

УДК 551.583.1: 551.46.06

И.Д. РОСТОВ, Н.И. РУДЫХ, В.И. РОСТОВ, А.А. ВОРОНЦОВ¹

Проявления глобальных климатических изменений в прибрежных водах северной части Японского моря

Представлены результаты анализа межгодовых изменений гидрологических характеристик - температуры воды, солёности и уровня моря по данным срочных гидрометеорологических наблюдений на прибрежных станциях Росгидромета в Японском море за период 1980-2015 гг. Показано, что эффекты глобальных климатических изменений по-разному проявляются в пределах рассматриваемого региона и усиливаются в последние 1,5-2 десятилетия.

Ключевые слова: Японское море, залив Петра Великого, Татарский пролив, прибрежные воды, температура воды, солёность воды, уровень моря, тенденции климатических изменения.

Consequence of global climatic changes in coastal waters of northern part of the Japan Sea.
I.D. ROSTOV, N.I. RUDYKH, V.I. ROSTOV (V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok), A.A. VORONTSOV (All Russian Research Institute of Hydrometeorological Information, World Data Center, Obninsk).

Results of analysis of interannual changes of hydrological characteristics - water temperatures, salinity and sea level based on hydrometeorological observations at coastal stations of Roshydromet in the Japan Sea in course of 1980-2015 are presented. It is shown that effects of global climatic changes are differently shown within the considered region and amplify in the last 1,5-2 decades.

Key words: Japan Sea, Peter the Great Bay, Tartar strait, coastal waters, water temperature, water salinity, sea level, climatic changes tendencies.

Состояние проблемы

Изменение климата Земли проявляется во всех компонентах климатической системы, в том числе в изменениях атмосферной и океанической циркуляции, гидрологического режима и ледяного покрова морей, в увеличении числа и интенсивности экстремальных опасных природных явлений [13, 28]. Поэтому изучение региональных особенностей глобальных изменений, происходящих в последние десятилетия, и оценка их воздействия на морскую среду является актуальной научной задачей.

Результаты опубликованных исследований указывают на возможные причины смены климатического режима в Азиатско-Тихоокеанском регионе, цикличность колебаний гидрометеорологических характеристик, неоднозначность происходящих изменений и многофакторность их воздействия на компоненты морских экосистем [6, 21, 23 и др.]. Анализ параметров локальной атмосферной циркуляции показал, что со второй половины 70-х годов в климатическом режиме дальневосточного региона происходят заметные изменения, в результате которых количество

*РОСТОВ Игорь Дмитриевич – кандидат географических наук, заведующий лабораторией, РУДЫХ Наталья Ивановна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, РОСТОВ Владимир Игоревич – научный сотрудник (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток), ВОРОНЦОВ Александр Анатольевич – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией (Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации. Мировой центр данных, Обнинск). E-mail: rostov@poi.dvo.ru

"холодных" синоптических типов над дальневосточными морями сокращается, активность и продолжительность зимнего муссона уменьшается, а летнего – увеличивается при ослаблении его холодной стадии. На рубеже XX-XXI вв. отмечена новая фаза смены многолетнего климатического режима в муссонной системе Северо-Восточной Азии, которая продолжается по настоящее время [22].

В результате перестройки атмосферного режима на фоне глобальных климатических изменений с конца 80-х годов произошло "потепление" климатических условий и в морях дальневосточного бассейна [5, 12, 26]. Так, в Японском море наблюдается выраженный положительный тренд температуры воды и уровня моря, а также разнонаправленные тенденции изменения солености вод поверхностного слоя различных участков акватории [7, 10, 14, 19]. Устойчивое увеличение температуры воды на поверхности Японского моря за минувшее столетие в среднем составило 1,72 °С, что значительно больше средней величины изменений по Мировому океану (0,51 °С).

Уровень моря служит индикатором локальных и глобальных изменений циркуляции в атмосфере и океане и отражает климатические тренды [17]. Наблюдаемые изменения уровня связаны главным образом с увеличением объема воды в океане при ее расширении по мере потепления, а также переносом в океан воды, находящейся на суше, в частности, из ледников и ледяных щитов. Изменение направления приземных ветров, тепловое расширение океанской воды и тающий лед могут изменить океанские течения, которые, в свою очередь, приводят к колебаниям уровня морей [3, 28]. Долговременные и устойчивые повышения уровня Японского моря составляют 1–3 мм/год [6, 10], что несколько меньше, чем в среднем по Мировому океану (2,3–3,4 мм/год) [29].

Одним из важных источников сведений о состоянии морской среды и происходящих климатических изменениях являются регулярные гидрометеорологические наблюдения на сети прибрежных гидрометеорологических станций (ГМС) сети Росгидромета в северной части Японского моря. Обобщению и анализу этих данных за разные периоды посвящено множество работ. Большинство из них ограничивалось рассмотрением данных ГМС Приморского края и касалось температуры воды, в некоторых - сезонных изменений уровня моря, а также отдельных метеопараметров [7–10, 14, 15, 32 и др.]. Однако динамика межгодовых и сезонных изменений гидрологических характеристик прибрежных вод по данным всей сети российских ГМС в Японском море, как региональный отклик на глобальные процессы, происходящие в последние десятилетия, изучена недостаточно.

Цель настоящей работы – определение особенностей и тенденций межгодовых изменений температуры воды, солености и уровня в прибрежных районах северной части Японского моря за последние 36 лет на фоне общего "потепления" климатических условий в дальневосточном бассейне.

Материал и методы

Для анализа межгодовых изменений гидрологических характеристик использовались данные срочных наблюдений гидрометеорологических параметров на прибрежных ГМС Росгидромета в российской части Японского моря за период с 1980 по 2015 г. включительно (рис. 1, табл. 1), прошедшие первичный контроль по стандартной методике Росгидромета и включенные в электронные базы данных ЕСИМО (<http://portal.esimo.ru/portal/>) и ВНИИГМИ-МЦД (<http://meteo.ru/>). По ним рассчитывались и корректировались ряды средних месячных, средних за календарный сезон и средних годовых значений.

