

УДК 551.465.43 (265.54)

В.Д. БУДАЕВА, В.Г. МАКАРОВ, Л.И. МЕЗЕНЦЕВА, Ю.В. ЛЮБИЦКИЙ

О весеннем режиме вод в заливе Петра Великого (Японское море) и его изменчивости в текущем десятилетии (2010–2016 гг.)

Приведены результаты исследований межгодовой изменчивости температуры, солёности, вертикальной структуры и динамики прибрежных вод зал. Петра Великого в весенний период. Выявлена высокая преемственность весенней динамики вод в 2010, 2013–2016 гг. и ее принципиальное отличие от известных летних схем течений. Показано, что в текущем десятилетии масштабному опреснению поверхностные воды залива подвергались в 2010, 2013 и 2016 гг. Аномально низкие значения солёности весной 2016 г. объясняются не только совместным воздействием берегового стока и поступлением в пределы залива вод Приморского течения, но и адвекцией малосолёных вод из Восточно-Китайского моря, которые проникали через западный канал Корейского пролива, а затем в системе «вихревых дорожек» спорадически могли достигать российского побережья.

Ключевые слова: структура и динамика вод, атмосферные условия, опреснение, зал. Петра Великого.

Hydrological regime of Peter the Great Bay (the Sea of Japan) in spring in 2010–2016 and its variability.

V.D. BUDAeva (Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok), V.G. MAKAROV (National Polytechnic Institute, La Paz, Mexican), L.I. MEZENTSEVA (Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok), Yu.V. LYUBITSKY (The Department of Hydrometeorological Research and Forecast of the Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Khabarovsk).

The study focuses on interannual variability of seawater temperature, salinity, vertical structure and dynamics in Peter the Great Bay in spring. We have noticed a significant continuity in the spring water dynamics in 2010 and in 2013–2016 and marked a fundamental distinction from the known sea current patterns for the summer season. During the past several years, Peter the Great Bay surface waters were influenced by substantial freshening in 2010, 2013–2016. An extremely low water salinity observed in spring 2016 resulted from a coupled effect of continental runoff and inflow of the Primorsky Current into the Bay, as well as from advection of low-salinity waters from the East China Sea. The latter came through the western channel of the Korean Strait and could occasionally reach the Russia coast like “vortex paths”.

Key words: seawater structure and dynamics, atmospheric conditions, seawater freshening, Peter the Great Bay.

Термодинамическое состояние, вертикальную структуру и степень опреснения/осолонения прибрежных вод зал. Петра Великого в значительной степени определяют атмосферные процессы (потоки тепла от атмосферы к водной поверхности, ветровое воздействие, жидкие атмосферные осадки, материковый сток и др.), уклоны уровня моря, горизонтальная адвекция вод (водообмен залива с внешним морем) и интенсивность

*БУДАЕВА Валентина Дмитриевна – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник (Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Владивосток), МАКАРОВ Вячеслав Георгиевич – кандидат физико-математических наук, профессор-исследователь (Национальный политехнический институт, Ла-Пас, Мексика), МЕЗЕНЦЕВА Людмила Ивановна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник (Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Владивосток), ЛЮБИЦКИЙ Юрий Вадимович – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник (Отдел гидрометеорологических исследований и прогнозов Дальневосточного регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института, Хабаровск). *E-mail: VBudaeva@ferhri.ru

потоков соли и тепла по вертикали [5–7, 9, 10, 15, 17]. Более подробно и комплексно с использованием современных данных судовых съемок и длительных инструментальных измерений течений изучена летняя динамика водных масс Амурского и Уссурийского заливов [10, 17], на основе спутниковых изображений с высоким пространственным разрешением – вихревая структура циркуляции вод в зал. Петра Великого и его водообмен с внешним морем, а также влияние ветра и речного стока на поверхностные течения [7]. Однако для весеннего периода структура и динамика прибрежных вод зал. Петра Великого мало исследованы.

В настоящей работе приводятся результаты анализа межгодовой изменчивости весеннего режима вод в зал. Петра Великого в 2010–2016 гг., поскольку для этого периода был собран большой массив СТД-измерений высокого профильного разрешения, полученных в рамках программы «Обеспечение комплексного мониторинга дальневосточных морей России». Кроме того, текущее десятилетие (2010–2016 гг.) в Приморье характеризовалось высокой изменчивостью весенних атмосферных процессов, которые в значительной мере повлияли на формирование вертикальной структуры и динамики прибрежных вод. В весенние сезоны 2014–2016 гг. наблюдались аномально высокие температуры воздуха, соответственно прогрев и нарастание тепла в поверхностных водах зал. Петра Великого происходили более активно. Масштабному воздействию материкового стока воды залива подвергались в 2010, 2013 и 2016 гг. Вследствие этого происходило общее опреснение прибрежных вод, характеристики которых изменялись год от года и нуждаются в изучении. Влияние этих внешних воздействий (температура воздуха, материковый сток) на состояние прибрежных вод зал. Петра Великого в текущем десятилетии (2010–2016 гг.) и составляет предмет настоящего исследования.

Данные и методы

Исследования основаны на данных весенних профильных СТД-измерений температуры, солености и рассчитанной по ним плотности. Измерения проводились на регулярной сетке станций, охватывающей акваторию зал. Петра Великого и прилегающую глубоководную часть Японского моря (рис. 1). В общей сложности выполнено пять весенних океанографических съемок залива по программе мониторинга дальневосточных

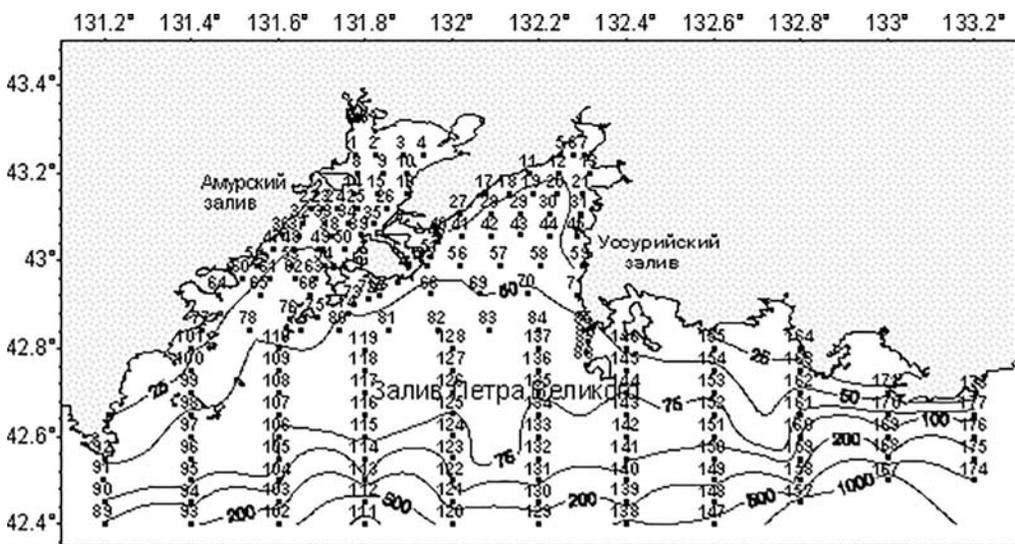


Рис. 1. Схема мониторинговой съемки зал. Петра Великого. Изолиниями с цифрами обозначены глубины, точками с цифрами – гидрологические станции

морей России (апрель 2010 г. – 171 STD-измерений, май 2013 г. – 173, май 2014 г. – 174, май 2015 г. – 173, май 2016 г. – 173). В результате получено более 700 профилей вышеуказанных гидрофизических характеристик.

