

ВЕСЕННИЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ В КАМЧАТСКОМ ПРОЛИВЕ ЗА 1950–2017 ГГ.

Г.А. Власова¹, С.С. Марченко², Н.И. Рудых³

^{1–3} Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, лаборатория информатики и мониторинга океана

¹ Вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: gavlasova@mail.ru

² Вед. инженер; e-mail: svetikvirginy@mail.ru

³ Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: rudykh@poi.dvo.ru

Камчатский пролив является самым западным и глубоководным проливом Алеутского архипелага. Суровый климат, влияние постоянных и сезонных центров действия атмосферы, прохождение циклонов, сейсмическая активность, цунами-опасность, сложный рельеф дна существенно затрудняют исследование циркуляции вод Камчатского пролива. Все это определило цель исследований: изучение изменчивости циркуляции вод пролива в весенний гидрологический сезон (май – июнь) за 1950–2017 гг. на основе численного моделирования с использованием программного обеспечения Ocean Data View (ПО ODV) для статистической обработки и графического отображения данных. Результаты моделирования показали, что при смене зимнего атмосферного муссона на летний в весенний период происходит трансформация системы течений. На фоне господствующего в течение года циклонического движения вод в регионе Алеутской островодужной системы, в Камчатском проливе весной циклоническая деятельность ослабевает, формируются антициклонические круговороты, способствующие существенно притоку теплых тихоокеанских вод в Берингово море. Кроме того, Камчатское течение в указанный сезон не представляет собой единого неразрывного потока водных масс. Вместо этого отмечаются несколько гидродинамических круговоротов разного знака, что говорит о его вихревой перестроенной структуре. Показано, что весенний гидрологический сезон является неким порогом смены режимов вод от зимнего к летнему в связи с тем, что в весеннем синоптическом сезоне (март – апрель) господствует еще зимний муссон, и среднемесячная температура воздуха имеет значения ниже нуля. Различия в мае и июне показывают последовательность в сезонной трансформации схем циркуляций в этом регионе и некоторую неустойчивость гидродинамических структур, связанную с неравномерностью весенних атмосферных процессов.

Ключевые слова: Алеутская островодужная система, Камчатское течение, зимний и летний муссоны, циркуляция вод

ВВЕДЕНИЕ

Камчатский пролив расположен в крайней западной части Алеутской островной дуги, отделяет о. Беринг, входящий в группу Командорских островов, от Камчатки и соединяет Берингово море с Тихим океаном (рис. 1). Площадь сечения пролива – 335,34 км², ширина – 191 км при глубине до 4420 м, что позволяет Берингову морю осуществлять глубинный водообмен с Тихим океаном.

Географическое положение региона определяет основные черты его климата. На протяжении года данная акватория находится под влиянием постоянных центров действия атмосферы (Полярный и Гавайский максимумы) и сезонных крупномасштабных барических образований (Алеутский минимум, Сибирский максимум, Азиатская депрессия). Циклонические вихри, развивающиеся между этими центрами действия атмосферы, во многом определяют здесь климат и погоду. За год на Берингово море выходит 50–60 циклонов, большое количество

которых проходит через Командорские о-ва. В регионе высота волн цунами может достигать 10–40 м. Кроме этого, Командорские о-ва находятся в зоне активных приливов и отливов: максимальный показатель прилива составляет 2,3 м [Государственный..., 2020].

Известно, что общая циркуляция вод Берингова моря определяется циклоническим круговоротом, который является продолжением крупномасштабного стационарного субарктического круговорота в умеренной зоне Тихого океана между 40–60° с. ш. [Арсеньев, 1967]. Западным звеном указанной циклонической циркуляции является Камчатское (Восточно-Камчатское) течение, характеризующееся сильной пространственно-временной межгодовой и сезонной изменчивостью, в связи с чем происходит и крупномасштабная изменчивость водообмена с Тихим океаном через Камчатский пролив [Хен, Заочный, 2009]. В связи с сезонной изменчивостью Камчатского течения существуют

термины режима вод «летний» и «зимний». Ниже мы будем использовать эти термины. В переходные периоды – весной и осенью – происходят перестроенные гидродинамические процессы.

В настоящее время по результатам исследований, полученных на основе морских экспедиционных работ, изучены лишь некоторые аспекты преимущественно летних пространственно-вре-

менных гидрологических характеристик и водообмена в указанных проливах [Overland et al., 1994; Solomon, Ahlnas, 1978; Рогачев, Шлык, 2010]. Публикаций, посвященных исследованию океанологического режима вод непосредственно в Камчатском проливе крайне мало [Хен, Заочный, 2009; Жабин и др., 2010; Solomon, Ahlnas, 1978; Panteleev et al., 2006].



Рис. 1. Карта Алеутского архипелага; прямоугольником и врезкой показана область исследований

Fig. 1. Map of the Aleutian Archipelago; the rectangle and the inset show the research area

Гидрологическое описание Берингова моря, включая основные проливы Алеутской островной дуги, дано в основополагающих работах Добровольского и Арсеньева [Добровольский, Арсеньев, 1961; Арсеньев, 1967]. По их мнению, основным источником водных масс Берингова моря является Тихий океан. Так, например, в Камчатском проливе водообмен происходит до глубины 4420 м, и глубинные воды имеют здесь тихоокеанское происхождение. Близость берега усиливает летний прогрев вод в Камчатском проливе, а влияние холодного Камчатского течения усиливает зимнее выхолаживание до глубины 600 м. Циклоническая циркуляция здесь усиливается зимой и ослабевает летом, оставаясь господствующей в течение всего года. На основе динамического метода по материалам экспедиционных летних наблюдений (1950–1953, 1955–1956) авторы пришли к выводу о переносе тихоокеанских вод вдоль Камчатского пролива на север и слабый вынос через крайнюю западную часть пролива в результате антициклонической циркуляции вокруг Командорских о-вов. Ими предполагается, что весной температура вод довольно быстро должна понижаться с глубиной, поэтому глубже 50 м везде, вероятнее всего, сохраняются признаки вод зимнего режима.

