

Научная статья

УДК 551.463.6:551.5

DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-187-207



МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ МОРЕЙ И СЗТО И ИХ СВЯЗЬ С КРУПНОМАСШТАБНЫМИ КЛИМАТИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Г.В. Хен, Е.И. Устинова, Ю.Д. Сорокин*Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИНРО),
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4

Аннотация. Исследованы закономерности многолетних изменений температуры поверхности океана (ТПО) в дальневосточных морях и северо-западной части Тихого океана (СЗТО) в 1950–2019 гг. Во все сезоны года температура воды повышалась, при этом зимой и осенью тренды выражены наиболее ярко, а летом они менее показательны. Проведен анализ связей между ТПО трех дальневосточных морей России и СЗТО и 8 основными для северной части Тихого океана климатическими индексами: АО, Nino 3.4, PDO, ALPI, NPI, PNA, SHI, WP. В Беринговом море резкий скачок ТПО произошел в 1977 г., он совпал с резким изменением во временном ходе индексов PDO, ALPI, NPI и PNA. В Охотском море такой скачок пришелся на 1981 г., в Японском море — на 1990 г., через год после резких перепадов в ходе АО, PDO и PNA. В 2008 и 2018 гг. наблюдались небольшие скачки температуры в СЗТО. Основной вклад в изменчивость температуры Берингова моря во все сезоны вносит PDO. Зимой и весной заметную роль играют ALPI и PNA. Для Охотского моря основное значение имеет АО, для Японского — АО, SHI и WP. В СЗТО во все сезоны значимые связи между ТПО и индексами не наблюдаются. По вкладу в изменчивость ТПО в отдельных районах дальневосточного бассейна индексы можно разделить на две категории: западные и восточные. К первой относятся АО, SHI и WP, которые воздействуют на западную часть бассейна, условно ограниченную долготой Камчатки. К основным индексам восточной части относятся PDO, PNA и ALPI.

Ключевые слова: дальневосточные моря России, СЗТО, климатические индексы, ТПО, климатические сдвиги, связи.

Для цитирования: Хен Г.В., Устинова Е.И., Сорокин Ю.Д. Многолетние изменения термических условий на поверхности дальневосточных морей и СЗТО и их связь с крупномасштабными климатическими процессами // Изв. ТИНРО. — 2020. — Т. 202, вып. 1. — С. 187–207. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-187-207.

* Хен Геннадий Васильевич, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, gennady.khen@tinro-center.ru, ORCID 0000-0003-3966-6208; Устинова Елена Ивановна, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, elena.ustinova@tinro-center.ru, ORCID 0000-0002-2322-8505; Сорокин Юрий Дмитриевич, ведущий специалист, yuriy.sorokin@tinro-center.ru.

© Хен Г.В., Устинова Е.И., Сорокин Ю.Д., 2022

Long-term changes in thermal conditions on the surface of the Far-Eastern Seas and North-West Pacific and their relationship with large-scale climate processes

Gennady V. Khen*, Elena I. Ustinova**, Yuriy D. Sorokin***

*, **, *** Pacific branch of VNIRO (TINRO), 4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690091, Russia