Первичные профильные STD-записи измерений температуры, солености были отредактированы и усреднены с вертикальным шагом 1 м с целью их последующего использования в многослойной кусочно-криволинейной параметрической модели вертикальной структуры плотности [5, 20]. Алгоритм реконструкции геометрии вертикального STD-профиля плотности основан на применении итерационного метода наименьших квадратов. Процедура состоит из двух основных блоков. Предварительно профиль с заданной точностью аппроксимируется ломаной линией, специальный анализ которой позволяет автоматически выделить слои с локальными максимумами градиента плотности и определить их количество (N). Поведение профиля между верхними границами этих слоев затем описывается с помощью гиперболической зависимости, эквивалентной для частоты Вьяйсяля–Брента (В–Б) известному закону «расстояния от поверхности» (в физической океанологии оценки частоты В–Б используются для определения условий устойчивой или неустойчивой стратификации вод). В результате получается 3N-параметрическая кусочно-аналитическая модель вертикальной структуры плотности. Определяемые на основе натурных данных параметры модели описывают границы слоев, величину градиентов и асимптотическое значение плотности на больших глубинах для каждого из STD-профилей. Для выделения однородных по плотности слоев был использован критерий GRAD: $\sigma_t \leq 0,01$ усл. ед./м.

Реконструкция трехмерного поля плотности в узлах регулярной сетки $1,5' \times 1,5'$ осуществлена на основе интерполяции двумерных полей основных параметров плотностной модели с последующим расчетом конкретных значений плотности и их усвоения в численной модели течений [5]. Показано [13, 20], что для прибрежных районов с высокой горизонтальной неоднородностью распределения плотности такой способ интерполяции предпочтительнее обычно используемой погоризонтной интерполяции.

Для характеристики метеорологических условий и берегового стока, влияющих на изменчивость ключевых параметров поверхностного слоя вод зал. Петра Великого, использованы данные Приморского УГМС о приземной температуре воздуха на 14 реперных ГМС Приморья (1936–2016 гг.) и сведения о расходах впадающих в него 6 основных приморских рек (Артемовка, Шкотовка, Суходол, Амба, Цукановка, Раздольная) для весенних месяцев 2010–2016 гг.

Термический тип весенних метеорологических условий определялся по результатам оценок отклонений текущих средних весенних температур от ее среднемноголетнего значения ($3,6 \pm 1,07$ °C). Весна считалась умеренно теплой или холодной, если отклонения (аномалия) не превышали $\pm 1\sigma$ ($\sigma = 1,07$ °C), теплой или холодной при отклонениях от $\pm 1\sigma$ до $\pm 2\sigma$ и аномально теплой или холодной при отклонениях $> 2\sigma$. Ранее такой подход был реализован при оценках изменчивости климата Приморского края [12] и суровости зимних условий в северо-западной части Японского моря [4].

Результаты анализа и обсуждение

Оценки межгодовых изменений весенних метеорологических условий

Зимние климатические особенности региона оказывают заметное влияние на формирование термических и динамических условий морской среды в последующие сезоны, поскольку они обеспечивают фон для развития весенних процессов на приморском шельфе. Весной термические характеристики поверхностных вод зал. Петра Великого в значительной степени определяются солнечным прогревом, под воздействием которого происходит формирование сезонного термоклина и плотностной стратификации вод.

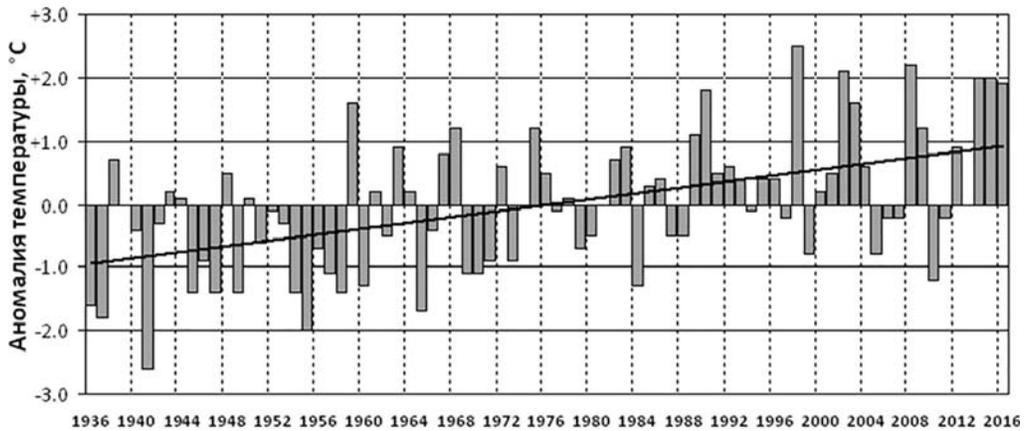


Рис. 2. Временной ход весенних аномалий температур воздуха, осредненных по 14 метеорологическим станциям Приморского края

Временной ход средней для календарной весны (март–май) аномалий температуры воздуха на ГМС Приморского края приведен на рис. 2.

В 81-летней климатической истории наблюдений примерно с середины 1930-х до середины 1970-х годов метеорологический режим Приморья характеризовался преимущественно более холодными и аномальными веснами (ситуации 1936, 1937, 1941, 1955, 1965 гг. и др.; аномалии от $-1,6$ до $-2,6$ °С).

Примечательно, что примерно с середины 1970-х годов в изменчивости регионального режима наметилась тенденция к потеплению и аномалии по тренду стали положительными. С конца 1980-х годов наблюдается общая тенденция доминирования положительных аномалий температур воздуха и их экстремальных значений (весна 1998, 2003, 2008, 2014–2016 гг.).

Весна 2010 г. в Приморье была холодной и затяжной (аномалия $-1,2$ °С) и второй по рангу холодной весной после 1984 г. (аномалия $-1,4$ °С).

Весны 2011 и 2013 гг. по температуре воздуха были близки к климатической норме ($-0,2$ и $+0,1$ °С), весна 2012 г. – умеренно теплой ($+0,9$ °С). Положительные температурные аномалии ($+1,9$... $+2,0$ °С) были зафиксированы также весной 2014–2016 гг.

Оценки межгодовых изменений параметров морской среды в заливе Петра Великого

Весна 2010 г. (термический тип – холодная). В ранневесенний период холодной и затяжной весны 2010 г. температура поверхностных вод на внешнем и среднем шельфе зал. Петра Великого не превышала 3 °С, на мелководных участках шельфа – $4-5$ °С (рис. 3). Опреснение поверхностных вод в вершине Уссурийского залива в период апрельской съемки было весьма слабо выраженным ($31,01-32,38$ епс) по причине относительно маловодного стока, однако в мае под влиянием обильных осадков и речного стока (больше нормы на 91 %) ситуация в заливе кардинально изменилась.

В апреле 2010 г. остаточные следы зимнего выхолаживания были выявлены преимущественно в юго-западной части зал. Петра Великого в диапазоне изобат $40-70$ м в виде холодной придонной прослойки. Здесь гидрологическая структура вод имела выраженный субарктический тип. Холодный промежуточный (придонный) слой (ХПС) толщиной от 2 до 23 м имел минимальную температуру ядра от $-0,70$ до $-0,84$ °С. Придонные локальные зоны максимума солености (до $34,03$ епс) соответствовали местоположению ядер ХПС (рис. 3).