В работах [Khen, Basyuk, 2005; Хен, Заочный, 2009; Хен, Заволокин, 2015] анализируется термо-

халинная структура вод в Камчатском проливе за летний и осенний периоды 2002–2008 гг. и изменчивость расхода воды, связанная с интенсивностью Камчатского течения по данным многолетних наблюдений за 1950–2008 гг. Авторы приходят к выводу, что пролив играет основную роль в стоке берингоморских вод благодаря Камчатскому течению. Однако, с их точки зрения, интенсивность Камчатского течения то ослабевает, то усиливается, в связи с чем расход воды в проливе колеблется от 0,2 до 6 Св ($1 \text{ Св} = 1 \times 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$), что свидетельствует об уменьшении или увеличении водообмена между Тихим океаном и Беринговым морем.

Рассматривая Камчатское течение, многие авторы делают акцент на его вихревой структуре. Так, в работе [Solomon, Ahlnas, 1978] анализируются 52 спутниковых изображения с января 1976 г. по июнь 1977 г. и делается вывод о том, что практически все возникающие вихри в Камчатском течении являются антициклоническими. В работе [Рогачев, Шлык, 2010] делается вывод, что Аляскинское течение на западе распадается на мезомасштабные алеутские вихри, которые обеспечивают западный перенос теплой воды в область Камчатского течения. В противовес сказанному в работе [Overland et al., 1994] авторы утверждают, что Камчатское течение довольно устойчивое и не имеет сильного меандрирования, т. е. имеющиеся несколько крупных меан-

дров квазистационарны и не распадаются на более мелкие, которые подвержены сильной пространственно-временной изменчивости. Авторы в работе [Хен, Заочный, 2009] показывают, что в зимний период Камчатское течение хорошо выражено, а в летний период заметно слабее. Его скорости летом составляют 5–10 см/с, но вблизи континентального склона в верхнем 200-метровом слое достигают 15–20 см/с. Оценка расхода воды Камчатского течения значительно отличается между перечисленными авторами и находится в диапазоне 5–24 Св.

С развитием численного моделирования добавилось количество публикаций по циркуляции вод Берингова моря, косвенно касаясь и Камчатского пролива [Kinney, Maslowski, 2012; Panteleev et al., 2012]. Во всех этих работах подтверждается картина двухстороннего водообмена в проливе, отмеченного еще А.Д. Добровольским и В.С. Арсеньевым. Отличия состоят в том, что авторы исследуют разный интервал лет или конкретные годы, сезоны (как правило, летний и зимний), поэтому полученные ими оценки расхода воды в проливе значительно отличаются и находятся в диапазоне 0,5–15 Св.

Отсутствуют публикации, посвященные исследованию гидродинамического режима вод непосредственно в Камчатском проливе. Переходные весенний и осенний периоды практически не анализируются. Это и определило цель наших исследований: изучение изменчивости циркуляции вод в Камчатском проливе в весенний сезон за 1950–2017 гг. на основе численного моделирования. Район исследований ограничен координатами 54–57° с. ш.; 162°30'–166°30' в. д. (см. рис. 1).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для реализации сформулированной цели выбрана технология моделирования на базе известной квазигеострофической модели интегральной циркуляции вод, описанная в монографиях и статьях и кратко изложенная ниже [Фельзенбаум, 1970; Васильев, 2001; Полякова и др., 2002; Власова и др., 2008]. Как сказано выше, работы по исследованию гидродинамики вод в Камчатском проливе отсутствуют, поэтому авторам в данном случае представляется целесообразным использовать двумерную модель для того, чтобы в «чистом» виде выявить роль отдельных факторов в общем механизме циркуляции вод.

Указанная модель была адаптирована к программному обеспечению Ocean Data View (ODV – DIVA-gridding) для статистической обработки и графического отображения исходных океанографических данных [Schlitzer, 2002]. Апробация модельных результатов проводилась на сравнении с материалами экспедиционных исследований.

Модель учитывает пространственное распределение плотности воды, рельеф дна, морфологию берегов и водообмен через проливы.

Для моделирования использовались следующие исходные данные:

- значения глубин морского дна из массива топографических данных GEBCO30 [ICO..., 2003];
- значения атмосферного давления на уровне морской поверхности (SLP) из массива NCEP Reanalysis [NCEP/NCAR..., 2018];
- значения температуры и солёности на поверхности моря из массива WOD2013 за период 1950–2017 гг. [World Ocean Database..., 2013].

Для дна были приняты условия прилипания (скорость течения на дне равна нулю).

Моделирование включало расчет интегральной циркуляции вод в виде поля полных потоков ($S^x = -\partial\psi/\partial y$; $S^y = \partial\psi/\partial x$) по заданному на поверхности тангенциальному напряжению ветра (T) и плотности морской воды (ρ). Расчет структуры течений и плотности водных масс по заданным параметрам T и ρ выполнен путем решения уравнения для интегральной функции тока $\psi(x, y)$ методом минимальных невязок. На твердых границах бассейна (береговая линия) задавалась функция ψ , на жидкой границе – ее нормальная производная.

Для расчетов использовалась равномерная сетка 5'×5' (≈ 9 км по широте, ≈ 5 км по долготе), что оказалось допустимым для данного района, где в непосредственной близости от расчетной площади располагаются Алеутский и Курило-Камчатский глубоководные желоба с глубинами 7000 м и более [Белоненко и др., 2016]. С помощью алгоритмов ODV (DIVA-gridding) в узлах 5-минутной сетки рассчитывались среднемесячные значения атмосферного давления, поверхностной температуры и солёности за 1950–2017 гг.

