 4, которые интерпретируются следующим образом.

Транспортные пути охотоморских вод в целом соответствуют основным направлениям втока (см. рис. 3), за исключением одного важного момента. Существует дополнительный путь в подповерхностном слое от северного и северо-западного шельфа, по которому модифицированная тихоокеанская вода втекает в прибрежную ветвь Восточно-Сахалинского течения. Уникальная водная масса, плотная шельфовая вода, образуется в прибрежных полыньях на северном и северо-западном шельфе и на банке Кашеварова путем сброса рассола во время образования морского льда в зимний период [8, 12]. Из рис. 4в, 4г можно предположить, что плотная шельфовая вода переносится в промежуточном слое ОМ на глубинах между 15-м и 23-м слоями RIAMOM (190–545 м) и в конечном итоге вытекает в океан, становясь одним из источников холодной, пресной и богатой кислородом промежуточной воды северной части Тихого океана [43, 44].

Повышенная концентрация частиц в южной части ОМ объясняется адвекцией мезомасштабными вихрями, регулярно присутствующими в этом районе, и последующим вытоком воды через юж-

ные Курильские проливы. В 5-м слое дазиметрическая карта на рис. 4а показывает приток из Японского моря в ОМ через мелководный пролив Соя/Лаперуза. Следует подчеркнуть, что карты на рис. 4 были рассчитаны во времени назад. Таким образом, высокая концентрация следов частиц вдоль Восточно-Камчатского течения и течения Ойясио на океанской стороне Курильских островов просто означает, что большое число частиц было перенесено на отмеченный на этом рисунке сегмент этими течениями с севера.

5. ВЫВОДЫ

Оценки водообмена между Тихим океаном и Охотским морем через Курильские проливы на основе результатов моделирования RIAMOM показывают следующее. Наиболее важными проливами Курильской гряды являются проливы Буссоль, Крузенштерна, Фриз, Екатерина, Четвертый, проливы Надежды и Уруп (в порядке убывания значимости). На эти проливы приходится около 95% общего водообмена между морем и океаном (табл. 1). Одним из важных результатов исследования является то, что роль проливов Буссоль и Крузенштерна в водообмене ранее была значительно переоценена. Это становится понятным, если посмотреть на вклад каждого пролива в водообмен между Тихим океаном и Охотским морем на разных глубинах. Большой вклад проливов Крузенштерна и Буссоль является следствием их глубины. В активном двухсотметровом слое вклад проливов Четвертого Курильского, Фриза и Екатерины в водообмен сопоставим с вкладом проливов Крузенштерна и Буссоля (табл. 2).

Лагранжево моделирование переноса тихоокеанских вод в поверхностном слое показывает, что на него сильно влияет ветер, при этом широко распространенные пути переноса наблюдаются при сильных северных или северо-восточных ветрах. Важнейшими путями переноса на поверхности к северо-западному шельфу Охотского моря являются Западно-Камчатское течение и надсклоновая ветвь Северо-Охотского течения. Тихоокеанская вода переносится Западно-Камчатским течением к северному побережью Охотского моря, затем эта вода переносится прибрежной ветвью Северо-Охотского течения и в конечном итоге впадает в Восточно-Сахалинское течение. В приповерхностном слое (50 м) тихоокеанская вода переносится Западно-Камчатским течением и надсклоновой ветвью Северо-Охотского течения. На этой глубине Срединное течение формируется внутренними водами Охотского моря, а все тихоокеанские воды впадают в Восточно-Сахалинское течение. На глубине ниже 200 м тихоокеанские воды все равно не доходят до северного шельфа Охотского моря. На глубине 500 м и