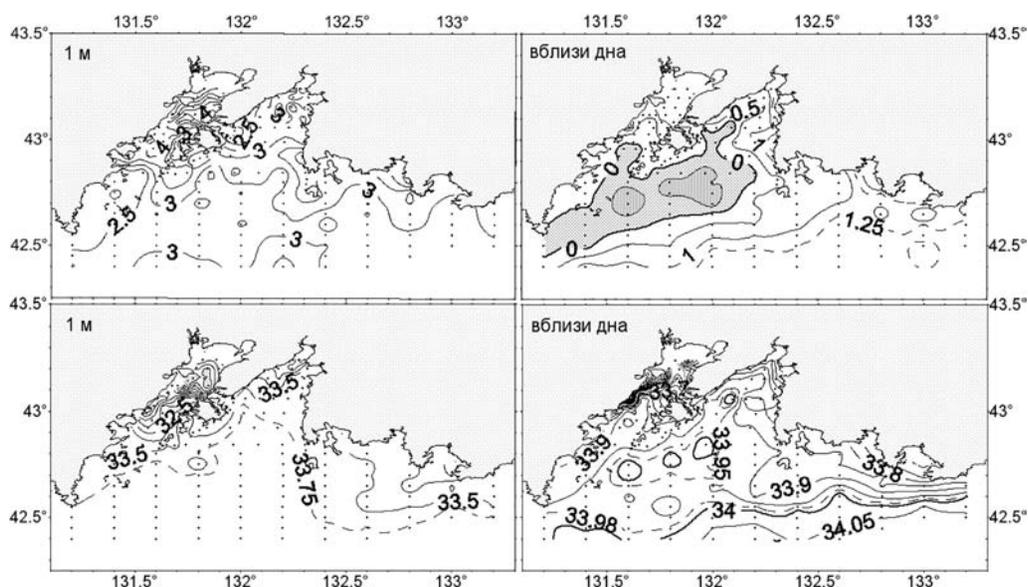


Рис. 3. Пространственное распределение температуры (вверху) и солёности воды (внизу) в поверхностном и придонном слоях зал. Петра Великого в апреле 2010 г.

Весна 2013 г. (термический тип – близка к норме, по расходам рек – высоководная). Гидродинамическая структура вод на приморском шельфе весной 2013 г. формировалась в условиях близких к норме температур воздуха (рис. 2) при повышенной водности рек (больше нормы на 22 %) и адвекции тепла с востока – от западной ветви Цусимского течения (рис. 4, врезка). Во второй декаде мая в Амурском и Уссурийском заливах температура поверхностных вод на мелководных участках внутреннего шельфа с глубинами около 20–25 м составляла 7,0–9,5 °С, солёность варьировала от 11,10 до 30,29 eps (рис. 4).

На среднем шельфе между изобатами 30–50 м имела место фронтальная зона, которая ассоциировалась со стоковым южным течением. Это течение обычно формируется в летний период вблизи западного (условного) берега Уссурийского залива при сильном поверхностном опреснении вод. Столь раннее формирование стокового течения было вызвано аномально высокими атмосферными осадками и, следовательно, повышенным поступлением речных вод в Амурский и Уссурийский заливы весной 2013 г.

За пределами 50-метровой изобаты, включая зону внешнего шельфа, поверхностные воды характеризовались высокой однородностью: в верхнем перемешанном слое (ВПС) температура не превышала 4,5 °С, солёность – 33,75 eps. Глубина залегания нижней границы ВПС в заливе была относительно небольшой: от 2 до 6 м, локально до 10–24 м.

В весенний период 2013 г. прибрежные воды подвергались воздействию не только повышенного материкового стока, но и интрузионных затоков из сопредельных открытых районов моря, которые обусловили углубление термоклина до 42°30' с.ш. и положительную термическую аномалию вблизи дна в восточном секторе зал. Петра Великого (рис. 4).

Рисунок 4 иллюстрирует наличие придонной прослойки теплых вод с температурой более 3 °С на восточных участках шельфа зал. Петра Великого. Отметим, что эти значения температуры воды сопоставимы с летней нормой, что предполагает адвективную природу их происхождения, которая определялась возможными шельфовыми интрузиями западной ветви Цусимского течения (рис. 4, врезка). В ранневесенний период этот процесс, по-видимому, является важным показателем горизонтального водо- и теплообмена залива с внешним морем. Однако частота и интенсивность «ранневесенней» адвекции тепла на восточный шельф залива подвержена значительной межгодовой изменчивости, природа которой детально не изучена из-за ограниченного количества данных наблюдений.

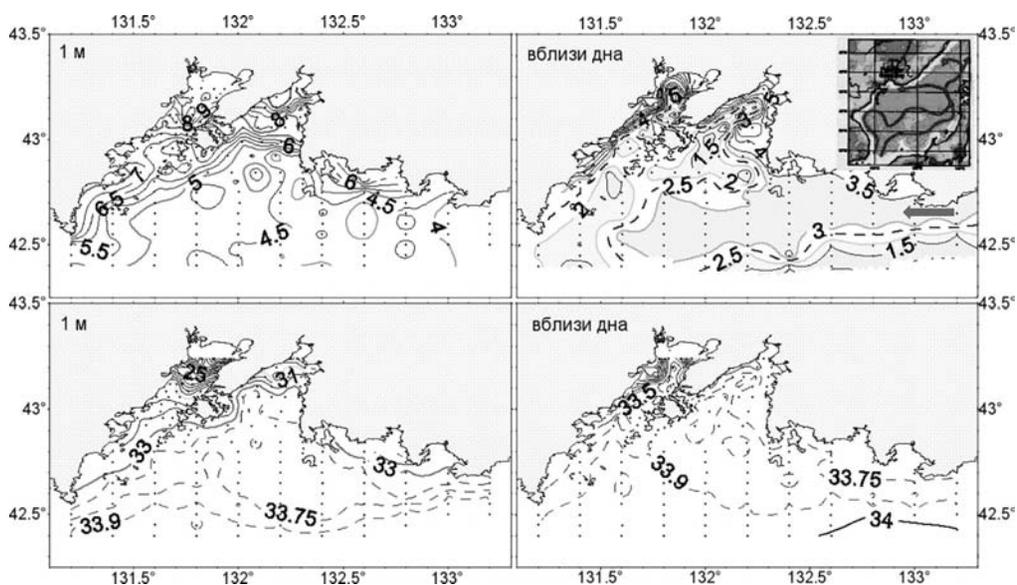


Рис. 4. Пространственное распределение температуры (вверху) и солёности воды (внизу) в поверхностном и придонном слоях зал. Петра Великого в мае. 2013 г. На врезке – схема путей переноса теплых вод к побережью Приморья (автор В.Б. Лобанов, ТОИ ДВО РАН)

В то же время на западном шельфе залива во второй декаде мая 2013 г. вблизи дна сохранялись многочисленные остаточные очаги холодных вод зимнего происхождения (≤ 2 °C, 33,9 епс).

Весна 2014 г. (термический тип – аномально теплая, маловодная). Гидродинамическая структура вод на приморском шельфе весной 2014 г. формировалась в условиях аномального прогрева поверхностных вод (аномалия +2,1 °C), относительно пониженного материкового стока (меньше нормы на 11 %) и при отсутствии адвекции тепла со стороны западной ветви Цусимского течения.

В первой декаде мая 2014 г. поверхностные воды залива имели более высокие фоновые значения температуры и солёности (на 1,5–2,0 °C и 0,10–0,15 епс), чем весной 2013 г. Температура поверхностных вод на северном мелководье достигала 8,50–10,85 °C; солёность из-за относительно маловодного стока рек варьировала от 28,50 до 31,90 епс в Амурском заливе и от 33,39 до 33,75 епс в Уссурийском заливе (рис. 5).