В процессе работы были получены значения составляющих скорости ветра, тангенциального напряжения ветра и его завихренности, глубины и теплосодержания однородного слоя, вертикальной составляющей скорости течения, дрейфовых и градиентных составляющих скорости течения на разных глубинах, составляющих полного потока, модуль вектора придонного слоя и др.

Для анализа полученных результатов привлекались данные из массива WOD2013 (Profiling Float data), по которым были определены пути перемещения буев ARGO в мае – июне в разные годы (2004–2018).

Для расчетов использовался весенний гидрологический сезон (май – июнь) как пример перехода от зимнего субарктического режима вод к летнему умеренному при смене зимнего атмосферного муссона на летний. В рамках указанной модели

рассчитывались интегральные функции тока на поверхности, от поверхности до глубины 200 м и от поверхности до дна. В результате были построены соответствующие карты течений на поверхности, в слое 0–200 м и от поверхности до дна для мая и июня за 1950–2017 гг.

Поскольку для расчетов использовались обобщенные за многолетний период, типичные для данного региона (квазистационарные) параметры атмосферных процессов, то результаты моделирования также должны рассматриваться в качестве квазистационарных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты предыдущих исследований показывают, что в Камчатском проливе существует не только односторонний вынос вод Берингова моря в

Тихий океан, но в разные годы и сезоны с различной интенсивностью происходит и двухсторонний водообмен между этими бассейнами.

Выполненные нами расчеты показали, что в рассматриваемый период (май – июнь) на исследуемой акватории моделируется довольно сложная гидродинамическая ситуация. Так, на фоне общего циклонического движения Камчатское течение не представляет собой единого неразрывного потока водных масс в модельной области. Вместо этого здесь формируются несколько гидродинамических круговоротов разного знака (рис. 2, 3, 4).

В поверхностных водах в мае – июне формируются смешанные структуры, как циклонические, так и антициклонические (см. рис. 2А, Б). Но даже в рамках этого периода картина их размещения и конфигурации меняется.

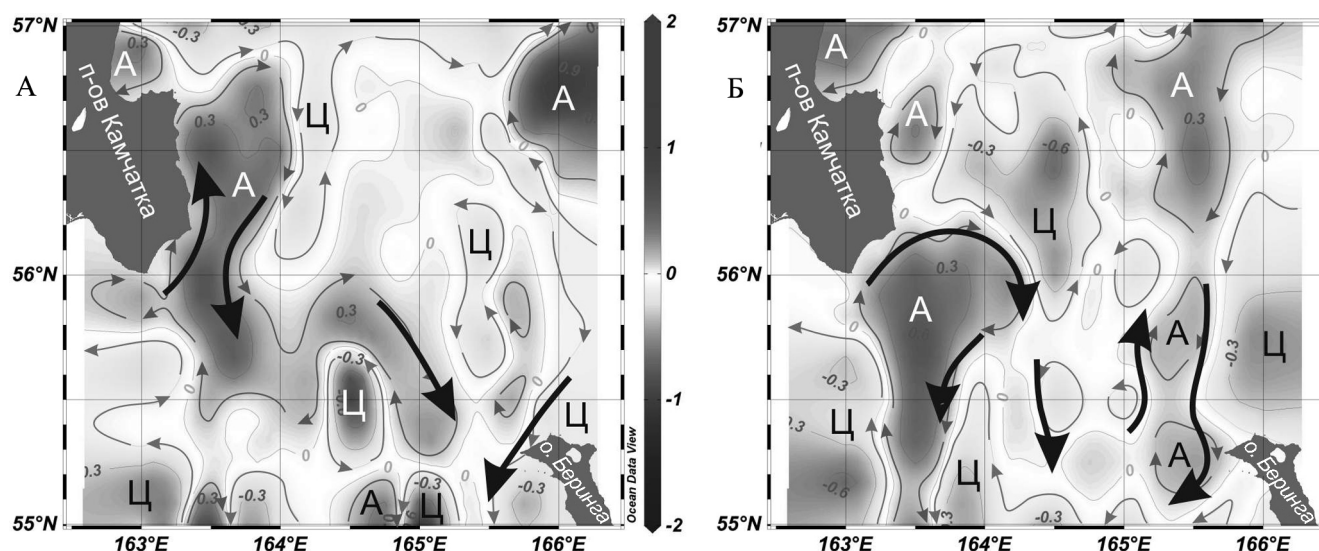


Рис. 2. Схема циркуляции поверхностных вод в Камчатском проливе в мае (А) и июне (Б) по результатам моделирования (функции тока, $1 \times 10^6 \text{ cm}^3/\text{s}$): стрелки – направление движения водных масс; общая шкала – расход воды в поверхностном слое в мае и июне; А – антициклон; Ц – циклон

Fig. 2. The scheme of surface water circulation in the Kamchatka Strait in May (A) and June (B) according to the simulation results (current functions, $1 \times 10^6 \text{ cm}^3/\text{s}$): arrows show the direction of water masses movement; the scale indicates water consumption in the surface layer; A – anticyclone; Ц – cyclone

Так, в мае (см. рис. 2А) в западной части пролива выделяется мощный и обширный антициклонический круговорот, простирающийся в меридиональном направлении вдоль побережья Камчатки ($\approx 55^\circ 30' - 56^\circ 54'$ с. ш., $162^\circ - 165^\circ 20'$ в. д.), размеры которого составляют $\approx 3,7 \times 5,6$ км. В соответствии с этим вдоль п-ова Камчатка поток теплых тихоокеанских вод входит в Берингово море, а в восточной части этой структуры воды Берингова моря перемещаются в Тихий океан. Формирование указанного антициклонического круговорота можно объяснить началом перестройки синоптических процессов,

переходящих в режим, близкий к летнему. Антициклоническая циркуляция вокруг Командорских островов, куда входит и о-в Беринга, была отмечена ранее в работах [Добровольский, Арсеньев, 1961; Штокман, 1954] и было дано объяснение этому явлению. Оно связано с существованием вблизи островных дуг постоянных потоков, распространяющихся в противоположных направлениях (в нашем случае Аляскинское и Алеутское течения) и их конвергенции, а также с влиянием поперечной неравномерности (завихренности) ветра [Штокман, 1954]. Согласно другим исследованиям [Тимонов,

1960], эта циркуляция поддерживается также приливными явлениями за счет неравномерного пространственного распределения скоростей приливного потока, а исследуемый район располагается в зоне активных приливных процессов.