* Ph.D., leading researcher, gennady.khen@tinro-center.ru

** Ph.D., leading researcher, elena.ustinova@tinro-center.ru

*** leading specialist, yuriy.sorokin@tinro-center.ru

Abstract. Previously published results of the study [Khen et al., 2019b] are continued. Long-term changes of the sea surface temperature (SST) in the Far-Eastern Seas and North-West Pacific (NWP) are described for 1950–2019 and their relationship with large-scale climate processes described by climatic indices (AO, Nino 3.4, PDO, ALPI, NPI, PNA, SHI, and WP) is analyzed. SST has increased in all seasons, with higher rate in winter and autumn and less significant trend in summer. A prominent shift to warmer regime occurred in the Bering Sea in 1977 that coincided with a sharp change in dynamics of PDO, ALPI, NPI, and PNA indices. Such shifts were observed in the Okhotsk Sea in 1981 and in the Japan Sea in 1990, one year after the shifts in the time-series of AO, PDO, and PNA indices. Smaller shifts to warming happened in NWP in 2008 and 2018. Pacific Decadal Oscillation is the main contributor to temperature variability in the Bering Sea in all seasons, though the contribution of ALPI and PNA variation is considerable in winter and spring. Arctic Oscillation is the most important for the Okhotsk Sea. Variations of AO, SHI and WP are significant for the SST variability in the Japan Sea. Any single climatic index does not determine the SST variability in NWP, in all seasons. The set of climatic indices can be divided into two categories: western and eastern ones, according to their contribution to SST variability in certain regions. The western group includes AO, SHI, and WP, which contribute mostly to the variations in the western regions, westward from the longitude of Kamchatka. The most important indices in the eastern group are PDO, PNA and ALPI.

Keywords: Far-Eastern Seas, North-West Pacific, climate index, SST, climate shift, atmosphere-ocean relationship.

For citation: Khen G.V., Ustinova E.I., Sorokin Yu.D. Long-term changes in thermal conditions on the surface of the Far-Eastern Seas and North-West Pacific and their relationship with large-scale climate processes, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2022, vol. 202, no. 1, pp. 187–207. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-187-207.

Введение

Многолетние изменения термических условий в дальневосточных морях и северо-западной части Тихого океана (СЗТО) рассмотрены во многих публикациях [например, Nakanowatari et al., 2007; Хен и Сорокин, 2008; Лобанов и др., 2014; Ростов и др., 2020; и др.]. Главный вывод — потепление со второй половины XX столетия — никем не подвергается сомнению. Однако не все так однозначно. В отдельных областях (например, в СЗТО и Японском море) температура на поверхности океана (ТПО) во второй половине XX столетия понижалась [Пономарев и др., 2005], в частности в зимние месяцы [Хен и др., 2008]. Но в последние три десятилетия и в этих областях, как и в Беринговом и Охотском морях, наблюдается заметный рост ТПО [Шатилина и др., 2016; Хен и др., 2020].

В настоящее время для выяснения происходящих изменений ТПО в северной части Тихого океана (СТО) и прогнозирования определенных параметров морской среды большое внимание уделяется климатическим индексам [Хен и Сорокин, 2008; Yeh et al., 2011; Miyasaka et al., 2014; Кровнин и др., 2018; Ростов и др., 2018; и др.], характеризующим состояние крупномасштабных процессов в атмосфере и гидросфере, и закономерностям их многолетних изменений. Однако обычно рассматривается ограниченный набор индексов, а сравнения проводятся в основном на качественном уровне, без глубокого анализа полученных связей.

В данной статье мы проведем статистический анализ связей между ТПО трех дальневосточных морей России, а также СЗТО, являющихся основными районами отечественного морского промысла, и 8 основными климатическими индексами СТО: АО (Арктическая осцилляция), Nino 3.4 (Эль-Ниньо), PDO (Тихоокеанская декадная осцилляция), ALPI (индекс Алеутского минимума), NPI (Северо-Тихоокеанский индекс), PNA (Тихоокеанский/Североамериканский индекс), SHI (индекс Сибирского антициклона), WP (Западно-Тихоокеанский индекс). Выбор индексов, их история, природа и методы расчета, а также результаты анализа их временных рядов для выявления закономерностей изменений и оценки взаимосвязи между ними были рассмотрены нами в предыдущих работах [Хен и др., 2019а, б]. Учитывая размеры дальневосточных морей и СЗТО, а также физическое и биологическое разнообразие отдельных их частей, выделим 11 локальных районов, оценим параметры статистической связи ТПО в них с различными климатическими индексами. На основе выполненного анализа определим наиболее значимые индексы для каждого из выбранных районов, что позволит в дальнейшем более обоснованно подойти к выбору существенных климатических факторов в океанологических, биологических и даже экосистемных исследованиях.