Совсем другая термическая картина наблюдалась в промежуточных и придонных слоях зал. Петра Великого. Высокая стратификация и отсутствие теплых интрузий обусловили низкие фоновые показатели придонных вод в восточном секторе залива в конце первой декады мая 2014 г. ($\leq 1,25$ – $1,50$ °C, т.е. примерно в 2 раза ниже, чем в 2013 г.). Такая же особенность проявлялась и в западном секторе залива. Здесь вблизи 50-метровой изобаты сохранялись очаги водных масс, сформированных зимой в процессе конвективного перемешивания. Они идентифицировались по отрицательным значениям температуры воды (до $-0,5$ °C) и увеличению ее солёности до 33,93–33,98, локально до 34,00 епс (рис. 5). В окрестности бровки шельфа залива весной 2014 г. температурный фон придонных вод также был относительно низким и сопоставим с показателями холодной весны 2010 г.

Весна 2015 г. (термический тип – аномально теплая, по расходам рек – близка к норме). В этот период, как и весной 2014 г., гидродинамическая структура вод на приморском шельфе формировалась в условиях аномального прогрева вод (аномалия +2 °C), но, в отличие от весны 2014 г., при близкой к норме водности рек и вторжении Приморского течения и теплых придонных интрузий западной ветви Цусимского течения. Однако последние не получили такого активного развития, как весной 2013 г., из-за блокирующего воздействия Приморского течения. В мае 2015 г. в акватории зал. Петра Великого доминировали воды

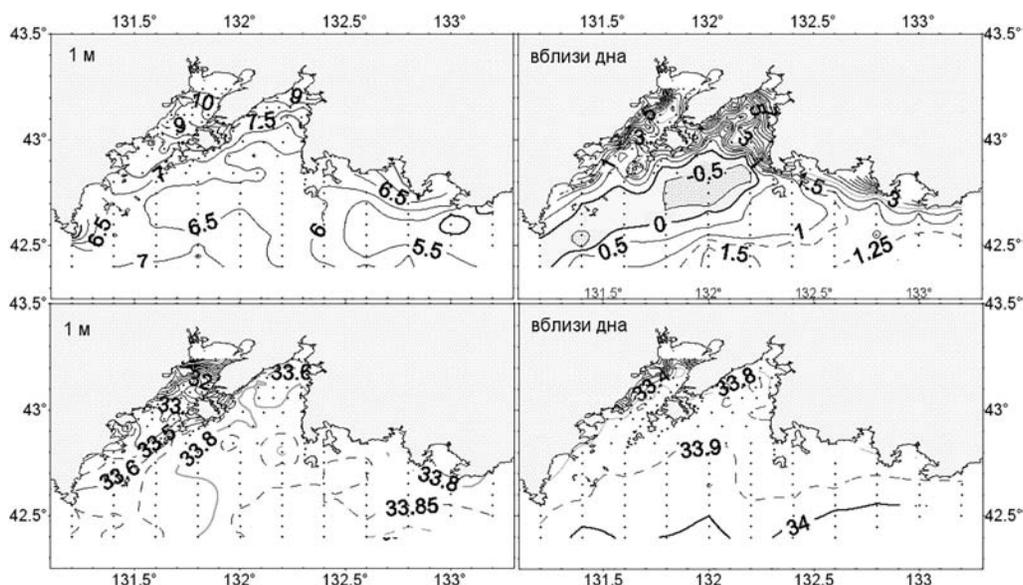


Рис. 5. Пространственное распределение температуры (вверху) и солёности воды (внизу) в поверхностном и придонном слоях зал. Петра Великого в мае 2014 г.

с низкой солёностью, которые практически полностью вытеснили более солёные воды зимнего происхождения (http://ferhri.org/images/stories/FERHRI/science/waterregime2015_zpv.pdf). Источниками вод с низкой солёностью в заливе являлись материковый сток и активное поступление вод Приморского течения, которое транспортировало из северных районов моря малосолёные воды, происхождение которых, возможно, было связано с амурским стоком.

Весна 2016 г. (термический тип – теплая, высоководная). В этот сезон гидрологическая структура вод приморского шельфа была предопределена предшествующей теплой зимой (аномалия $+2,2$ °C). Температурная аномалия весны 2016 г. составляла $+1,9$ °C, опреснение поверхностных вод было больше нормы на 26 %.

Весенняя термическая картина поверхностных вод в зал. Петра Великого в мае 2016 г. (съёмка 4–9 мая) во многом оказалась схожей с таковой в мае 2013 г. (съёмка 15–22 мая): фоновые значения температуры на мелководных участках шельфа варьировали в пределах $8,0$ – $9,5$ °C, на среднем и внешнем шельфе составляли $4,0$ – $5,0$ °C. В придонных слоях залива и вблизи бровки его шельфа в мае 2013 и 2016 гг., в отличие от ситуации 2014 и 2015 гг., не были выявлены прослойки остаточных «зимних» вод с отрицательными или пониженными (≤ 1 °C) значениями температуры (http://ferhri.org/images/stories/FERHRI/science/waterregime2016_zpv.pdf).

В условиях повышенного материкового стока структуре водной толщи на мелководье (глубины до 25 – 30 м) было свойственно раннее становление устойчивой стратификации. На среднем и внешнем шельфе залива вертикальное распределение солёности было более однородным: размытый галоклин/пикноклин проявлялся преимущественно в толще вод от 20 до 60 м.

Средние показатели шельфовых вод и их межгодовая изменчивость

В таблице приведены средние значения температуры, солёности вод и их среднеквадратические отклонения (СКО) на различных горизонтах и участках зал. Петра Великого (мелководный шельф, средний + внешний шельф, весь залив), для расчета которых использовались только данные майских съёмок 2013–2016 гг., выполненных ДВНИГМИ.

Средние показатели шельфовых вод в зал. Петра Великого в весенние периоды 2013–2016 гг.
(числитель – значение параметра, знаменатель – СКО)

Горизонт наблюдений, параметр (Т, °С; S, епс)	2013, 15–22 мая	2014, 5–9 мая	2015, 14–18 мая	2016, 4–9 мая
Зал. Петра Великого				
1 м, температура	6,07 / 1,91	7,13 / 1,38	7,25 / 1,91	6,19 / 2,00
1 м, соленость	31,95 / 3,63	33,45 / 0,84	32,58 / 1,40	31,61 / 2,80
50 м, температура	3,04 / 0,66	0,93 / 0,76	2,40 / 0,91	2,28 / 0,90
50 м, соленость	33,85 / 0,09	33,90 / 0,04	33,63 / 0,13	33,66 / 0,11
Придонная температура	3,06 / 1,42	2,11 / 2,43	3,44 / 2,19	3,20 / 1,61
Придонная соленость	33,60 / 0,79	33,79 / 0,33	33,30 / 0,92	33,55 / 0,37
Мелководный шельф залива				
1 м, температура	7,99 / 1,38	8,45 / 1,12	9,23 / 1,35	8,12 / 1,15
1 м, соленость	29,39 / 4,87	32,92 / 1,17	31,41 / 1,68	29,23 / 3,31
Придонная температура	3,60 / 1,87	3,99 / 2,39	5,37 / 1,79	4,59 / 1,18
Придонная соленость	33,25 / 1,14	33,63 / 0,46	32,84 / 1,29	33,28 / 0,42
Средний + внешний шельф залива				
1 м, температура	4,88 / 1,01	6,29 / 0,71	6,03 / 0,92	5,01 / 1,40
1 м, соленость	33,53 / 0,55	33,78 / 0,11	33,30 / 0,28	33,08 / 0,55
Придонная температура	2,70 / 0,80	0,74 / 1,25	2,09 / 0,25	2,21 / 1,03
Придонная соленость	33,85 / 0,09	33,91 / 0,06	33,64 / 0,16	33,74 / 0,17

Наиболее низкие средние значения солености воды ($\leq 29,23$ епс) и высокие СКО ($\leq 4,87$ епс) наблюдаются, как правило, в поверхностных слоях на мелководном шельфе залива, и они сильно варьируют в высоководные годы (2013, 2016 гг.). При этом средние значения температуры воды здесь различаются по годам менее чем на $1,2$ °С, что соответствует примерно величине СКО $\leq 1,4$ °С.