В восточной части пролива, около о. Беринга, моделируются небольшие антициклонические вих-

ри с преимущественным стоком холодных берингоморских вод в Тихий океан. Таким образом, в восточной части пролива превалирует зимний режим вод, так как в этой близкой к о. Беринга мелководной части пролива значимое влияние оказывает зимнее выхолаживание вод [Добровольский, Арсеньев, 1961].

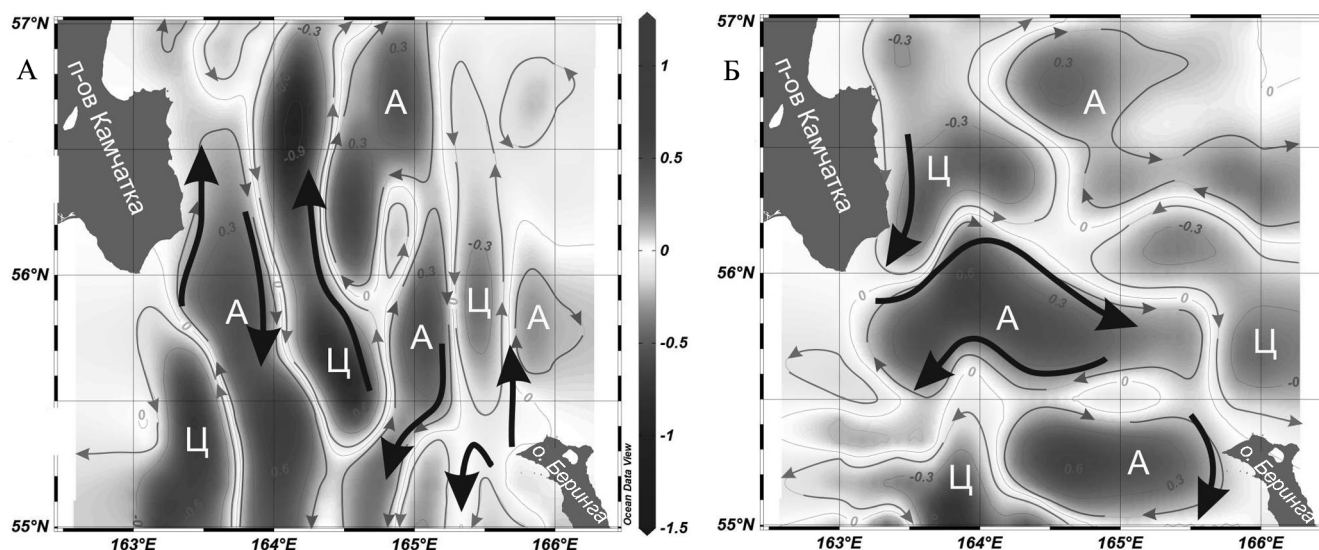


Рис. 3. Схема циркуляции вод в слое 0–200 м в Камчатском проливе в мае (А) и июне (Б) по результатам моделирования (интегральные функции тока, $1 \times 10^{11} \text{ cm}^3/\text{с}$): стрелки – направление движения водных масс; общая шкала – расход воды в слое 0–200 м в мае и июне; А – антициклон; Ц – циклон

Fig. 3. The scheme of water circulation in the 0–200 m layer in the Kamchatka Strait in May (A) and June (Б) according to the simulation results (integral current functions, $1 \times 10^{11} \text{ cm}^3/\text{s}$): arrows show the direction of water masses movement; the scale indicates water consumption in the layer 0–200 m; A – anticyclone; Ц – cyclone