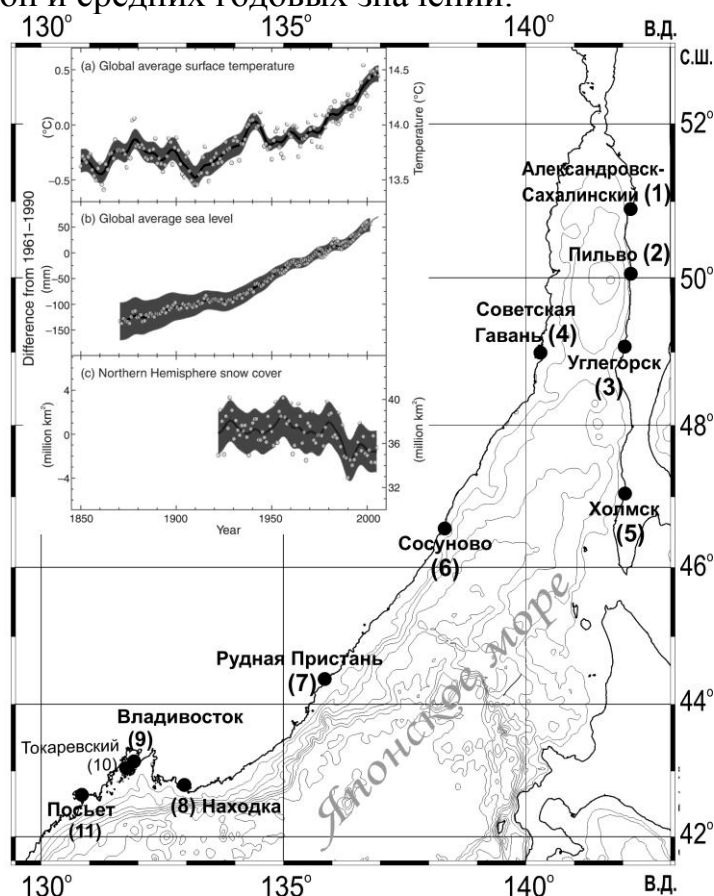


Рис. 1. Схема расположения станций наблюдений. На врезке – вековые изменения температуры (а), уровня моря (б) и площади снежного покрова (в) в Северном полушарии относительно их средних значений за 1961–1990 гг. (30-летний, т.н. базовый период. Пояснения см. в [28])

Таблица 1

Использованные данные и периоды наблюдений на прибрежных ГМС сети Росгидромета в российской части Японского моря

№ ст.	Название ГМС	Т воздуха	Т воды	Соленость	Уровень моря
1	Александровск-Сахалинский	1980–2013	1980–2013	1980–2013	
2	Пильво	1980–2015	1984–2015	–	–
3	Углегорск	1980–1985,	1980–2015	1980–2015	1980–2015

		1994–2015			
4	Советская Гавань	1980–2015	1980–2015	-	–
5	Холмск	1980–2015	1980–2015	1980–2015	1980–2015
6	Сосуново	1980–2015	1980–2015	-	–
7	Рудная Пристань	1980–2015	1980–2015	1982–2015	-
8	Находка	1980–2015	1980–2015	-	-
9	Владивосток	1980–1987, 1997–2015	1980–2015	1980–2015	1980–2015
10	Токаревский	1980–1985, 1997–2015	1980–2015	–	–
11	Посыет	1980–2015	1980–2015	1980–2015	1980–2015

Примечание: прочерк означает отсутствие сопоставимых данных.

При выборе станций прибрежной сети учитывались непрерывность и однородность рядов наблюдений, проводимых по единой методике; идентичными приборами и в одни и те же сроки. В некоторых случаях, в том числе когда переносились пункты наблюдений, менялись методики и сроки наблюдений и т.п., требование климатологической однородности рядов строго не соблюдалось [1]. Исчерпывающая информация о таких случаях не всегда доступна, поэтому следует признать, что результаты обобщения отдельных материалов могут носить лишь качественный характер. Одним из показателей неоднородности рядов наблюдений является величина коэффициента вариации. Для анализа были использованы только временные ряды, для которых эта величина не превосходит 10%.

Выбранные ГМС на севере Японского моря располагались на побережье Татарского пролива, а в его юго-западной части – на побережье Приморского края, включая зал. Петра Великого. Учитывая различия в гидрометеорологических условиях этих прибрежных акваторий, определяемые физико-географическим положением, влиянием региональных климатических и океанологических факторов, здесь условно можно выделить ряд обособленных районов [9, 14]. Они расположены у восточного и западного берегов Татарского пролива (район ТП), у побережья северного Приморья от мыса Золотой до мыса Поворотный (район СП) и в зал. Петра Великого (район ЗПВ).

Тренды оценивались для временных рядов, включающих среднемесячные, сезонные (календарные) и среднегодовые значения наблюдаемых параметров и их аномалий, определяемых как отклонение от средней величины за 30-летний период с 1984 по 2013 гг. включительно. Статистические оценки и графические построения проводились с использованием средств ПО MS Excel и Grapher. В качестве критического значения коэффициента корреляции на 5 % - ном уровне значимости линейного тренда была принята величина 0,34 (коэффициент детерминации $R^2 \geq 0,116$).

Результаты и обсуждение

Температура воды. Непрерывные и однородные (по величине коэффициента вариации) ряды наблюдений над температурой воды за исследуемый период представлены данными одиннадцати ГМС, расположенных в различных районах прибрежной зоны (табл. 1, рис. 1).

В исходных рядах наблюдений преобладают колебания с периодом от 2 до 4-7 лет (период, близкий к периодам Арктического и Южного колебаний [23]), различающихся по амплитуде, но сходных по фазе. Максимальная амплитуда и дисперсия изменений температуры зарегистрированы на ГМС Холмск, Рудная Пристань и Находка (табл. 2). Во временном ходе аномалий температуры на всех станциях прослеживаются тенденции ее повышения (рис. 2а).