Обращает на себя внимание также низкая соленость поверхностных вод в зал. Петра Великого, которая доминирует в последние годы (см. таблицу). Как отмечалось выше, весной 2015 г. источником опреснения водной толщи залива являлось совместное воздействие материкового стока и повышенной адвекции вод Приморского течения. Однако аномально высокую степень опреснения прибрежных вод весной 2016 г. едва ли можно объяснить только повышенным береговым стоком (больше нормы на 30 %) и воздействием Приморского течения. Такие резкие межгодовые изменения солености (более 1 епс), скорее, указывают на участие адвекции в их происхождении. Имеются свидетельства [2, 3, 8, 19], что поверхностный слой Японского моря может испытывать воздействие еще одного мощного сезонного источника опреснения. Речь идет о проникновении через западный канал Корейского пролива опресненного стоком реки Янцзы вод Восточно-Китайского моря (соленость $< 33,0$ епс), северная адвекция которых при достаточном расходе через пролив [16] может достигать российского побережья [14]. Установлено, что в осенний сезон 2015 г. (25.09–05.11) и период с 15.12.2015 г. по 05.01.2016 г. в поверхностных слоях имела место активная северная адвекция этих вод в центральную часть Японского моря и в район Дальневосточного морского заповедника [11]. На внешнем и среднем шельфе залива средние показатели солености поверхностных вод в 2016 г. были самыми низкими (33,08 епс) за последние 4 года, что подтверждает гипотезу об адвективном характере формирования этой соленостной аномалии.

Весьма примечательным фактом весеннего режима вод в зал. Петра Великого является также относительно невысокая межгодовая изменчивость средних показателей солености ($\leq 0,27$ епс) и СКО ($\leq 0,13$ епс) на горизонте 50 м. Причины, по которым в текущем десятилетии наблюдается столь однородное распределение солености в промежуточных слоях залива, нуждаются в дополнительном исследовании. Вместе с тем средние показатели вод в придонных слоях зал. Петра Великого в текущем десятилетии претерпевали

значительные изменения. Так, весной 2014 г. для района среднего и внешнего шельфа средняя температура уменьшилась до $0,74\text{ }^{\circ}\text{C}$, т.е. почти в 3 раза, а соленость увеличилась примерно на $0,06\text{--}0,27$ епс по сравнению с показателями весны 2013, 2015, 2016 гг.

Вертикальная структура вод при различных типах весенних метеорологических условий

Межгодовые различия вертикальной структуры вод в прибрежно-шельфовой зоне зал. Петра Великого показаны на рис. 6.

В холодные весны (ситуация весны 2010 г., аномалия $-1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) из-за ослабленных потоков тепла из атмосферы водная толща залива, как правило, характеризуется относительно однородным распределением температуры и солености по вертикали.

Примечательная особенность вертикальной термической структуры вод весной 2010 г. – углубление термоклина (пикноклина) в направлении бровки шельфа (рис. 6). Этому способствовали ветровая обстановка в исследуемом районе непосредственно перед судовой съемкой, а также интенсивное воздействие сгонных северо-западных ветров со скоростью $6\text{--}8$ м/с (порывы до 12 м/с) в период ее проведения. В результате ветрового воздействия произошел сгон поверхностных относительно теплых вод из района мелководья (ст. 27–56) в мористую часть залива. Эти воды, скопившиеся в окрестности бровки шельфа (ст. 121–125), опустили нижнюю границу термоклина на глубину около 30 м. Отметим, что выраженный наклон изотерм (изопикн) может также свидетельствовать о присутствии в окрестности бровки шельфа геострофического течения, направленного на восток (упоминания о нем имеются в более ранних работах [1, 6]).

В условиях нормальной весны 2013 г. вертикальная термическая структура вод характеризовалась наличием «маркерной» изотермы $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ вблизи бровки шельфа и значительным повышением температуры в толще вод $30\text{--}100$ м (рис. 6) в результате проникновения на юго-восточный шельф залива теплой инородной водной массы, основной источник формирования которой находился, по-видимому, в другой климатической зоне.

В аномально теплую весну 2014 г. прогрев и нарастание тепла в поверхностных водах залива происходили более активно, что обусловило раннее формирование термоклина (пикноклина) в интервале глубин $15\text{--}30$ м (рис. 6) и значительные вертикальные градиенты гидрологических характеристик (в пикноклине $0,10\text{--}0,30\text{ }\sigma_t/\text{м}$, локально $0,50\text{--}0,70\text{ }\sigma_t/\text{м}$). Однако термические характеристики промежуточной водной массы, подстилающей термоклин (пикноклин) и сформированной в зимнее время, даже в условиях аномально теплой весны 2014 г. без ранневесенней адвекции тепла имели, как и придонные воды, очень низкие значения. Очевидно, что в весенний период фоновые показатели промежуточных и придонных вод на среднем и внешнем шельфе зал. Петра Великого слабо реагируют на термические показатели атмосферы. В большей степени они, по-видимому, зависят от адвективных факторов – региональных особенностей режима подповерхностных и придонных течений, прижатых к материковому берегу, с которыми спорадически могут поступать в залив воды открытого моря.

Следует также отметить, что присутствие в прибрежно-шельфовой зоне мощных опресняющих факторов (реки Раздольная, Артемовка, Шкотовка, Цукановка, Амба) оказывает заметное влияние на вертикальную структуру и водообмен залива с внешним морем [5, 7]. Разрез, который выполнялся по южной периферии мелководной зоны внутреннего шельфа ($42^{\circ}50'$ с.ш.), пересекал струи воды с низкой соленостью, поступающей из Амурского (ст. 77–79) и Уссурийского (ст. 80–85) заливов (рис. 7). Эти струи можно было идентифицировать в весенние периоды высоководных 2013 и 2016 гг., в 2015 г. и относительно маловодного 2014 г. (меньше нормы на 11%) в западном секторе разреза по повышенным градиентам плотности в толще вод, расположенных выше пикноклина (примерно от поверхности до глубин $15\text{--}20$ м).