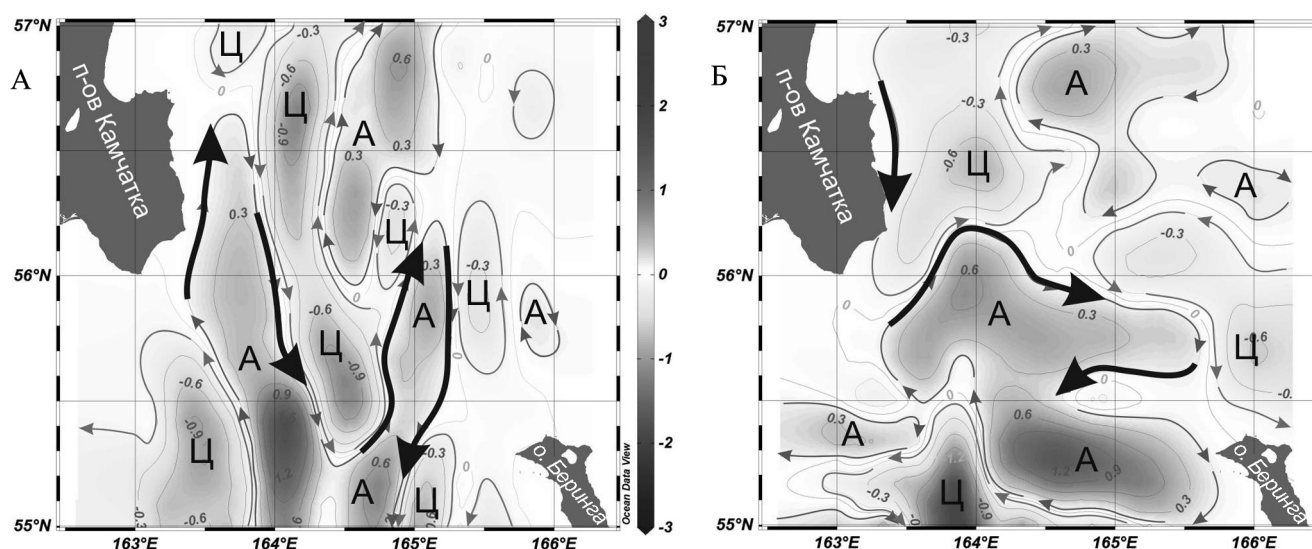


Рис. 4. Схема циркуляции вод от поверхности до дна в Камчатском проливе в мае (А) и июне (Б) по результатам численного моделирования (интегральные функции тока, Sv): стрелки – направление движения водных масс; общая шкала – расход воды от поверхности до дна в мае и июне; А – антициклон; Ц – циклон

Fig. 4. The scheme of water circulation from the surface to the bottom in the Kamchatka Strait in May (A) and June (Б) according to the numerical modeling results (integral current functions, Sv): arrows show the direction of water masses movement; the scale indicates water flow rates from the surface to the bottom; A – anticyclone; Ц – cyclone

В центре пролива в районе $\approx 55^{\circ}15' - 56^{\circ}$ с. ш. и $\approx 164^{\circ}15' - 165^{\circ}45'$ в. д. наблюдаются несколько небольших вихрей разного знака, что обеспечивает как слабый сток берингоморских вод, так и слабый приток со стороны Тихого океана.

В июне (см. рис. 2Б) гидродинамическая картина несколько меняется, что можно связать с усилением солнечной активности и продолжением процессов формирования термохалинных характеристик поверхностного слоя [Хен, Заочный, 2009].

В западной части пролива присутствие майского антициклонического круговорота сохраняется, однако эта структура существенно деформирована: она разбивается на отдельные субмезомасштабные круговороты. При этом схема течений близка к майской, вблизи п-ова Камчатка она соответствует летнему режиму вод (приток тихоокеанских вод), а в пределах восточной ветви антициклона – зимнему режиму (сток берингоморских вод).

В восточной части пролива майский антициклонический круговорот, сформированный на северо-востоке исследуемой акватории ($\approx 56^{\circ}20' - 57^{\circ}$ с. ш.; $165^{\circ}30' - 166^{\circ}20'$ в. д.), расширяется вплоть до о. Беринга и в совокупности с рядом находящимся циклоническим круговоротом обеспечивает сток берингоморских вод (зимний режим).

В центральной части майский антициклонический круговорот сместился на юго-запад, в связи с чем сформировалась серия небольших циклонических вихрей, которые инициировали как сток, так и приток вод.

В слое 0–200 м (см. рис. 3А, Б) описанный выше поверхностный майский антициклонический круговорот, сформированный вблизи п-ова Камчатка (см. рис. 3А), разбивается на два не менее мощных многоцентровых круговорота, вытянутых в меридиональном направлении и занимающих существенно большую площадь исследуемого района, чем на поверхности. Между ними вклинивается циклонический круговорот, также ориентированный по меридиану.

Первый из названных антициклонов, располагающийся в западной части в непосредственной близости от берега Камчатки, повторяет конфигурацию и схему движения водных масс антициклона, смоделированного для поверхности. Вдоль берега Камчатки поток движется из Тихого океана в Берингово море, постепенно переходя к летнему режиму, а на его восточном крыле происходит сброс берингоморских вод в Тихий океан, что соответствует зимнему режиму.

Второй антициклон смещен к центру пролива, в результате здесь должен происходить как сток берингоморских вод, так и поступление вод из Тихого океана.

В восточной части пролива в районе о. Беринга схема циркуляции близка к поверхностной (зимний режим).

В соответствии с результатами моделирования июньская схема циркуляции вод в слое 0–200 м резко отличается от июньской схемы на поверхности и майских схем, как на поверхности, так и в слое 0–200 м (см. рис. 3Б). В этот период все гидродинамические структуры меняют свое направление с меридионального на широтное. Таким образом, в Камчатском проливе с глубиной наблюдается водообмен как в широтной, так и в меридиональной плоскостях. Выполненные расчеты находятся в определенном соответствии с буйковыми наблюдениями (рис. 5), где наряду с меридиональными видны и широтные составляющие в общей схеме течений. Из этого мы делаем вывод, что результаты моделирования в принципе согласуются с экспериментальными данными и отражают реальную возможность указанной смены гидродинамического режима в слое 0–200 м.

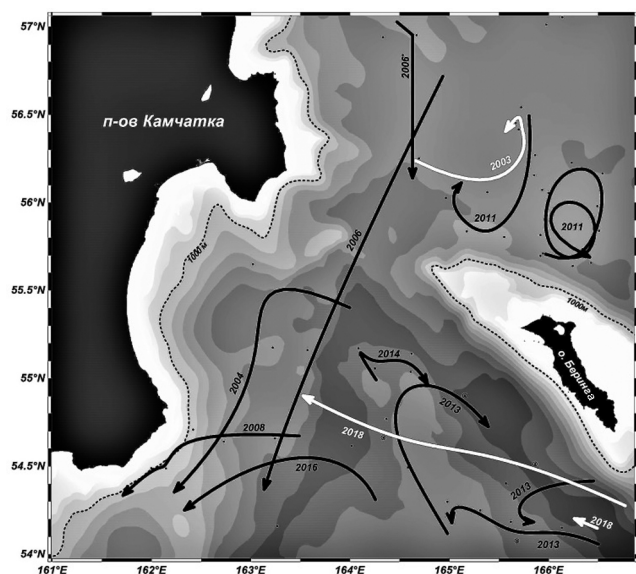


Рис. 5. Пути перемещения буйев ARGO с мая по июнь (Profiling Float data, WOD2013); цифры у стрелок – год перемещения буя в мае – июне