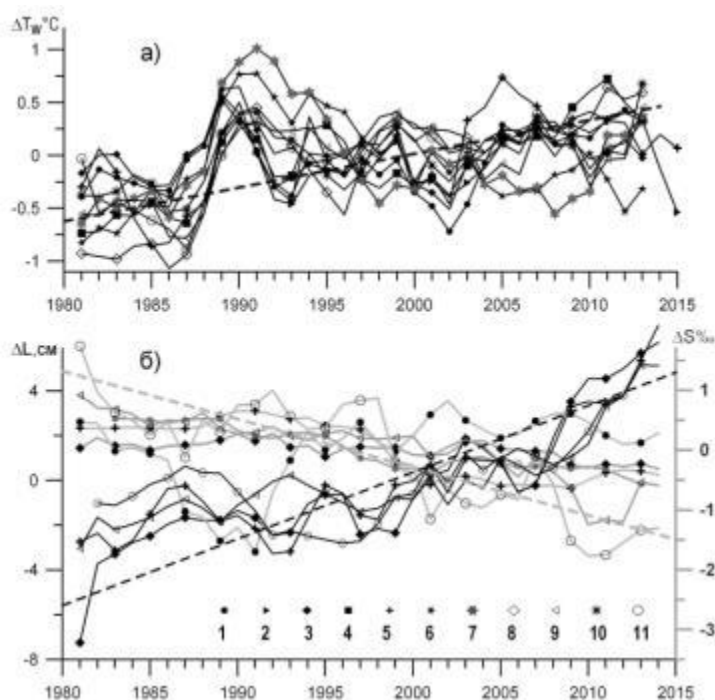


Рис. 2. Аномалии гидрологических характеристик на прибрежных ГМС, сглаженные трехлетним фильтром. Пунктирные линии – характерные линейные тренды со значимым коэффициентом детерминации: а – температура воды (ΔT_w), б – уровень морской поверхности (ΔL , черные линии) и соленость воды (ΔS , серые линии). Нумерация кривых соответствует названию, расположению и номеру станции (рис. 1, табл. 1)

Значимый положительный линейный тренд в межгодовом ходе температуры воды величиной 0,6 - 1,4 °С (0,02-0,04 °С /год) выявлен на всех станциях в зал. Петра Великого, а также на ГМС Холмск и Советская Гавань в Татарском проливе. Здесь он устойчиво проявляется, главным образом, летом, а на ГМС Советская Гавань - во все сезоны года. У побережья северо-восточной части Татарского пролива он значим только осенью (табл. 2).

Таблица 2

Характер и тенденции межгодовых изменений температуры воды на ГМС в северной части Японского моря за период с 1980 по 2015 г. (названия станций см. в табл. 1)

№ ст.	$\Delta \bar{T}_w$	$T_w \pm$, °С	σ^2	V, %	R^2	r	a, °С /год
-------	--------------------	----------------	------------	------	-------	---	------------

	°C					T_w/T_a	Весь период	зима	весна	лето	осень
1	$\frac{6,26}{4,22}$	+0,5	0,18	8,3	0,11	0,67	-	-	-	-	0,04
2	$\frac{6,75}{4,66}$	+0,3	0,20	8,0	0,04	0,65	-	-	-	-	0,04
3	$\frac{7,07}{4,73}$	+0,1	0,20	8,0	0,01	0,47	-	-	-	-	0,04
4	$\frac{6,48}{4,57}$	+1,1	0,26	7,5	0,41	0,83	0,03	0,01	0,03	0,06	0,04
5	$\frac{8,29}{5,55}$	+0,8	0,48	9,8	0,13	0,69	0,02	-	-	0,04	-
6	$\frac{6,64}{4,46}$	+0,2	0,31	10,1	0,01	0,58	-	-	-	-	-
7	$\frac{7,80}{5,08}$	+0,2	0,37	9,4	0,01	0,44	-	-	-	0,04	-
8	$\frac{8,64}{5,94}$	+1,4	0,40	8,5	0,47	0,44	0,04	-	0,05	0,10	-
9	$\frac{9,90}{7,75}$	+0,8	0,23	5,3	0,21	0,25	0,02	-	-	0,06	-
10	$\frac{8,90}{7,44}$	+0,7	0,15	4,7	0,16	0,59	0,02	-0,01	-	0,04	0,03
11	$\frac{10,17}{8,36}$	+0,6	0,22	5,0	0,17	0,48	0,02	-	-	0,05	0,05

Обозначения: $\Delta\bar{T}_w$ – экстремальные величины межгодовых изменений (в числителе – максимальные, в знаменателе – минимальные); $T_w \pm$ – тренд; σ^2 – дисперсия; V – коэффициент вариации; R^2 – коэффициент детерминации; r_{T_w/T_a} – коэффициент корреляции изменений температуры воды и воздуха; a – коэффициент уравнения линейной регрессии тренда (скорость изменений). Полужирным выделены величины значимого тренда, а прочерк – его отсутствие.

Обобщенно тенденции происходящих изменений температурного режима отражены на рис. 3а, на котором представлен межгодовой ход осредненных по всем ГМС аномалий ΔT_w и его линейная аппроксимация (в данном случае при $R^2 = 0,28$ тренд значим).

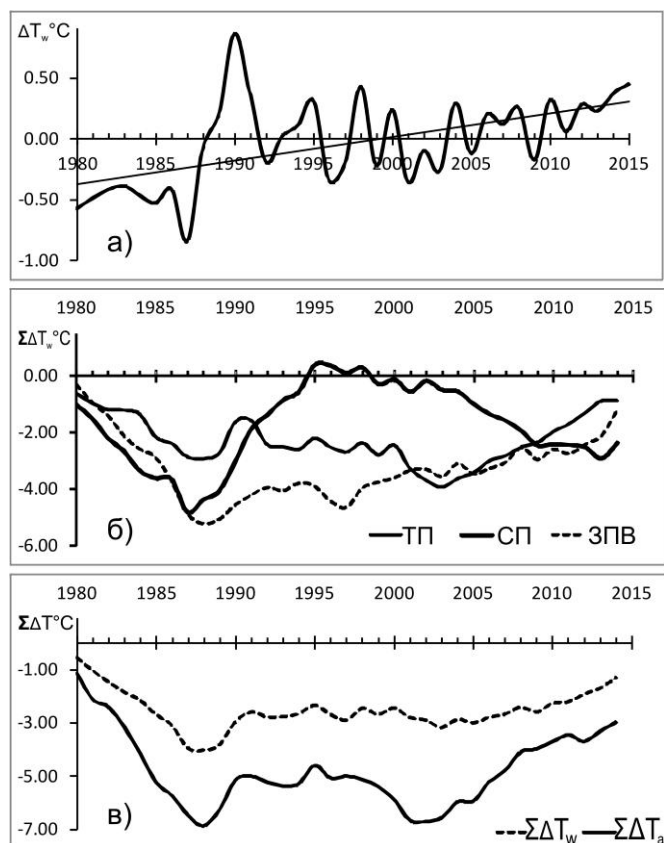


Рис. 3. Межгодовая изменчивость осредненных по всем ГМС аномалий температуры воды (а), накопленных аномалий по выделенным районам (б) и накопленных аномалий температуры воды ($\Sigma\Delta T_w$) и воздуха ($\Sigma\Delta T_a$) по всем ГМС (в)

За период наблюдений в пределах всего района произошло увеличение температура воды в среднем на $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($0,02\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$). Подобные значимые положительные тренды в ходе аномалий среднегодовой температуры воды ранее наблюдались не только на прибрежных ГМС, но и на поверхности и в толще вод приповерхностного слоя прилегающих районов северной части Японского моря [14, 19, 30].