Материалы и методы

Для характеристики термического состояния поверхностных вод дальневосточных морей России и СЗТО исходные данные о ТПО выбирались из баз данных Японского метеорологического агентства (JMA), доступ к которым предоставлен в рамках международного проекта NEAR-GOOS через сайт <https://ds.data.jma.go.jp/gmd/goos/data/database.html>. При этом были использованы 3 типа данных с разным пространственным разрешением:

1. «COBE-SST» (среднемесячная температура для периода с 1950 по 2019 г.; разрешение $1 \times 1^\circ$; анализ на основе данных *in situ* по методу Ишии с соавторами [Ishii et al., 2005]);

2. «MGDSST» (среднедекадная температура для периода с 1982 по июнь 2017 г.; разрешение $0,25 \times 0,25^\circ$; анализ на основе спутниковых данных и данных *in situ* по методу, предложенному Курихара с соавторами [Kurihara et al., 2006]);

3. «HIMSST» (среднедекадная температура для периода с июля 2017 по 2019 г.; разрешение $0,1 \times 0,1^\circ$; анализ на основе спутниковых данных высокого разрешения, полученных с датчика геостационарного спутника Himawari-8/AHI, с инфракрасных датчиков полярно-орбитальных спутников NOAA/AVHRR, MetOp/AVHRR, с микроволновых датчиков Coriolis/WINDSAT, GCOM-W1/AMSR-2 и на основе данных *in situ*).

Их сравнение показало, что наилучшей для дальневосточных морей является база данных «MGDSST» и ее продолжение «HIMSST» [Устинова, Сорокин, 2013]. Однако они охватывают только последние 4 десятилетия, а также ограничены долготой 180° и не учитывают восточную часть Берингова моря. Поэтому для нашего исследования в качестве основного источника данных о ТПО была принята база «COBE-SST» с 1950 г., не включающая спутниковые данные. «MGDSST» и «HIMSST» использовались для сравнения и контроля полученных результатов.

Были рассмотрены термические условия в каждом море в целом, а также в отдельных районах дальневосточных морей и СЗТО (рис. 1). Описание наиболее важных климатических индексов для северной части Тихого океана и дальневосточных морей, а также источники их многолетних данных подробно рассмотрены нами в предыдущих сообщениях [Хен и др., 2019б].

Для оценки трендов, корреляционных связей, коэффициентов детерминации и индексов сдвига режима использовался уровень статистической значимости не менее 95 %, как это обычно применяется в гидрометеорологии. Для расчета статистических оценок изменчивости и характеристик взаимосвязей применялся пакет «Статистика», а также оригинальные авторские программы, созданные Ю.Д. Сорокиным. Анализ