Fig. 5. ARGO buoy paths from May to June (Profiling Float data, WOD2013); the numbers in the arrows indicate the year of the buoy movement in May – June

На наш взгляд, существует несколько факторов, которые могли бы оказать значимое влияние на указанную смену движения водных масс в рассматриваемом районе. Сюда, прежде всего, можно отнести смену направления ветров в связи переходом от зимнего муссона к летнему, усиление солнечной активности и ослабление Камчатского течения, что приводит к активному поступлению теплых тихо-

океанских вод в Берингово море. Нельзя обойти вниманием выход атмосферных циклонов в рассматриваемый район и, как следствие, апвеллинг и конвективное перемешивание вод. В целом, с глубиной происходит общее усиление гидродинамических процессов и формирование разнонаправленных круговоротов в проливе, в мае ориентированных по долготе, а в июне – по широте.

В связи с этим, в разных частях пролива имеются отличия. В западной части пролива вдоль Камчатки формируется циклонический круговорот и происходит сток берингоморских вод (зимний режим).

Практически всю центральную часть пролива $\approx 55^{\circ} - 56^{\circ} 25' \text{ с. ш.}$ и $\approx 163^{\circ} - 165^{\circ} 40' \text{ в. д.}$ от Камчатки вплоть до о. Беринга занимает мощный многоцентровый антициклонический круговорот (размеры которого составляют $\approx 2,6 \times 4,9 \text{ км}$), вытянутый по широте. В связи с этим меняется и характер циркуляции: здесь происходит как сток берингоморских вод в Тихий океан, так и приток тихоокеанских вод в Берингово море.

В восточной части пролива вдоль о-ва Беринга наблюдается вынос вод из Берингова моря (зимний режим).

Схемы циркуляции вод в слое от поверхности до дна (см. рис. 4А, Б) повторяют вышеописанные схемы в 200-метровом слое. Таким образом, цирку-

ляция вод, сформированная на глубине 200 м, практически не меняется до дна.

ВЫВОДЫ

По итогам численного моделирования весенней циркуляции вод в Камчатском проливе за 1950–2017 гг. сделаны следующие выводы:

- показано, что весенний гидрологический сезон (май – июнь) является неким порогом смены режимов вод от зимнего к летнему, в связи с тем, что в весеннем синоптическом сезоне (март – апрель) господствует еще зимний муссон и среднемесячная температура воздуха имеет значения ниже нуля;

- выявлено, что в указанный сезон в проливе не существует выраженного потока вод Камчатского течения, которое в данном случае имеет вихревую перестроенную структуру и представляет собой разнонаправленные круговороты вод;

- отмечено, что в Камчатском проливе наблюдается водообмен как в вертикальной, так и горизонтальной плоскостях;

- различия в мае и июне (смена движения водных масс) показывают последовательность в сезонной трансформации схем циркуляций в этом регионе, и в то же время некоторую неустойчивость гидродинамических структур, связанную с неравномерностью весенних атмосферных процессов.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке государственной бюджетной темы «Исследование основных процессов, определяющих состояние и изменчивость океанологических характеристик окраинных морей Азии и прилегающих районов Тихого и Индийского океанов» Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева Дальневосточного научного центра РАН, № рег. 121021700341-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арсеньев В.С. Течения и водные массы Берингова моря. М.: Наука, 1967. 135 с.
- Белоненко Т.В., Кубряков А.А., Станичный С.В. Спектральные характеристики волн Россиби северо-западной части Тихого океана // Исследование Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 43–52.
- Васильев А.С. Адаптивно-обучающаяся система прогнозирования классов природных процессов. Ч. 1. СПб.: ГМИ, 2001. 136 с.
- Власова Г.А., Васильев А.С., Шевченко Г.В. Пространственно-временная изменчивость структуры и динамики вод Охотского моря. М.: Наука, 2008. 359 с.
- Добровольский А.Д., Арсеньев В.С. Гидрологическая характеристика Берингова моря // Труды ИО АН СССР. 1961. Т. 38. С. 64–96.
- Жабин И.А., Лобанов В.Б., Ватанабе С., Вакута М., Таранова С.Н. Водообмен между Беринговым морем и Тихим океаном через Камчатский пролив // Метеорология и гидрология. 2010. № 3. С. 84–92.
- Полякова А.М., Власова Г.А., Васильев А.С. Влияние атмосферы на подстилающую поверхность и гидродинамические процессы Берингова моря. Владивосток: Дальнаука, 2002. 202 с.
- Рогачев К.А., Шлык Н.В. Увеличение радиуса алеутских вихрей и их долговременная эволюция // Метеорология и гидрология. 2010. № 3. С. 68–73.
- Тимонов В.В. Результирующие и вторичные течения в морях с приливами // Труды Океанографической комиссии АН СССР. 1960. Т. 10. Вып. 1. С. 43–50.
- Фельзенбаум А.И. Динамика морских течений. Итоги науки. Гидромеханика. М.: ВИНТИ, 1970. С. 97–338.
- Хен Г.В., Заволокин А.В. Перемена в циркуляции вод и ее значение в распределении и обилии лососей в западной части Берингова моря в начале XXI столетия // Известия ТИНРО. 2015. Т. 181. С. 95–114.
- Хен Г.В., Заочный А.Н. Изменчивость расхода Камчатского течения и океанологических параметров в Камчатском проливе // Известия ТИНРО. 2009. Т. 158. С. 247–260.
- Штокман В.Б. О причине круговых течений около островов и противоположных течений у берегов проливов // Известия АН СССР. Сер. географическая. 1954. № 4. С. 29–37.