Поскольку весной 2010 г. высокая степень опреснения поверхностных вод в зал. Петра Великого проявилась преимущественно в период повышенного майского стока

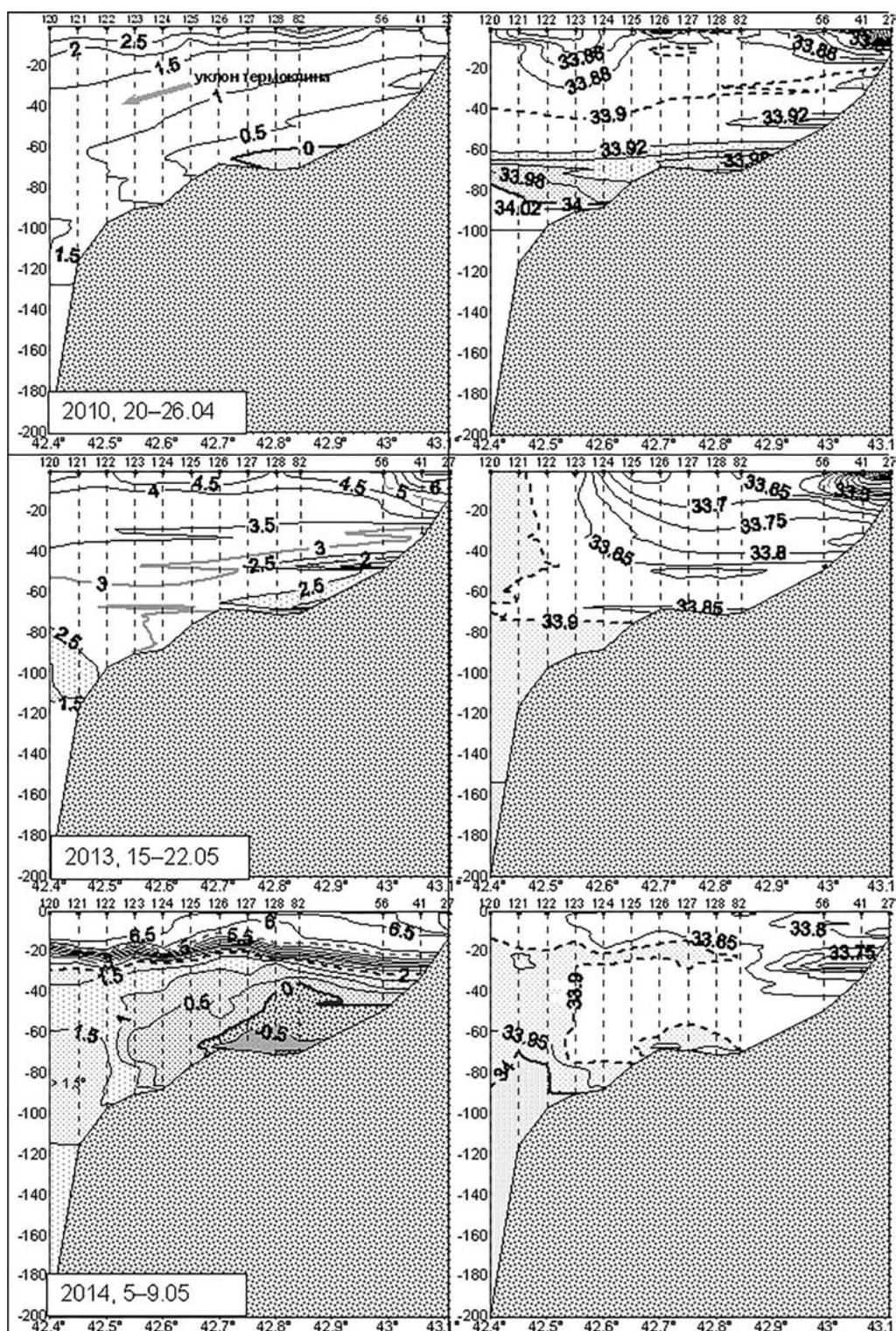


Рис. 6. Вертикальное распределение температуры (слева) и солёности (справа) воды на разрезе по 132° в.д. весной 2010, 2013 и 2014 гг.

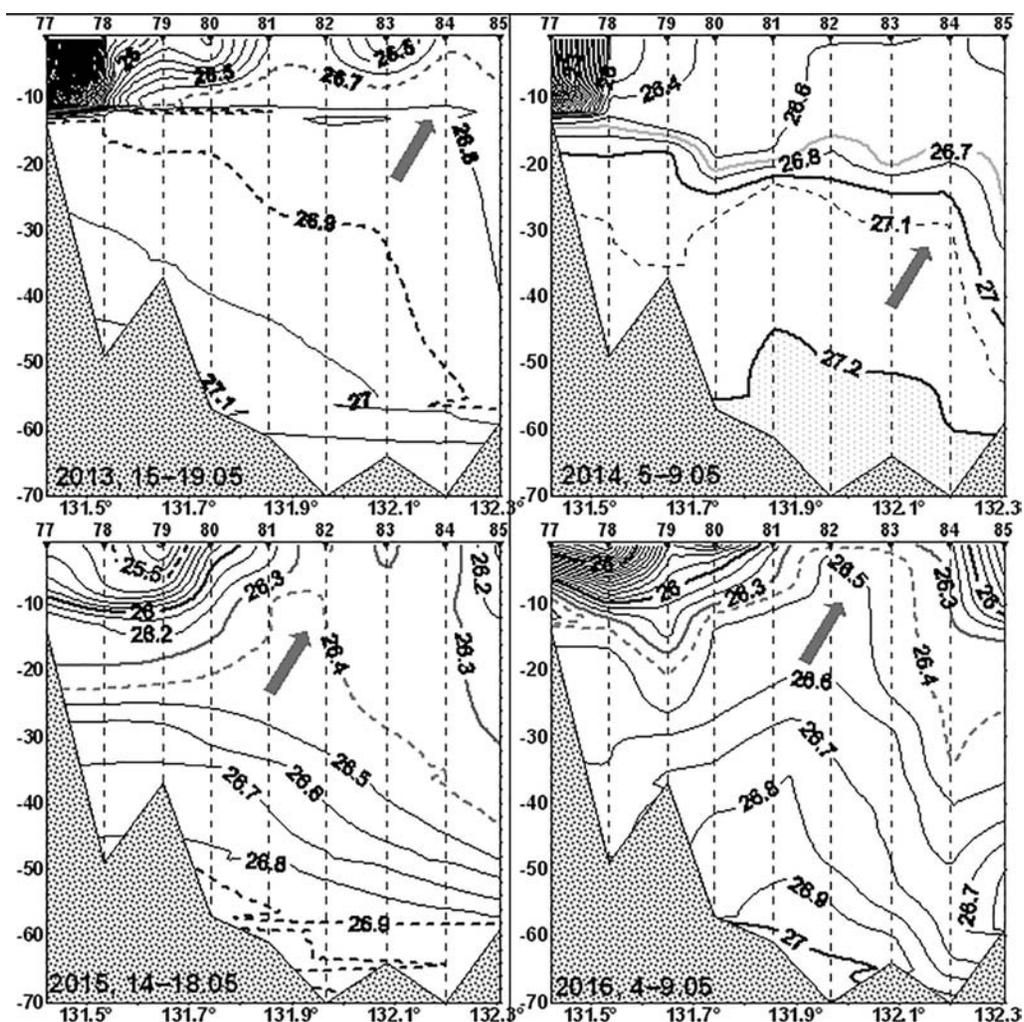


Рис. 7. Распределение плотности морской воды на разрезе по 42°50' с.ш. в весенние периоды 2013–2016 гг. (стрелками указаны резкие деформации пикноклина)

и непосредственно после него, мониторинговая съемка залива, выполненная в третьей декаде апреля 2010 г., не позволила оценить это воздействие.

Речные воды, поступающие в залив, резко увеличивают вертикальную стратификацию, что в свою очередь затрудняет передачу тепла на глубины. В текущем десятилетии эта тенденция заметно усилилась, судя по относительно высоким показателям весеннего материкового стока (больше нормы на 20–90 % весной 2010, 2011, 2013, 2016 гг.).