глубже водообмен между Тихим океаном и Охотским морем значительно меньше из-за слабых течений на таких глубинах. Было обнаружено, что пути вытока воды из моря в целом соответствуют основным путям втока в море.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана Российским научным фондом (проект 19-17-00006). В рамках Государственного задания ТОИ ДВО РАН разработано программное обеспечение для расчета лагранжевых карт (проект № 121021700341-2). Модель Охотского моря была создана в Суперкомпьютерном отделе и Центре информационных технологий (Токийский университет, Япония) и в ЦКП “Дальневосточный вычислительный ресурс” ИАПУ ДВО РАН (<https://cc.dvo.ru>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stabeno P.J., Reed R.K., Overland J.E.* Lagrangian measurements in the Kamchatka Current and Oyashio // *J. Oceanography*. 1994. V. 50(6). P. 653–662.
2. *Самко Е.В., Новиков Ю.В.* Среднегодовое географическое строение циркуляции вод Прикурильского района Тихого океана // *Океанология*. 2004. Т. 44. № 1. С. 5–10.
3. *Samko E.V., Glebova S.Y., Petruk V.M.* The influence of atmospheric processes on the water circulation off the west Kamchatka coast // *PICES Scientific Reports*. 2004. V. 26. P. 7–12.
4. *Андреев А.Г., Шевченко Г.В.* Межгодовая изменчивость переноса вод Восточно-Камчатским и Восточно-Сахалинским течениями и их влияние на концентрацию растворенного кислорода в Охотском море и тихоокеанской субарктике // *Метеорология и гидрология*. 2008. № 10. С. 70–79.
5. *Katsumata K., Yasuda I.* Estimates of non-tidal exchange transport between the Sea of Okhotsk and the North Pacific // *J. Oceanogr.* 2010. V. 66(4). P. 489–504.
6. *Figurkin A.L., Ovsyannikov E.E.* Influence of oceanological conditions of the West Kamchatka shelf waters on spawning grounds and on pollock egg distribution // *PICES Scientific Reports*. 1999. V. 12. P. 107–114.
7. *Figurkin A.L., Zhigalov I.A.* Seasonal variability and specificity of the oceanological conditions in the northern Okhotsk Sea in 1997 // *PICES Scientific Reports*. 1999. V. 12. P. 55–60.
8. *Гладышев С.В., Хен Г.В.* Распространение тихоокеанских вод в Охотском море // *Докл. АН*. 2004. Т. 397. № 6. С. 823–826.
9. *Васильев А.С., Храпченков Ф.Ф.* Сезонная изменчивость циркуляции вод и водообмена Охотского моря с Тихим океаном // *Метеорология и гидрология*. 1998. № 6. С. 59–67.
10. *Matsuda J., Mitsudera H., Nakamura T., Sasajima Y., Hasumi H., Wakatsuchi M.* Overturning circulation that ventilates the intermediate layer of the Sea of Okhotsk and the North Pacific: The role of salinity advection // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2015. V. 120. № 3. P. 1462–1489.
11. *Пищальник В.М., Архипкин В.С., Юрасов Г.И., Ермоленко С.С.* Сезонные вариации циркуляции вод в прибрежных районах острова Сахалин // *Метеорология и гидрология*. 2003. № 5. С. 87–96.
12. *Гладышев С.В., Хен Г.В., Кантаков Г.А.* Межгодовая изменчивость формирования охотоморских промежуточных вод // *Докл. АН*. 2004. Т. 398. № 5. С. 691–695.
13. *Шевченко Г.В., Частиков В.Н.* Сезонные и межгодовые вариации океанологических условий в юго-западной части Охотского моря // *Метеорология и гидрология*. 2007. № 3. С. 69–85.
14. *Шевченко Г.В., Частиков В.Н.* Сезонные вариации океанологических условий у юго-восточного побережья Сахалина // *Метеорология и гидрология*. 2008. № 8. С. 70–86.
15. *Кусайло О.В., Шевченко Г.В., Частиков В.Н.* Экстремальные неперидические течения в районе северо-восточного шельфа острова Сахалин // *Докл. АН*. 2013. Т. 448. № 2. С. 218–223.
16. *Пищальник В.М., Архипкин В.С., Леонов А.В.* Восстановление термохалинных полей Татарского пролива на основе численного моделирования // *Вод. ресурсы*. 2009. Т. 36. № 6. С. 655–667.
17. *Ohshima K.I., Wakatsuchi M., Fukamachi Y., Mizuta G.* Near-surface circulation and tidal currents of the Okhotsk Sea observed with satellite-tracked drifters // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2002. V. 107(C11). P. 3195.
18. *Ohshima K.I., Nakanowatari T., Riser S., Wakatsuchi M.* Seasonal variation in the in- and outflow of the Okhotsk Sea with the North Pacific // *Deep-Sea Res., Part A*. 2010. V. 57. P. 1247–1256.
19. *Uchimoto K., Nakamura T., Nishioka J., Mitsudera H., Yamamoto-Kawai M., Misumi K., Tsumune D.* Simulations of chlorofluorocarbons in and around the Sea of Okhotsk: Effects of tidal mixing and brine rejection on the ventilation // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2011. V. 116(C2). P. C02034.
20. *Fayman P.A., Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu.* New circulation features in the Okhotsk Sea from a numerical model // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2020. V. 56. P. 618–631.
21. *Fayman P.A., Yoon J.H.* The numerical simulation of seasonal variability of the upper circulation in the Okhotsk Sea // *Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University*. 2012. V. 142. P. 1–20.
22. *Ponomarev V., Fayman P., Prants S., Budyansky M., Uleysky M.* Simulation of mesoscale circulation in the Tatar Strait of the Japan Sea // *Ocean Modelling*. 2018. V. 126. P. 43–55.
23. *You S.-H., Yoon J.-H.* High-resolution numerical simulation of the Pacific Ocean // *Asia-Pacific J. Atmospheric Sciences*. 2010. V. 46. № 1. P. 97–112.