- Kinney C.J., Maslowski W. On the oceanic communication between the Western Subarctic Gyre and the deep Bering Sea, *Deep-Sea Research*, 2012, vol. 66, p. 11–25.
- Khen G.V., Basyuk E.O. Oceanographic Conditions of the Bering Sea in BASIS, *NPAFC Technological Report*, 2005, no. 6, p. 21–23.
- Overland J.E., Spillane M.C., Hurlburt H.E., Wallcraft A.J. A numerical study of the circulation of the Bering Sea basin and exchange with the North Pacific Ocean, *Physical oceanography*, 1994, vol. 24, p. 736–758.
- Panteleev G.G., Stabeno P., Luchin V.A., Nechaev D.A., Ikeda V. Summer transport estimates of the Kamchatka Current derived as a variational inverse of hydrophysical and surface drifter data, *Geophysical Research Letters*, 2006, vol. 33, 5 p., DOI: 10.1029/2005GL024974.
- Panteleev G., Yaremchuk M., Luchin V., Nechaev D., Kukuichi T. Variability of the Bering Sea in the period 1992–2010, *J. Oceanogr.*, 2012, vol. 68, p. 485–496, DOI: 10.1007/s10872-012-0113-0.
- Schlitzer R. Interactive analysis and visualization of geoscience data with Ocean Data View, *Computers & Geosciences*, 2002, vol. 28, p. 1211–1218.
- Solomon H., Ahlnas K. Eddies in the Kamchatka Current, *Deep Sea Resource*, 1978, vol. 25, p. 403–410.
- Электронные ресурсы
Государственный природный биосферный заповедник «Командорский». Территория. URL: <http://komandorsky.ru/territory.html> (дата обращения 22.05.2020).
- ИОС, ИХО, and BODC, 2003. “Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas”, published on CD-ROM on behalf of the Intergovernmental Oceanographic Commission and the International Hydrographic Organization as part of the General Bathymetric Chart of the Oceans; British Oceanographic Data Centre, Liverpool, URL: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/ (дата обращения 22.02.2018).
- NCEP/NCAR Reanalysis Monthly Means and Other Derived Variables, URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.derived.html> (дата обращения 22.02.2018).
- World Ocean Database 2013, URL: https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/pr_wod.html (дата обращения 22.02.2018).

Поступила в редакцию 04.04.2021

После доработки 04.11.2021

Принята к публикации 27.12.2021

SPRING HYDRODYNAMIC REGIME IN THE KAMCHATKA STRAIT FOR THE PERIOD OF 1950–2017

G.A. Vlasova¹, S.S. Marchenko², N.I. Rudykh³

^{1–3} V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Informatics and Ocean Monitoring Laboratory

¹ Leading Scientific Researcher; Ph.D. in Geography; e-mail: gavlasova@mail.ru

² Leading Engineer; e-mail: svetikvirginy@mail.ru

³ Senior Scientific Researcher; Ph.D. in Geography; e-mail: rudykh@poi.dvo.ru

The Kamchatka Strait is the westernmost and deepest strait of the Aleutian archipelago. The harsh climate, the influence of permanent and seasonal atmospheric action centers, the passage of cyclones, seismic activity, tsunami hazard, and the complex bottom topography significantly complicates the investigation of water circulation in the Kamchatka Strait. Thus the goal of our research was to study the variability of water circulation in the strait during spring hydrological season (May, June) for the period of 1950–2017 based on numerical modeling. The Ocean Data View software (ODV software) was used for statistical processing and graphical display of the data. The modeling results showed that the spring change of the winter atmospheric monsoon to the summer monsoon causes the transformation of current system. Against the background of cyclonic water movement prevailing during the whole year in the region of the Aleutian Island arc, the cyclonic activity in the Kamchatka Strait weakens in the spring, and anticyclonic gyres are formed, contributing to significant inflow of warm Pacific waters into the Bering Sea. Besides, during the above-mentioned season the Kamchatka current is not a single continuous flow of water masses. Instead, several hydrodynamic gyres of different signs are noted, indicating its vortex transitional structure. It is shown that the spring hydrological season is a kind of a threshold for the change from winter to summer water regimes, because in the spring synoptic season (March, April) the winter monsoon still prevails, and the average monthly air temperature is below zero. The differences in May and June show a gradual seasonal transformation of circulation schemes in the region, and, at the same time, a certain instability of hydrodynamic structures associated with uneven spring atmospheric processes.

Keywords: Aleutian Island arc, Kamchatka Current, winter and summer monsoons, water circulation

Acknowledgements. The study was financially supported by the state budget theme of the V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, “Investigation of principal processes influencing the state and variability of oceanographic parameters of the peripheral seas of Asia and adjacent areas of Pacific and Indian oceans” (Reg no. 121021700341-2).