Динамика вод и ее изменчивость

В 2010 г. впервые в истории исследований зал. Петра Великого была выполнена подробная океанографическая съемка в ранневесенний период. Принципиальное отличие динамики вод, сложившейся в условиях холодной весны 2010 г., от летних схем течений [5, 7, 10, 18] состоит в отсутствии в южной глубоководной части залива традиционного элемента ее структуры – антициклонического вихря, который обычно наблюдается здесь в летне-осенний период. В конце апреля 2010 г. циркуляция вод в заливе была представлена обширным, но слабо динамичным циклоническим круговоротом (Z1) с центром в зоне 42,7° с.ш. и 132,05° в.д. Орбитальная скорость вращения воды в нем не превышала

2–5 см/с (рис. 8). Эта сезонная особенность динамического режима вод проявляется в заливе преимущественно в ранневесенний период (апрель–май) и обусловлена увеличением наклона изопикнических поверхностей (ростом уровня морской поверхности) в юго-восточном секторе залива под воздействием более теплых вод внешнего моря, что инициирует здесь развитие северной компоненты геострофического переноса. По мере прогрева и изменения уклона уровня циклоническая циркуляция вод в заливе заметно ослабевает и меняет знак.

Отличительная особенность весенней динамики вод в высоководные 2013 и 2016 гг. – выраженная вихревая структура (вихри Z1, Z2, A*, A**) и высокая активность стоковых прибрежных течений, которые проявляются повышенными скоростями течений (до 15–30 см/с) в западном секторе Уссурийского и Амурского заливов. В ранневесенний период основное поступление вод в Уссурийский залив осуществляется, как правило, с западной стороны о-ва Аскольд. Юго-западный прибрежный маршрут (траверз мыса Гамова), по-видимому, не является определяющим для зал. Петра Великого, поскольку здесь проникновение трансформированных субтропических вод на север заметно ограничивается встречными южными потоками из залива. Поэтому в климатическом плане ранней весной воды юго-западного сектора залива, подстилающие термоклин, обычно оказываются заметно холоднее, чем воды в его юго-восточном секторе, которые в зимний период подвергаются отепляющему воздействию со стороны промежуточных вод открытого моря.

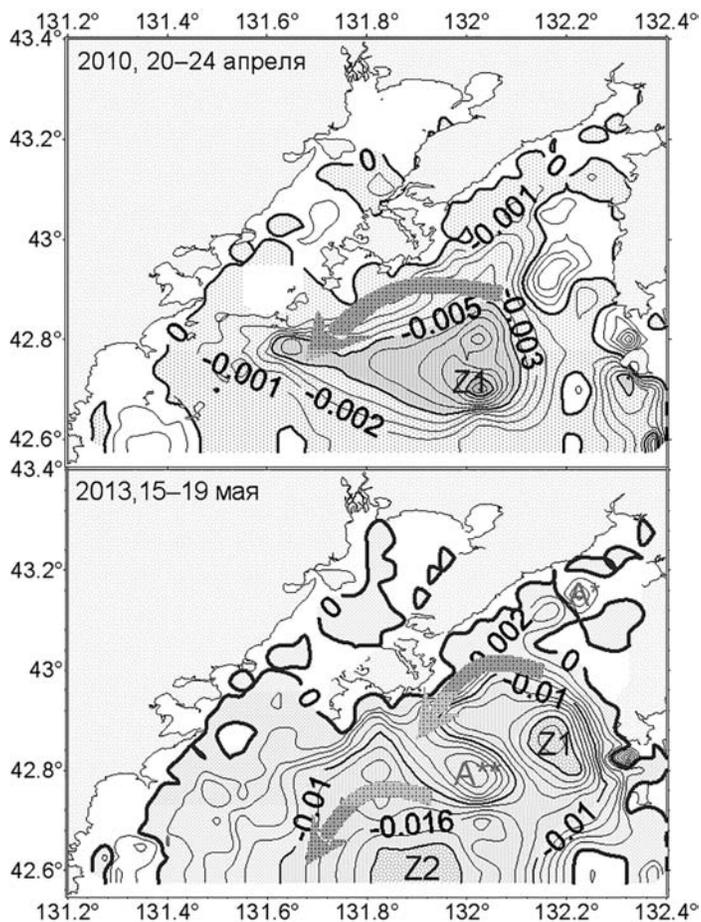


Рис. 8. Интегральная циркуляция вод в полных потоках ($\text{м}^3/\text{с}$) в зал. Петра Великого холодной весной 2010 г. и высоководной весной 2013 г. Z1, Z2 – циклонические, A*, A** – антициклонические вихри

Обращает на себя внимание доминирование переноса вод на восток вблизи бровки шельфа в условиях весны 2014 г. (рис. 9), что в целом нетипично для этого сезона. Интенсивная восточно-направленная струя холодных вод в подтермоклинном слое активно проникла на средний и даже внутренний мелководный шельф, где непосредственно контактировала с областью прибрежного течения противоположного (западного) направления. Помимо этого она являлась возможным препятствием для проникновения в зал. Петра Великого вод Приморского течения и теплых интрузий с востока.

Весной 2016 г. картина была иной: в окрестности бровки шельфа преобладали западные стоковые течения (зональная компонента до 16 см/с), на внешнем шельфе – преимущественно в верхнем слое водной толщи (0–35 м), на среднем – во всей водной толще (рис. 9). Есть основания полагать, что не только береговой сток, но и генеральное направление течений вблизи бровки шельфа, а также общий масштаб и глубина проникновения вод открытого моря в зону мелководного шельфа определяют межгодовые вариации значений температуры водной толщи и ее солености в зал. Петра Великого.

В целом гидрологическая обстановка, сложившаяся в зал. Петра Великого весной 2016 г., проявляла относительно высокую межгодовую преемственность, характеризовалась интенсивной динамикой вод, как и весной 2013 г., и водообменом с внешним шельфом. Общие черты циркуляции и поле поверхностных скоростей течений в весенние периоды 2010 и 2013–2016 гг. оказались весьма схожими и соответствовали циклоническому движению вод.