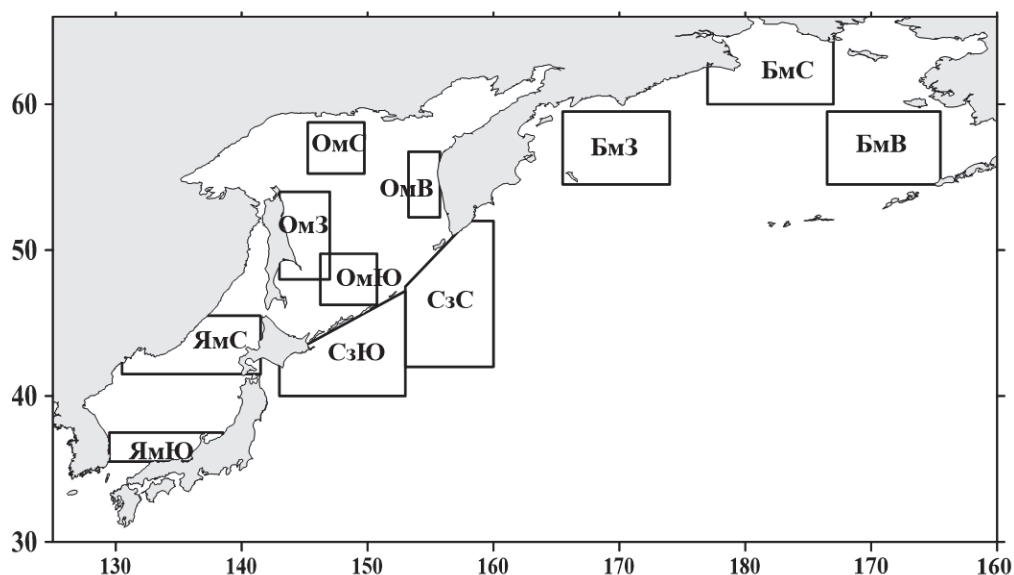


Рис. 1. Выделенные районы дальневосточных морей и СЗТО: Бм, Ом, Ям — Берингово, Охотское и Японское моря; Сз — СЗТО; С, В, Ю, З — север, восток, юг и запад

Fig. 1. Scheme of considered regions and areas: Бм, Ом, Ям — Bering, Okhotsk and Japan Seas; Сз — North-West Pacific; С, В, Ю, З — northern, eastern, southern, and western areas, respectively

взаимосвязи рассматриваемых параметров поводился с использованием аппарата корреляционного и регрессионного анализа [Бендат, Пирсол, 1989; Смирнов и др., 1992]. Влияние крупномасштабных климатических процессов на изменения ТПО анализировалось на основе вклада каждого климатического индекса в общую дисперсию с учетом физических основ климатических индексов, приведенных нами ранее [Хен и др., 2019а, б]. Вклад оценивался как доля объясненной дисперсии, выраженная в процентах.

Как и в предыдущей работе [Хен и др., 2019а], для оценки возможных сдвигов климатического режима (резких переходов от одного режима к другому) в рядах температуры поверхностных вод мы использовали метод С.Н. Родионова [Rodionov, 2004, 2006] и рассчитали предложенный им индекс сдвига режима (regime shift index, RSI).

Результаты и их обсуждение

Многолетняя изменчивость поверхностной температуры в дальневосточных морях и СЗТО

В рассматриваемый нами период (1950–2019 гг.) многолетние изменения ТПО во всех дальневосточных морях России протекали по сходному сценарию (рис. 2, А–В). Во все сезоны года температура воды повышалась, при этом зимой и осенью тренды выражены наиболее ярко, а летом — наименее. В Охотском и Беринговом морях коэффициенты детерминации ($R^2 > 0,5$) указывают на их максимальную вероятность, тогда как в Японском море она заметно слабее ($R^2 = 0,3–0,4$). Закономерности многолетней изменчивости в СЗТО (рис. 2, Г) сильно отличаются от морских. Линейный тренд практически отсутствует, во все сезоны $R^2 < 0,1$, т.е. вероятность многолетнего потепления здесь незначима, что согласуется с результатами исследований Т.А. Шатиловой с соавторами [2016] для временного ряда 1950–2014 гг. в 5 районах СЗТО. В ряде исследований [Пономарев и др., 2005; Хен, Сорокин, 2008] даже показано похолодание во второй половине XX столетия. Однако в последние десятилетия произошла смена тренда в сторону потепления [Шатилина и др., 2016].