На фоне общих тенденций в многолетнем ходе температуры воды наблюдается чередование "холодных" и "теплых" периодов. Обобщенно по данным всех ГМС наиболее холодными были 1980 и 1987 гг. (и весь период между ними), а 1990 г. — наиболее теплым, который до сих пор остается абсолютным максимумом в вековом ходе [16]. В последнее десятилетие по мере постепенного увеличения средних значений температуры воды амплитуда колебаний ΔT_w затухала, а величина дисперсии уменьшалась.

Общий характер изменения тенденций межгодового хода аномалий температуры воды на различных временных интервалах отражают графики "накопленных (интегрированных) аномалий" - накопленных сумм среднегодовых аномалий разного знака за исследуемый период [5, 11, 16, 23]. Ряды накопленных аномалий рассчитывались для каждой ГМС и усреднялись в пределах выделенных районов, что допустимо, учитывая наличие тесной корреляционной связи между изменениями ΔT_w на станциях

внутри района. Как следует из рисунка 3б характер накопления положительных и отрицательных аномалий на различных временных интервалах заметно отличается для каждого из районов. В многолетнем годовом ходе температуры интервалы спада кривых отражают процесс выхолаживания вод, а роста - тренд ее повышения, что является результатом совокупного воздействия адвективных и климатических факторов (особенностей муссонной циркуляции и теплообмена между морем и атмосферой). Наиболее резко эти изменения выражены на станциях северного Приморья, где теплая фаза этого процесса сменилась похолоданием в начале 2000-х годов, в то время как в других районах накопление положительных аномалий продолжалось.

В многолетнем ходе температур воды и воздуха для всего исследуемого района наблюдается сильная связь между колебаниями этих характеристик ($r = 0,8$), а изменения величин накопленных аномалий температуры воды ($\sum \Delta T_w$) и воздуха ($\sum \Delta T_a$) хорошо согласуются между собой (рис. 3в). Однако в пределах отдельных акваторий корреляционная связь колебаний температуры воды и воздуха ослабевает (табл. 2). Так, на ГМС Рудная Пристань, Находка и Владивосток коэффициент корреляции колебаний ΔT_w и ΔT_a уменьшается до величин 0,25-0,44 (при уровне значимости 0,34), что объясняется особенностями гидрологических режимов акваторий - характером циркуляции вод, усилением апвеллинга и т.п. [7], а на ГМС Владивосток - влиянием антропогенного фактора [18]. Ранее выполненные исследования температурного режима прибрежных вод у юго-западного побережья Сахалина и результаты отдельных съемок северо-западной части моря [4, 9, 16] также указывают на преобладание адвективных факторов над климатическими в межгодовых изменениях температуры воды в этом районе в результате усиления теплого Цусимского течения в отдельные годы [2, 4].

Выявленные тенденции являются следствием естественных и антропогенных изменений климатических условий и циркуляционных факторов, происходящих в последние десятилетия [5, 7, 14, 21, 22, 25].

Соленость воды. В результате предварительного анализа материалов были отобраны непрерывные, однородные ($V < 10\%$) ряды наблюдений на шести ГМС, расположенных в каждом из выделенных районов (табл. 1). Во временном ходе аномалий солености на всех станциях, кроме ст. 1, прослеживаются однонаправленные тренды понижения солености за период наблюдений (рис. 2б). В исходных рядах преобладают колебания с периодом от 2 до 5-7 лет, как и для температуры воды. Величина значимого линейного тренда этих изменений возрастает в южном направлении примерно в 7 раз (табл. 3). Максимальная амплитуда и дисперсия изменений солености зарегистрированы на самой северной (ст. 1, Александровск-Сахалинский) и самой южной (ст. 11, Посьет) станциях района. Здесь высокие величины этих среднегодовых значений отмечаются в основном за счет вклада более высокочастотных сезонных флуктуаций, связанных с распреснением вод в зимний (ст. 1) и летне-осенний (ст. 11) периоды.

Характер и тенденции межгодовых изменений солености на ГМС в северной части Японского моря за период наблюдений с 1980 по 2015 г. (названия станций см. в табл. 1)

№ ст.	$\Delta\bar{S}$, ‰	S_{\pm} , ‰	σ^2	V, %	R^2	r S/P	a, ‰/год				
							Весь период	зима	весна	лето	осень
1	$\frac{31,80}{27,99}$	+0,7	0,79	2,9	0,07	-0,06	-	+0,15	-	-	-
3	$\frac{33,30}{32,25}$	-0,4	0,07	0,8	0,18	-0,58	-0,01	-	-0,02	-0,02	-
5	$\frac{33,80}{32,17}$	-1,3	0,24	1,5	0,60	-0,65	-0,04	-0,03	-0,04	-0,04	-0,02
7	$\frac{32,87}{31,43}$	-1,2	0,14	1,2	0,76	-0,65	-0,04	-0,03	-0,04	-0,05	-0,03
9	$\frac{33,00}{29,87}$	-1,7	0,42	2,0	0,52	-0,68	-0,05	-0,05	-0,05	-0,08	-0,02
11	$\frac{32,96}{28,86}$	-2,8	1,61	4,1	0,40	-0,66	-0,08	-0,05	-0,06	-0,13	-

Обозначения: $\Delta\bar{S}$ – экстремальные величины межгодовых изменений (в числителе – максимальные, в знаменателе – минимальные); S_{\pm} – тренд; σ^2 – дисперсия; V – коэффициент вариации; R^2 – коэффициент детерминации; r S/P – коэффициент корреляции изменений солености и осадков; a – коэффициент уравнения линейной регрессии тренда (скорость изменений). Полужирным выделены величины значимого тренда, а прочерк – его отсутствие.

На рисунке 4а представлена кривая изменения средних величин аномалий для станций 3, 5, 7, 9 и 11 с отрицательным трендом и линия регрессии линейного тренда ($R^2 = 0,71$). В среднем по району соленость уменьшалась со скоростью 0,04 ‰ в год, что составило 1,3 ‰ за исследуемый период. Согласно ранее опубликованным данным [30] тенденции понижения солености прослеживались во всем приповерхностном 20-метровом слое в прилегающих мористых районах северо-западной части Японского моря. Однако по этим данным величина тренда за предшествующий полувек период наблюдений с 1950 г. была в 2 раза меньше.