24. *Marchesiello P., McWilliams J.C., Shchepetkin A.F.* Open boundary conditions for long-term integration of regional ocean models // *Ocean Modelling*. 2001. V. 3. P. 1–20.
25. *Леонов А.К.* Региональная океанография. Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 766 с.
26. *Перегудин А.С.* Перенос вод и тепла в деятельном слое Охотского моря // *Тр. ДВНИГМИ*. 1976. Вып. 62. С. 174–183.
27. *Юрасов Г.И.* О расчете водообмена через проливы Японского моря // *Метеорол. и гидрол.* 1987. № 8. С. 116–118.
28. *Ponomarev V.I., Varlaty E.P., Cheranyev M.Y.* An experimental study of currents in the near-Kuril region of the Pacific Ocean and in the Okhotsk Sea // *PICES Scientific Reports*. 1996. V. 6. P. 131–137.
29. *Жабин И.А., Гладышев С.В.* Изменчивость термохалинной структуры вод в проливе Крузенштерна // *Метеорология и гидрология*. 1998. № 1. С. 63–70.
30. *Ванин Н.С., Юрасов Г.И.* Водообмен между Охотским морем и Тихим океаном в проливах Буссоль и Крузенштерна // *Метеорология и гидрология*. 1998. № 7. С. 79–86.
31. *Супранович Т.И., Юрасов Г.И., Кантаков Г.А.* Непериодические течения и водообмен в проливе Лаперуза // *Метеорология и гидрология*. 2001. № 3. С. 80–84.
32. *Shevchenko G.V., Kantakov G.A., Chastikov V.N.* Current mooring observations in the area of the South Kuril Islands // *PICES Scientific Reports*. 2009. V. 36. P. 128–133.
33. *Зырянов В.Н.* К вопросу о водообмене через северные Курильские проливы // *Океанология*. 1974. Т. 4. № 1. С. 16–21.
34. *Vasiliev A.S., Khrapchenkov F.F.* Seasonal variability of integral water circulation in the Okhotsk Sea // *PICES Scientific Reports*. 1996. V. 6. P. 158–166.
35. *Козлов В.Ф.* Расчет уровенной поверхности в Охотском море // *Труды ДВНИГМИ*. 1972. Вып. 37. С. 37–43.
36. *Talley L.D., Nagata Y.* The Okhotsk Sea and Oyashio Region // *PICES Scientific Reports*. 1995. V. 2. P. 227.
37. *Katsumata K., Yasuda I., Kawasaki Y.* Direct current measurements at Kruzshsterna Strait in summer // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. № 2. P. 319–322.
38. *Yasuda I., Kouketsu S., Katsumata K., Ohiwa M., Kawasaki Y., Kusaka A.* Influence of Okhotsk Sea intermediate water on the Oyashio and North Pacific intermediate water // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2002. V. 107(C12). P. 3237.
39. *Богданов К.Т., Мороз В.В.* Гидрологические условия зоны Курильских проливов в летний сезон // *Океанология*. 1998. Т. 38. № 6. С. 813–821.
40. *Rogachev K.A., Verkhunov A.V.* Circulation and water mass structure in the southern Okhotsk Sea, as observed in summer, 1994 // *PICES Scientific Reports*. 1996. V. 6. P. 144–149.
41. *Katsumata K., Ohshima K.I., Kono T., Itoh M., Yasuda I., Wakatsuchi M.* Intensive direct current measurements at the Bussol Strait // *Proc. of 2th Meeting on the Physical Oceanography of Sea Straits*. Villefranche, France. 2002. P. 139–142.
42. *Katsumata K., Ohshima K.I., Kono T., Itoh M., Yasuda I., Volkov Y.N., Wakatsuchi M.* Water exchange and tidal currents through the Bussol' Strait revealed by direct current measurements // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2004. V. 109(C9). P. C09S06.
43. *Kurashina S., Nishida K., Nakabayashi S.* On the open water in the south-eastern part of the frozen Okhotsk Sea and the currents through the Kurile Islands // *J. Oceanogr. Soc. Jpn.* 1967. V. 23. № 2. P. 57–62.
44. *Talley L.D.* An Okhotsk Sea water anomaly: implications for ventilation in the North Pacific // *Deep-Sea Res., Part A*. 1991. V. 38. P. 171–190.
45. *Yasuda I., Okuda K., Shimizu Y.* Distribution and modification of North Pacific intermediate water in the Kuroshio–Oyashio interfrontal zone // *J. Physical Oceanography*. 1996. V. 26. № 4. P. 448–465.
46. *Yasuda I.* Hydrographic structure and variability in the Kuroshio–Oyashio transition area // *J. Oceanography*. 2003. V. 59. № 4. P. 389–402.
47. *Talley L.D.* North Pacific Intermediate Water formation and the role of the Okhotsk Sea // *PICES Scientific Reports*. 1996. V. 6. P. 150–157.
48. *Kida S., Qiu B.* An exchange flow between the Okhotsk Sea and the North Pacific driven by the East Kamchatka Current // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2013. V. 118. P. 6747–6758.
49. *Пранц С.В., Пономарев В.И., Будянский М.В., Файман П.А.* Лагранжев анализ перемешивания и переноса вод в морских заливах // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49. № 1. С. 91–106.
50. *Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Y.* Lagrangian study of surface transport in the Kuroshio Extension area based on simulation of propagation of Fukushima-derived radionuclides // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2014. V. 21. № 1. P. 279–289.
51. *Prants S.V., Uleysky M.Y., Budyansky M.V.* Lagrangian Oceanography: Large-scale Transport and Mixing in the Ocean. *Physics of Earth and Space Environments*. Springer, 2017. 273 p.
52. *Prants S.V.* Chaotic Lagrangian transport and mixing in the ocean // *The European Physical J. Special Topics*. 2014. V. 223. № 13. P. 2723–2743.
53. *Prants S.V., Andreev A.G., Budyansky M.V., Uleysky M.Y.* Impact of the Alaskan Stream flow on surface water dynamics, temperature, ice extent, plankton biomass, and walleye pollock stocks in the eastern Okhotsk Sea // *J. Marine Systems*. 2015. V. 151. P. 47–56.