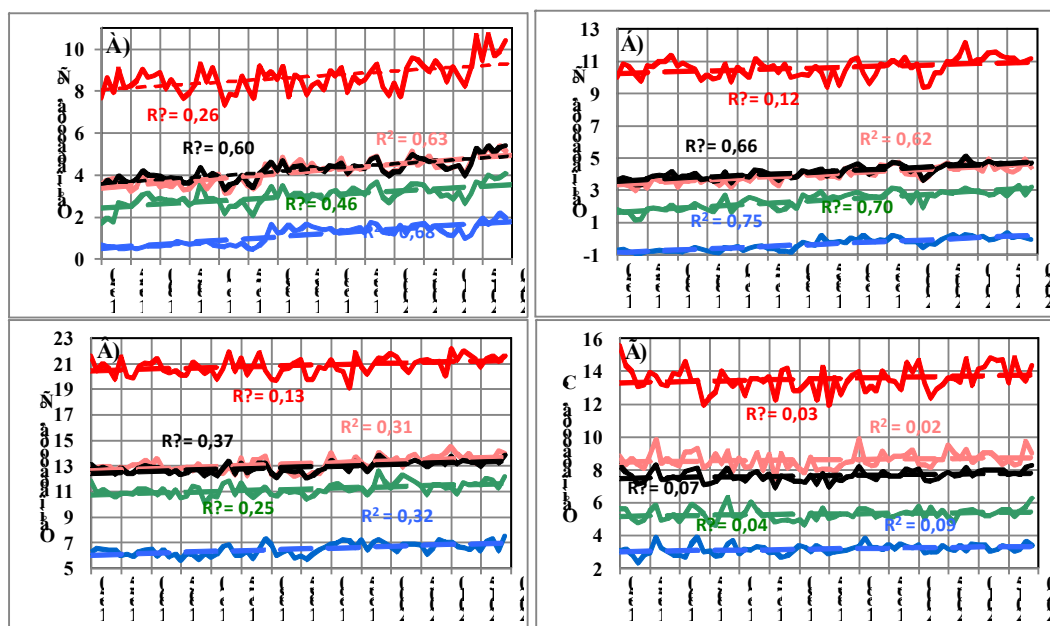


Рис. 2. Многолетние изменения температуры воды на поверхности дальневосточных морей и СЗТО: А — Берингово море; Б — Охотское море; В — Японское море; Г — СЗТО; синий — зимой; зеленый — весной; красный — летом; коричневый — осенью; черный — среднегодовой; штриховые линии — тренды

Fig. 2. Long-term changes of SST, by regions and seasons: А — Bering Sea; Б — Okhotsk Sea; В — Japan Sea; Г — North-West Pacific; blue — winter; green — spring; red — summer; brown — autumn; black — annual; linear trends are shown by dashed lines

Известно [IPCC, 2007], что скорости и масштабы потепления от Арктики к тропикам заметно уменьшаются. По расчетам Т.Р. Кильматова с соавторами [2012] темп роста средней зимней температуры в субарктике в 5 раз выше, чем в субтропиках. Данные береговых станций в Охотском, Японском и Южно-Китайском морях в зимние месяцы 1978–2017 гг., согласно которым трендовое потепление оценивается соответственно как 0,96, 0,40 и 0,21 °C/10 лет [Ростов и др., 2020], подтверждают эти результаты. Поэтому представляется закономерным, что расположенные в высоких широтах Берингово и Охотское моря более чувствительны к глобальному потеплению, чем Японское море, южная часть которого относится к субтропической зоне.

Считается [Хен, Сорокин 2008], что в дальневосточных морях знаки термических аномалий зимне-весенних сезонов сохраняются в течение остального года. Так, за холодными зимне-весенними сезонами последуют холодные лето и осень и, соответственно, год в целом будет аномально холодным. Последние исследования подтвердили данные выводы, по крайней мере для Берингова моря [Baker et al., 2020].