Характер пространственно-временного изменения тенденций межгодового хода аномалий солености на различных временных интервалах отражают графики накопленных аномалий (рис. 4б), которые показывают периоды накопления аномалий различного знака. Отчетливо заметны индивидуальные различия в интенсивности и характере протекания этого процесса в разных участках прибрежной зоны.

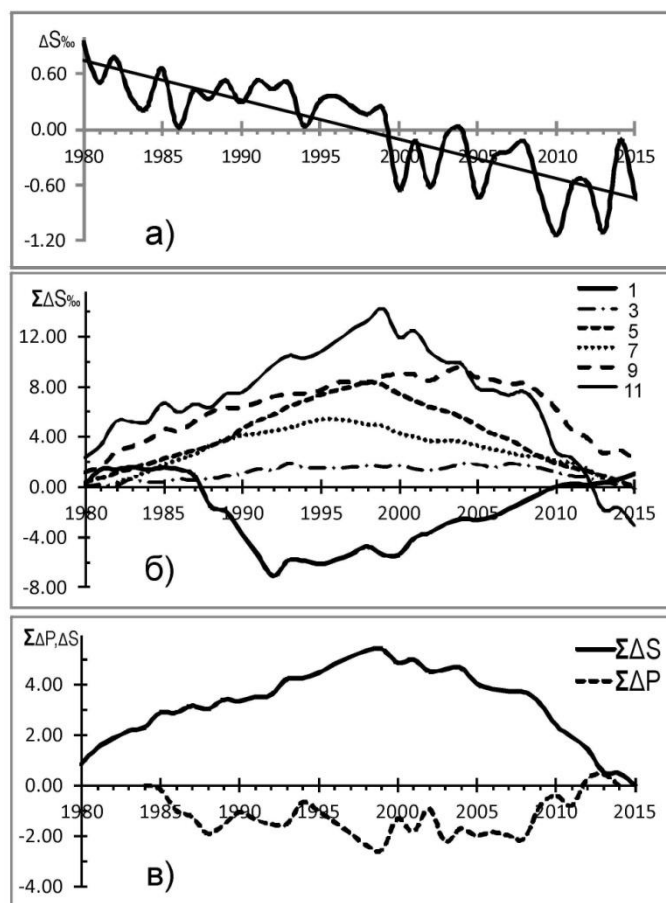


Рис. 4. Межгодовая изменчивость осредненных по ГМС аномалий солености (а), накопленных аномалий по отдельным станциям (б) и накопленных аномалий солености ($\Sigma\Delta S$) и суммы осадков ($\Sigma\Delta P$) по всем ГМС (в)

На всех ГМС, кроме Александровск-Сахалинский, с 1980 г до конца 1990-х гг. (во Владивостоке - до начала 2000г.) наблюдалась тенденция накопления положительных аномалий на фоне нерегулярных колебаний и тенденции незначительного понижения солености, а в последующие годы — смена тенденции и устойчивое распреснение вод. Эта два периода отчетливо выражены при осреднении данных по станциям с отрицательным трендом (рис. 4в). Предварительный анализ многолетних сезонных изменений аномалий солености показал, что на всех этих станциях отрицательные тренды стабильно наблюдаются весной и летом, когда скорость уменьшения солености максимальна, а на трех из них - во все сезоны года (табл. 3).

В *северо-восточной части Татарского пролива* наблюдалась противоположная тенденция (ст. 1, рис. 4б). Здесь процесс накопления отрицательных аномалий и уменьшения солености со скоростью 2 мм/год на начальном этапе в 1993 г. скачкообразно сменился периодом отсутствия трендовой составляющей ее межгодовых изменений в последующие годы. Этот процесс сопровождался многократным уменьшением величин дисперсии и коэффициента вариации колебаний солености. Александров-Сахалинский - единственный пункт наблюдений, где был отмечен значимый

положительный тренд солености в зимний период (табл. 3). Полученные результаты свидетельствуют об изменении характера водообмена в проливе Невельского, через который в Татарский пролив поступают распресненные воды из Амурского лимана. Этот процесс регулируется величиной стока р. Амур, особенностями муссонной циркуляции и положением уровенной поверхности [9, 33]. Обычно, в холодный период года, при усилении зимнего муссона (летом - при ослаблении летнего), в вершине Татарского пролива наблюдается интенсификация поступления вод из Амурского лимана в вершину Татарского пролива и распространение распресненных вод к югу. Анализ межгодового хода изменений среднемесячных величин солености на ГМС Александровск-Сахалинский показал, что после 1993 г. при ослаблении зимнего муссона [12, 26], эти вторжения низкосолёных вод в северо-восточной части пролива значительно ослабли, а через 10 лет - полностью прекратились. Определенное влияние на процессы водообмена оказывают и особенности вариаций уровня у западного побережья Сахалина и в Амурском лимане: их несинхронность и различие в тенденциях изменений. По оценкам авторов скорость роста уровня в районе ГМС Александровск-Сахалинский примерно в 3,5 раза выше чем в Амурском лимане (ГМС Джаоре и Пронга), что могло привести к изменению характера циркуляции вод.

В прибрежной зоне *юго-восточной части Татарского пролива*, где влияние стока р. Амур почти не ощущается, отрицательный тренд солености более выражен на ГМС Холмск, к северу от которой (Углегорск) он ослабевает в 3 раза (табл. 3). На ГМС Холмск этот тренд связывается с изменениями приходной части водного баланса, складывающегося из поступления менее солёных вод через вод через Корейский (Цусимский) пролив (летом и осенью) и пролив Лаперуза [2, 4, 17, 20, 27]. Северной ветвью циклонического круговорота южной части Татарского пролива [34] эти воды переносятся к побережью Приморского края, чем обусловлены высокие значения парной корреляция колебаний солености на станциях Холмск и Рудная Пристань ($r = 0,8$).

На станциях, расположенных *на побережье Приморского края*, величина отрицательного тренда межгодовых изменений солености возрастает с севера на юг более чем в 2 раза. По данным метеорологических наблюдений эти однонаправленные изменения происходили на фоне отсутствия значимых тенденций в ходе количества атмосферных осадков в исследуемом районе (рис. 4в) хотя сами колебания солености и годовой суммы осадков на ГМС хорошо коррелированы (табл. 3). В прибрежных районах к поступлению пресной воды с атмосферными осадками добавляется материковый сток. Одной из причин наблюдаемых изменений солености у побережья Приморья является увеличением повторяемости и продолжительности опасных наводнений и паводков. Несмотря на локальный характер этих явлений они могут приводить к значительным изменениям гидрологического режима прилегающих акваторий шельфа [24].