Simulated Pathways of the Northwestern Pacific Water in the Okhotsk Sea

P. A. Fayman¹, S. V. Prants^{1, *}, M. V. Budyansky¹, and M. Yu. Uleysky¹

¹*Pacific Oceanological Institute RAS, Baltiiskaya str., 43, Vladivostok, 690041 Russia*

**e-mail: prants@poi.dvo.ru*

Water exchange between the Pacific Ocean and the Okhotsk Sea through the Kuril Straits and transport of Pacific waters into and from the Okhotsk Sea are studied. These studies are based on retrospective simulation for the period from 1991 to 2000 by eddy-permitting OGCM RIAMOM and Lagrangian analysis. The volume transport occurs mainly through the seven straits, Bussol, Kruzenshtern, Friz, Ekaterina, Fourth, Nadezhda and Urup straits (in decreasing order of significance). These straits were shown to be responsible for about 95% of total water exchange. We found that the contribution of the Bussol and Kruzenshtern straits in the ocean–sea exchange was considerably overestimated previously. In the active upper 200 m layer, the contribution of the Fourth, Friz and Ekaterina straits is comparable with that of the Kruzenshtern and Bussol straits. Estimations of the depth-integrated transport and transport in the representative model layers in different seasons show that the Northwestern Pacific Water enters the Okhotsk Sea mainly through the northern Kuril Straits, namely, the Kruzenshtern and Fourth straits. The Okhotsk Sea Mode Water flows from the Sea in the upper 200 m layer mainly through the Friz, Ekaterina, Bussol and Urup straits (in decreasing order of significance). Lagrangian simulation reveals the main transport pathways of ocean water into and from the Okhotsk Sea. In the surface and near surface layers, this water is transported to the northwestern shelf of the Sea by the West Kamchatka Current (especially in winter and spring) and by the over slope branch of the North Okhotsk Current. Then it is transferred by the coastal branch of the North Okhotsk Current and flows into the East Sakhalin Current. At depth below 200 m, the ocean water does not reach the northern shelf anyway. At depths of 500 m and deeper, the water exchange between the ocean and the Okhotsk Sea is insignificant because of weak currents at such depths. The simulation results are found to be in a reasonable agreement with instrumental measurements and satellite data.

Keywords: Okhotsk Sea, Numerical circulation model RIAMOM, volume transport through the Kuril Straits, Lagrangian maps