REFERENCES

- Arsen'yev V.S. *Techenija i vodnye massy Beringova morja* [Flows and water masses of the Bering Sea], Moscow, Nauka Publ., 1967, 135 p. (In Russian)
- Belonenko T.V., Kubryakov A.A., Stanichny S.V. Spektral'nye harakteristiki voln Rossbi severo-zapadnoj chasti Tihogo okeana [Spectral characteristics of Rossby waves of the North-Western Pacific Ocean], *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, no. 1–2, p. 43–52. (In Russian)
- Dobrovolsky A.D., Arsen'yev V.S. Gidrologicheskaja harakteristika Beringova morja [The Hydrological Characteristic of the Bering Sea], *Trudy IO of the USSR Academy of Sciences*, 1961, vol. 38, p. 64–96. (In Russian)
- Felsenbaum A.I. [Dynamics of sea currents], *Itogi nauki. Gidromekhanika* [Results of Science. Hydromechanics], Moscow, VINITI Publ., 1970, p. 97–338. (In Russian)
- Khen G.V., Basyuk E.O. Oceanographic Conditions of the Bering Sea in BASIS, *NPAFC Technological Report*, 2005, no. 6, p. 21–23.
- Khen G.V., Zaochniy A.N. Izmenchivost' rashoda Kamchatskogo techenija i okeanologicheskikh parametrov v Kamchatskom prolive [The variability of the flow of the Kamchatka current and oceanological parameters in the Kamchatka Strait], *Izvestia of TINRO*, 2009, vol. 158, p. 247–260. (In Russian)
- Khen G.V., Zavolokin A.V. Peremena v cirkuljacii vod i ee znachenie v raspredelenii i obilii lososej v zapadnoj chasti Beringova morja v nachale 21-go stoletija [Change in water circulation and its importance in the distribution and abundance of salmon in the western part of the Bering Sea at the beginning of the 21st century], *Izvestia of TINRO*, 2015, vol. 181, p. 95–114. (In Russian)
- Kinney J.C., Maslowski W. On the oceanic communication between the Western Subarctic Gyre and the deep Bering Sea, *Deep-Sea Research*, 2012, vol. 66, p. 11–25.
- Overland J.E., Spillane M.C., Hurlburt H.E., Wallcraft A.J. A numerical study of the circulation of the Bering Sea basin and exchange with the North Pacific Ocean, *Physical oceanography*, 1994, vol. 24, p. 736–758.
- Panteleev G., Yaremchuk M., Luchin V., Nechaev D., Kukuichi T. Variability of the Bering Sea in the period 1992–2010, *J. Oceanogr.*, 2012, vol. 68, p. 485–496, DOI: 10.1007/s10872-012-0113-0.
- Panteleev G.G., Stabenov P., Luchin V.A., Nechaev D.A., Ikeda V. Summer transport estimates of the Kamchatka Current derived as a variational inverse of hydrophysical and surface drifter data, *Geophysical Research Letters*, 2006, vol. 33, 5 p., DOI: 10.1029/2005GL024974.
- Polyakova A.M., Vlasova G.A., Vasilyev A.S. *Vlijanie atmosfery na podstilajushhuju poverhnost' i gidrodinamicheskie protsessy Beringova morja* [The influence of the atmosphere on the underlying surface and hydrodynamic processes of the Bering Sea], Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2002, 202 p. (In Russian)
- Rogachev K.A., Shlyk N.V. Uvelicheniye radiusa aleutskikh vikhrey i ikh dolgovremennaya evolyutsiya [The increased radius of the Aleutian eddies and their long-term evolution], *Russian Meteorology and Hydrology*, 2010, vol. 35, no. 3, p. 206–210, DOI: 10.3103/S1068373910030076.
- Schlitzer R. Interactive analysis and visualization of geoscience data with Ocean Data View, *Computers & Geosciences*, 2002, vol. 28, p. 1211–1218.
- Shtokman V.B. O prichine krugovykh techenij okolo ostrovov i protivopolozhnykh techenij u beregov prolivov [About the cause of circular currents near the islands and opposite currents near the coast of straits], *Izvestija AN SSSR, Ser. geogr.*, 1954, no. 4, p. 29–37. (In Russian)
- Solomon H., Ahlnas K. Eddies in the Kamchatka Current, *Deep Sea Resource*, 1978, vol. 25, p. 403–410.
- Timonov V.V. Rezul'tirujushhie i vtorichnye techenija v morjah s prilivami [Resulting and secondary currents in the tidal seas], *Proceedings of the Oceanographic Commission of the USSR Academy of Sciences*, 1960, vol. 10(1), p. 43–50. (In Russian)
- Vasiliev A.S. *Adaptivno-obuchajushhajasja sistema prognozirovanija klassov prirodnykh processov, ch.1* [Adaptive learning system of forecasting the classes of natural processes, part 1], St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 2001, 136 p. (In Russian)
- Vlasova G.A., Vasilyev A.S., Shevchenko G.V. *Prostranstvenno-vremennaja izmenchivost' struktury i dinamiki vod Ohotskogo morja* [Spatio-temporal variability of the structure and dynamics of water of the Sea of Okhotsk], Moscow, Nauka Publ., 2008, 359 p. (In Russian)
- Zhabin I.A., Lobanov V.B., Watanabe S., Vakita M., Taranova S.N. Vodoobmen mezhdu Beringovym morem i Tikhim okeanom cherez Kamchatskiy proliv [Water exchange between the Bering Sea and the Pacific Ocean through the Kamchatka Strait], *Russian Meteorology and Hydrology*, 2010, vol. 35, no. 3, p. 218–224, DOI: 10.3103/S106837391003009X.

Web sources

- IOC, IHO, and BODC, 2003. “Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas”, published on CD-ROM on behalf of the Intergovernmental Oceanographic Commission and the International Hydrographic Organization as a part of the General Bathymetric Chart of the Oceans; British Oceanographic Data Centre, Liverpool, URL: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/ (access date 22.02.2018).
- NCEP/NCAR Reanalysis Monthly Means and Other Derived Variables, URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.derived.html> (access date 22.02.2018).
- State Nature Biosphere Reserve “Komandorsky”. Territory, URL: <http://komandorsky.ru/territory.html> (access date 05.22.2020).
- World Ocean Database 2013, URL: https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/pr_wod.html (access date 22.02.2018).

Received 04.04.2021

Revised 04.11.2021

Accepted 27.12.2021