Уровень моря. Среднегодовые величины уровня моря являются достаточно инерционной характеристикой, а их динамика - важным

климатическим индикатором, отражающим влияние значительного комплекса гидрометеорологических факторов и динамических процессов в океане и атмосфере. Межгодовые изменения уровня в исследуемом районе обусловлены главным образом изменением составляющих водного баланса, стерическим эффектом вариаций плотности воды, циркуляции вод, а также эвстатическими колебаниями уровня Мирового океана в результате таяния льдов и изменения климата Земли [3, 6, 10, 31]. В отличие от сопредельных районов влиянием тектонических факторов здесь можно пренебречь.

Наиболее полные ряды мареографных ежечасных наблюдений над уровнем за исследуемый период имеются для четырех ГМС, расположенных на западном побережье о-ва Сахалин и в зал. Петра Великого (табл. 1). Во временном ходе аномалий уровня моря на этих станциях прослеживаются однонаправленные тренды с положительной динамикой (рис. 2б). Увеличение уровня за последние 36 лет составило в среднем около 7 см или 35–50 % диапазона наблюдаемых сезонных колебаний [3, 32]. Величина значимого линейного тренда этих изменений возрастает с юга на север в 2,5 раза одновременно с увеличением дисперсии межгодовых колебаний (табл. 4).

Таблица 4

Характер и тенденции межгодовых изменений уровня моря на ГМС в северной части Японского моря за период наблюдений с 1980 по 2015 г. (названия станций см. в табл. 1)

№ ст.	L±, см	σ ²	V, %	R ²	r L/Q	а, мм/год						
						1980-2015	1980-2000	2001-2015	зима	весна	лето	осень
3	+10,3	14,4	2,8	0,66	0,56	3,0	2,3	4,6	2,7	3,2	2,8	2,8
5	+7,7	9,6	6,2	0,56	0,56	2,2	1,0	5,5	1,7	2,5	2,6	1,9
9	+5,9	5,8	3,0	0,52	0,59	1,7	1,1	4,7	1,7	2,2	1,3	1,9
11	+4,0	4,8	1,5	0,27	0,31	1,2	-0,1	3,5	1,0	1,7	1,4	1,5

Обозначения: L± тренд, σ² - дисперсия; V - коэффициент вариации; R² – коэффициент детерминации; r L/Q - коэффициент корреляции изменений уровня и величины расходов в Корейском (Цусимском) проливе; а – коэффициент уравнения линейной регрессии тренда (скорость изменений). Полужирным выделены величины значимого тренда.

За исследуемый период уровень моря на станциях наблюдений возрастал со скоростью от 1,2 до 3,0 мм/год, что соответствует оценкам глобальных изменений в океане в XX-м столетии (1-3 мм/год), но примерно в 2 раза меньше, чем в южной части Японского моря [3, 6, 31]. В исходных рядах наблюдений преобладают колебания с периодом от 2 до 5 лет. Квазидвухлетние и 5-летние синфазные колебания характерны для всей акватории моря [6, 17]. Эти колебания хорошо коррелированы между станциями (r = 0,7-0,8), что позволяет рассматривать как индивидуальные, так осредненные по всем ГМС изменения аномалий уровня (рис. 5а,б).

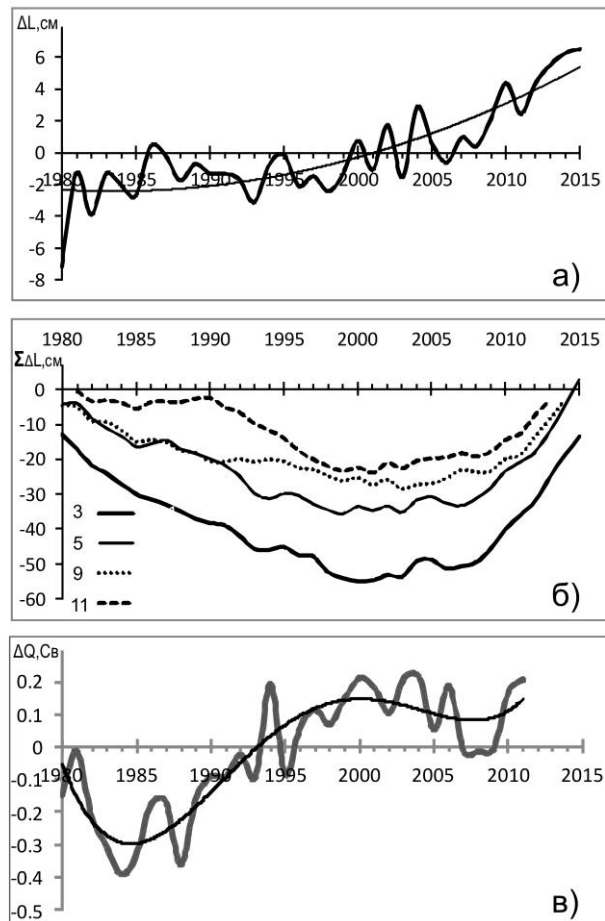


Рис. 5. Межгодовая изменчивость осредненных по всем ГМС аномалий уровня моря (а), накопленных аномалий уровня на отдельных станциях (б), аномалий объема поступления воды через Корейский (Цусимский пролив) (по данным [2]) (в) и их нелинейный тренд. Нумерация кривых соответствует названию и номеру станции (рис. 1, табл. 1)

Как следует из рисунков, на фоне общего повышения уровня в исследуемый период, изменения которого хорошо аппроксимируются параболой ($R^2 = 0,7$), можно выделить две основные фазы динамики этого процесса (табл. 4):

1. С начала периода до 2000 года, когда преобладали отрицательные аномалии, величина межгодовых изменений уровня была минимальной или не значимой.

2. Последующие годы, когда процесс постепенного накопления положительных аномалий на всех пунктах наблюдений усилился, и после 2007 г. наступил период резкого повышения уровня в 2-5 раз по сравнению с предыдущей фазой. Согласно аппроксимирующей кривой (рис. 5а) этот процесс идет с ускорением, а различия в величине трендов между станциями нивелируются.