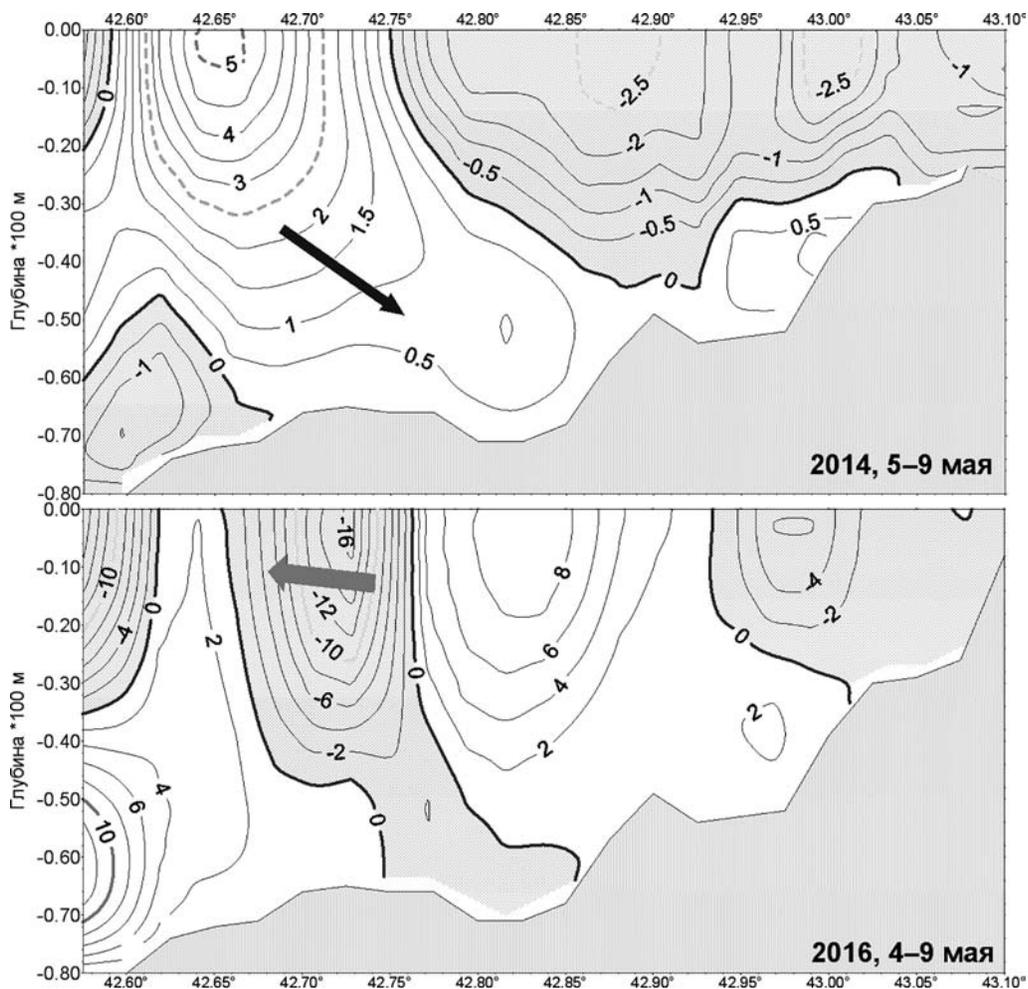


Рис. 9. Зональная компонента скорости течений в зал. Петра Великого на разрезе по 132° в.д. в мае 2014 и 2016 гг.

Выводы

Выявлена высокая межгодовая преемственность весенней динамики вод в зал. Петра Великого в 2010, 2013–2016 гг. Ее отличительным признаком является выраженный циклонический характер поля течений на внешнем и среднем шельфе залива и неоднородная структура течений по вертикали с наличием противоположных потоков в толще вод, расположенной ниже термоклина и вблизи дна. Этот тип режима косвенно можно диагностировать по углублению термоклина в восточном секторе залива (разрез по 42°30' с.ш.) и распределению плотности σ_t на разрезе по 42°50' с.ш.

Адвекция тепла с востока (интрузии западной ветви Цусимского течения) в ранневесенний период способна заметно улучшить термическую картину промежуточных и придонных вод на внешнем и среднем шельфе зал. Петра Великого, а также инициировать более ранний переход морской среды к летним условиям (май 2013, июнь 2011, май 2015 гг.). Для идентификации ранневесенней адвекции тепла по данным судовых наблюдений целесообразно использовать распределение придонной температуры воды в заливе или вертикальное распределение температуры на разрезе по 132° в.д. (маркерная изотерма 3 °С вблизи бровки шельфа).

В текущем десятилетии масштабному воздействию пресноводного стока поверхностные воды зал. Петра Великого подвергались не только в 2016 г., но также в высоководных 2010 и 2013 гг. Опресненные и более прогретые поверхностные воды, перекрывая подстилающие холодные и более соленые, резко увеличивают вертикальную стратификацию. Это затрудняет насыщение промежуточных вод кислородом и может инициировать развитие гипоксии в придонных слоях залива, а также оказывать влияние на поведение и распределение придонных обитателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амброз А.И. Сельдь залива Петра Великого // Изв. ТИНРО. 1931. Т. 6. С. 1–31.
2. Андреев А.Г. Межгодовая изменчивость расхода вод через Корейский/Цусимский пролив и ее влияние на содержание растворенного кислорода в водах Японского моря // Метеорол. и гидрология. 2010. № 9. С. 74–85.
3. Андреев А.Г. Пространственно-временная изменчивость концентраций химических параметров и хлорофилла-*a* в водах Японского моря // Океанологические исследования дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана / отв. ред. В.А. Акуличев. Кн.1. Владивосток: Дальнаука, 2013. С. 247–259.
4. Будаева В.Д., Макаров В.Г. О воздействии зимнего выхолаживания на структуру и динамику вод северо-западной части Японского моря // Вестн. ДВО РАН. 2013. № 6. С. 30–41.
5. Будаева В.Д., Зуенко Ю.И., Макаров В.Г. Структура и динамика вод залива Петра Великого в условиях сильного летнего распреснения (2008–2009 гг.) // ДВНИГМИ – 60 лет. Владивосток: Дальнаука, 2010. С. 158–172. (Тр. ДВНИГМИ; юбилейн. вып.).
6. Данченков М.А., Фельдман К.Л., Файман П.А. Температура и соленость вод залива Петра Великого // Гидрометеорология и экология Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2003. С. 10–25. (Тр. ДВНИГМИ; № 4).
7. Дубина В.А., Митник Л.М., Катин И.О. Особенности циркуляции вод залива Петра Великого на основе спутниковых мультисенсорных данных // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря. М.: ГЕОС, 2008. С. 82–96.
8. Жабин И.А., Таранова С.Н., Талли Л.Д., Лобанов В.Б., Салюк А.Н. Характеристики промежуточных вод в южной части Японского моря // Метеорол. и гидрология. 2006. № 6. С. 53–61.
9. Зуенко Ю.И., Юрасов Г.И. Водные массы северо-западной части Японского моря // Метеорол. и гидрология. 1995. № 8. С. 50–57.
10. Карнаухов А.А., Сергеев А.Ф. Структура и динамика вод залива Петра Великого летом // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря. М.: ГЕОС, 2008. С. 57–72.
11. Крохин В.В., Будаева В.Д., Котович Н.Г., Филь А.Ю. Аномальный выход южного циклона на Приморье в январе 2016 г. и его воздействие на термическую структуру залива Посьета // Материалы III науч. конф. «Океанография залива Петра Великого и прилегающей части Японского моря». Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2017. С. 18.
12. Кубай Б.В., Мендельсон Э.А., Цурикова Т.В. Изменяется ли климат Приморского края? Владивосток: ПУГМС, 2012. 130 с.

13. Макаров В.Г., Будаева В.Д. Реконструкция фонового распределения плотности в районе северо-восточного побережья о. Сахалин для летнего периода на основе параметризации вертикальной структуры вод // Экологические аспекты освоения нефтегазоносных месторождений. Кн. 1. Владивосток, 2009. С. 146–161.
14. Никитин А.А., Лобанов В.Б., Данченков М.А. Возможные пути переноса теплых субтропических вод в район Дальневосточного морского заповедника // Изв. ТИНРО. 2002. № 131. С. 41–53.
15. Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря / под ред. В.А. Акуличева. М.: ГЕОС, 2008. 459 с.
16. Трусенкова О.О., Каплуненко Д.Д. Моделирование крупномасштабных аномалий температуры поверхности Японского моря, обусловленных динамическими процессами // Океанологические исследования дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана / под ред. В.А. Акуличева. Кн. 1. Владивосток: Дальнаука, 2013. С. 37–51.
17. Храпченков Ф.Ф., Дулова Н.М., Горин И.И., Сергеев А.Ф. Долговременные измерения течений и температуры воды в заливе Петра Великого в 2004–2007 гг. // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря. М.: ГЕОС, 2008. С. 9–56.
18. Fayman P.A. The currents modeling for Peter the Great Bay on the base of FERHRI survey, 2001 // Pacific Oceanogr. 2003. Vol. 1, N 1. P. 79–82.
19. Lie H.-J., Cho C.-H., Lee J.-H., Lee S. Structure and eastward extension of the Changjiang River plume in the East China Sea // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108, N C3. P. 22.1–22.14.
20. Makarov V.G., Zaytsev O.V., Budaeva V.D., F. Salinas-Gonzalez. A piecewise curve-fitting technique for vertical oceanographic profiles and its application to density distribution // J. Oceanogr. 2008. Vol. 64, N 5. P. 675–690.