Анализ особенностей многолетних сезонных изменений уровня показал, что на всех ГМС положительный линейный тренд этих изменений устойчив и значим во все сезоны года, однако весной (на ГМС Холмск – летом) скорость подъема уровня моря, как правило, выше.

Опубликованные ранее результаты анализа межгодовых изменений уровня в исследуемом районе основаны на данных наблюдений, проводившихся в середине и второй половине XX в., ограниченных 1985-1990 гг. В них отмечается наличие слабо выраженных колебаний уровня с периодом 4-5 лет, разнонаправленные тенденции этого процесса на отдельных ГМС и отсутствие значимых трендов [10, 31 и др.]. Как отмечалось выше причины многолетних изменений уровня поверхности, многообразны, а их проявления, происходящие в последующие десятилетия, неоднозначны.

В качестве одной из основных причин роста уровня рассматриваются изменения характеристик водного и теплового баланса бассейна моря в результате несогласованности приходной и расходной части объемов поступления и сброса вод через проливы Корейский (Цусимский), Сангарский и Лаперуза [3, 6, 17]. Согласно опубликованным данным [2] в период 1979–2011 гг. наблюдалось постепенное увеличение объема поступления более теплых вод в Японское море через Корейский (Цусимский) пролив (возрастание расхода в 1,3 раза) со значимым нелинейным трендом (рис. 5в). Этот процесс связан с усилением Цусимского и Восточно-Корейского течений и сопровождается тепловым расширением и уменьшением плотности вод поверхностного слоя. При этом в результате стерического эффекта уровень поверхности моря поднимается. Коэффициенты корреляции между изменениями уровня и величины расходов через пролив значимы для всех станций, кроме ГМС Посьет (табл. 4). Однако оба процесса сдвинуты по фазе на несколько лет, т.е. повышение уровня происходит с некоторым запозданием.

Было отмечено, что в динамически активных районах скорость роста уровня значительно выше, чем в других. Здесь рост происходит на фоне более высокочастотных колебаний и значительных межгодовых вариаций циркуляции вод. Формирование же областей с низкими значениями тренда можно связать с ослаблением циркуляции или существованием локальных зон дивергенции [3, 17]. Показано, что после 2000 г. наблюдается интенсификация системы течений циклонического круговорота в северной части Японского моря [25]. Этот период соответствует началу смены климатического режима в регионе [22].

Заключение

Результаты исследований основаны на данных многолетних (1980-2015 гг.) инструментальных наблюдений на сети российских ГМС, расположенных в прибрежной зоне северной части Японского моря. Они отражают особенности проявления и тенденции региональных изменений гидрологических характеристик в исследуемых акваториях в результате глобальных изменений термодинамических условий в океане и атмосфере и смены климатических режимов в Азиатско-Тихоокеанском регионе в последние десятилетия XX в. и на рубеже XX-XXI вв.

Выполненные исследования показали, что на фоне общего потепления климатических условий в дальневосточном бассейне, эффекты глобальных климатических изменений по-разному проявляются в пределах исследуемого региона и усиливаются с начала 2000-х годов на фазе очередной смены климатического режима. В исходных рядах наблюдений преобладают циклические колебания с периодом от 2 до 4-7 лет, а на большей части исследуемой акватории присутствуют значимые трендовые составляющие изменения гидрологических характеристик.

В целом по району увеличение температуры воды за последние 36 лет составило $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($0,02\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$). Значимый положительный линейный тренд в ходе среднегодовой температуры (рост на $0,02\text{--}0,04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$) выявлен на всех станциях в зал. Петра Великого, а также на ГМС Холмск и Советская Гавань в Татарском проливе. На всех станциях фаза потепления началась в конце 80-х годов. Однако на севере Приморья после 1995 г. она сменилась периодом похолодания. На побережье Татарского пролива прирост положительных аномалий температуры был ослаблен и усилился только после 2003 г. На большей части акватории прибрежной зоны тренд потепления вод устойчиво проявляется, главным образом, летом или осенью, а на ГМС Советская Гавань - во все сезоны года.

В межгодовом ходе аномалий солености во всех пунктах наблюдений, кроме ГМС Александровск-Сахалинский, выявлены однонаправленные тренды понижения солености. В среднем по району соленость уменьшалась со скоростью $0,04\text{ }‰$ в год, что составило $1,3\text{ }‰$ за исследуемый период. Величина значимого линейного тренда этих изменений возростала в направлении с севера на юг района от $-0,01$ до $-0,08\text{ }‰$ в год. На всех станциях с отрицательным трендом отчетливо выделяется фаза устойчивого распреснения вод во второй половине периода наблюдений. На этих ГМС отрицательные тренды стабильно наблюдались весной и летом, когда скорость уменьшения солености максимальна, а на трех из них (Холмск, Рудная Пристань, Владивосток) - во все сезоны года.

На всех пунктах наблюдений, расположенных в юго-восточной части Татарского пролива и на юге Приморья, наблюдался устойчивый положительный тренд межгодовых изменений уровня моря. Величина значимого линейного тренда возростала с юга на север от $1,2$ до $3,0\text{ мм}/\text{год}$. В среднем уровень моря за последние 36 лет увеличился примерно на 7 см , что составляет $35\text{--}50\text{ }%$ диапазона сезонных колебаний. Выделены две фазы этого процесса. На второй фазе периода наблюдений, после 2000 г., скорость подъема уровня возросла в 2-5 раз по сравнению с предшествующей. Тренд значим во все сезоны года, однако весной скорость подъема уровня моря, как правило, выше.

Выявленные особенности динамики и тенденции изменения гидрологических характеристик являются следствием происходящих естественных и антропогенных изменений климатических условий и циркуляционных факторов в северной части Японского моря.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алисимчик Н.Г. Оценка однородности многолетних рядов температуры морской воды на примере МГ-2 Сосуново // ДВНИГМИ – 65 лет: юбилейный выпуск. Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 225–237.
2. Андреев А.Г. Межгодовые изменения параметров морской воды и концентрации хлорофилла а в Японском море в осенний период // Метеорология и гидрология. 2014. № 8. С. 55-65.
3. Белоненко Т.В., Колдунов В.В., Старицын Д.К. и др. Изменчивость уровня северо-западной части Тихого океана. СПб: СММО Пресс, 2009. 309 с.
4. Ванин Н.С. Аномальные термические условия северо-западной части Японского моря осенью 2003 г. // Изв. ТИНРО. 2004. Т. 138. С. 345–354.
5. Василевская Л.Н., Шкаберда О.А., Ламаш Б.Е., Платонова В.А., Кукаренко Е.А. Особенности долгопериодной изменчивости температуры, осадков и сроков наступления второй стадии летнего муссона в районе залива Петра Великого // Вестн. ДВО РАН. 2013. № 6. С. 71–82.
6. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / науч. рук. В.М. Катцов, С.М. Семенов. М.: Росгидромет, 2014. 1005 с.
7. Гайко Л.А. Многолетняя изменчивость температуры воды и воздуха у российского побережья Японского моря по данным гидрометеорологических станций / Океанологические исследования дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана. Кн. 1. Владивосток: Дальнаука, 2013. С. 64–78.
8. Гайко Л.А. Особенности гидрометеорологического режима прибрежной зоны залива Петра Великого. Владивосток: Дальнаука, 2005. 151 с.
9. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны Японского моря. Владивосток, 1976. 794 с. (Тр. ДВНИГМИ; вып. 027)
10. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 8. Японское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 2003. 399 с.
11. Гирс А.А. Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 488 с.
12. Глебова С.Ю., Устинова Е.И., Сорокин Ю.Д. Долгопериодные тенденции в ходе атмосферных процессов и термического режима дальневосточных морей за последний 30-летний период // Изв. ТИНРО. 2009. Т. 159. С. 285–298.
13. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2014 г. М.: Росгидромет, 2015. 107 с.
14. Дьяков Б.С. Крупномасштабные колебания в системе океан–атмосфера и перспективы сверхдолгосрочного прогноза температуры воды Японского моря // Изв. ТИНРО. 2011. Т. 165. С. 231–250.

15. Зуенко Ю.И. Влияние изменений климата на океанологический режим и экосистему Японского моря: дисс. ... д-ра. геогр. наук / ТИНРО. СПб., 2009. 241 с.
16. Карпова И.П., Шатилина Т.А. Долгопериодная изменчивость температуры воды и воздуха у юго-западного побережья Сахалина // Изв. ТИНРО. 2000. Т. 127. С. 50–60.
17. Колдунов В.В., Старицын Д.К., Фукс В.Р. Изменчивость уровня Японского и Охотского морей по данным спутниковых альтиметрических измерений / Дальневосточные моря России. Книга 1. Океанологические исследования. М.: Наука, 2007. С. 184–231.
18. Лучин В.А., Кислова С.И., Круц А.А. Тенденции долгопериодных изменений в водах залива Петра Великого / Динамика морских экосистем и современные проблемы сохранения биологического потенциала морей России. Владивосток : Дальнаука, 2007. С. 33–50.
19. Лучин В.А., Тихомирова Е.А. Межгодовая изменчивость температуры воды в заливе Петра Великого (Японское море) // Изв. ТИНРО. 2010. Т. 163. С. 338–348.
20. Островский А.Г., Фукудоме К., Юн Дж.-Х., Такикава Т. Изменчивость водообмена через Корейский (Цусимский) пролив по данным измерений судовым акустическим доплеровским профилографом течений в 1997-2007 гг. // Океанология. 2009. Том 49, № 3. С. 368-380.
21. Плотников В.В., Мезенцева Л.И., Дубина В.А. Циркуляция атмосферы над Дальним Востоком и ее отражение в ледовых условиях. Владивосток: Дальнаука, 2015. 160 с.
22. Пономарев В.И., Дмитриева Е.В., Шкорба С.П. Особенности климатических режимов в северной части Азиатско-Тихоокеанского региона // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС. 2015. Вып. 1 (21). С.67-72.
23. Пономарев В.И., Дмитриева Е.В., Шкорба С.П., Савельева Н.И. Взаимосвязанные климатические аномалии в Тихом океане и дальневосточных морях / Океанологические исследования дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана. Кн. 1. Владивосток: Дальнаука, 2013. С. 13–36.
24. Рогачев К.А., Шлык Н.В. Формирование Приморского прибрежного течения под действием стока пресной воды // Вестн. ДВО РАН. 2015. № 6. С. 41-48.
25. Степанов Д.В. Климатическая изменчивость циркуляции вод Японского моря во второй половине XX века // Вестн. ДВО РАН. 2015. № 6. С. 29-40.
26. Шатилина Т.А., Цициашвили Г.Ш., Радченкова Т.В. Оценка тенденций изменчивости центров действия атмосферы над Азиатско-Тихоокеанским регионом в летние периоды 1950–1979 и 1980–2012 гг. // Метеорология и гидрология. 2016. № 1. С. 17–28.
27. Шевченко Г.В., Седаева О.С., Романов А.А., Вилянская Е.А. Сезонные колебания уровня моря в Татарском проливе по данным

спутниковой альтиметрии // Исследование Земли из космоса. 2007. № 3. С. 59–72.

28. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.

29. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. NY: Cambridge: Univ. Press, 2013. 1535 p.

30. Luchin, V., A. Kruts, O. Sokolov, V. Rostov, N. Rudykh, T. Perunova, E. Zolotukhin, V. Pischalnik, L. Romeiko, V. Hramushin, V. Shustin, Y. Udens, O. Baranova, I. Smolyar, E. Yarosh. Climatic Atlas of the North Pacific Seas 2009: Bering Sea, Sea of Okhotsk, and Sea of Japan. V. Akulichev, Yu. Volkov, V. Sapozhnikov, S. Levitus, Eds., NOAA Atlas NESDIS 67, U.S. Gov. Printing Office, Wash., D.C., 2009. 329 pp., DVD Disc.

31. Marcos M., Tsimplis M.N., Calafat F.M. Inter-annual and decadal sea level variations in the north-western Pacific marginal seas // Progr. Oceanogr. 2012. V. 105. P. 4-21.

32. Oh I.S., Rabinovich A.B., Park M.S., Mansurov R.N. Seasonal sea level Oscillations in the East Sea (Sea of Japan) // J. Oceanol. Soc. Kor. 1993. Vol. 28, N 1. P. 1–16.

33. Ponomarev V., Rudykh N., Dmitrieva E., Ishida H. Variability of surface water properties in the Japan/East Sea on different time scales // Ocean and Polar Research. June 2009. V. 31, N.2. P.177-187.

34. Yoon J.-H., Kim, Y.-J. Review on the seasonal variation of the surface circulation in the Japan/East Sea // J. Mar. Sys. 2009. V. 78. N. 2. P. 226-236.