О наличии преобладности сезонов можно судить по данным табл. 1, где представлены коэффициенты корреляции (R) между сезонными температурами с учетом и без учета трендовой составляющей. После удаления линейного тренда во всех трех морях R заметно уменьшается, но остается на уровне значимых величин ($R = 0,30–0,55$). Это не касается СЗТО, где, как было отмечено выше, линейный тренд практически отсутствует. Уменьшение корреляции между зимой и летом до уровня ниже значимого ($R < 0,3$) вполне объяснимо, учитывая максимальное влияние солнечной инсоляции и облачности именно в летние месяцы. В осенние месяцы, когда накопленное летом тепло из верхнего слоя в процессе турбулентного обмена переходит в атмосферу, поверхность быстро охлаждается до температуры подповерхностных вод, где сохраняются зимние термические условия. Коэффициент корреляции между зимней и осенней ТПО находится на уровне значимых величин. Можно было бы ожидать различия уровней

связей между годовой и сезонными температурами, в особенности летними. Однако, как показывают данные табл. 1, во всех случаях разброс коэффициентов корреляции небольшой, за исключением зимы без линейного тренда. Несомненно, что весна, лето и осень практически в одинаковой степени влияют на формирование годовой температуры, роль зимы заметно ниже.

Таблица 1

Корреляция между сезонными и среднегодовой температурами
в дальневосточных морях и ЦЗТО

Table 1

Correlation between seasonal and annual SST in the Far-Eastern Seas and North-West Pacific

		Зима	Весна	Лето	Осень	Год
Берингово море	Зима	1	0,76/0,47	0,49/0,12	0,86/0,59	0,84/0,57
	Весна		1	0,76/0,65	0,77/0,53	0,92/0,84
	Лето			1	0,70/0,55	0,86/0,85
	Осень				1	0,93/0,82
	Год					1
Охотское море	Зима	1	0,88/0,58	0,40/0,18	0,79/0,31	0,88/0,56
	Весна		1	0,42/0,23	0,80/0,41	0,90/0,67
	Лето			1	0,51/0,42	0,72/0,81
	Осень				1	0,90/0,73
	Год					1
Японское море	Зима	1	0,65/0,53	0,25/0,05	0,50/0,29	0,71/0,58
	Весна		1	0,54/0,44	0,53/0,37	0,84/0,78
	Лето			1	0,60/0,51	0,80/0,76
	Осень				1	0,84/0,76
	Год					1
ЦЗТО	Зима	1	0,50/0,48	-0,04/-0,09	0,25/0,23	0,43/0,38
	Весна		1	0,32/0,31	0,35/0,35	0,69/0,69
	Лето			1	0,39/0,39	0,78/0,78
	Осень				1	0,74/0,75
	Год					1

Примечание. В числителе — с учетом линейного тренда; в знаменателе — без учета линейного тренда.

В расположенном на стыке умеренного и субтропического климатических поясов Японском море преобладает сезонность сезонов слабая ($R = 0,5-0,6$). Особенно низкая корреляция между зимой и летом (0,25), когда роль субтропических вод в этом море возрастает. Еще хуже сохраняются зимние условия в ЦЗТО со связями, характеризующимися коэффициентом корреляции, равным нулю (летом) и 0,25 (осенью). Только с соседним весенним сезоном в ЦЗТО $R = 0,5$, что также является наименьшей величиной по сравнению с морями. Это область наиболее активного взаимодействия океана и атмосферы, мощных холодных и теплых течений, интенсивного теплообмена поверхностных и глубинных слоев. Тем не менее и здесь на формирование годовой температуры заметное влияние оказывают весна, лето и осень, хотя между собой эти сезоны связаны слабо. Только зимние условия мало отражаются на этом показателе.

Климатические сдвиги в рядах средней годовой ТПО

Рис. 3 демонстрирует климатические «сдвиги» в средних годовых ТПО, выделенные по методу С.Н. Родионова [Rodionov, 2004, 2006]. В отличие от климатических индексов [Хен и др., 2019а], все скачки ТПО были положительными, т.е. в сторону потепления.

Стоит отметить, что перед положительными климатическими сдвигами обязательно происходят непродолжительные понижения ТПО, которые можно принять как стартовые позиции перед последующим потеплением. Перед последним сдвигом в 2018 г. в

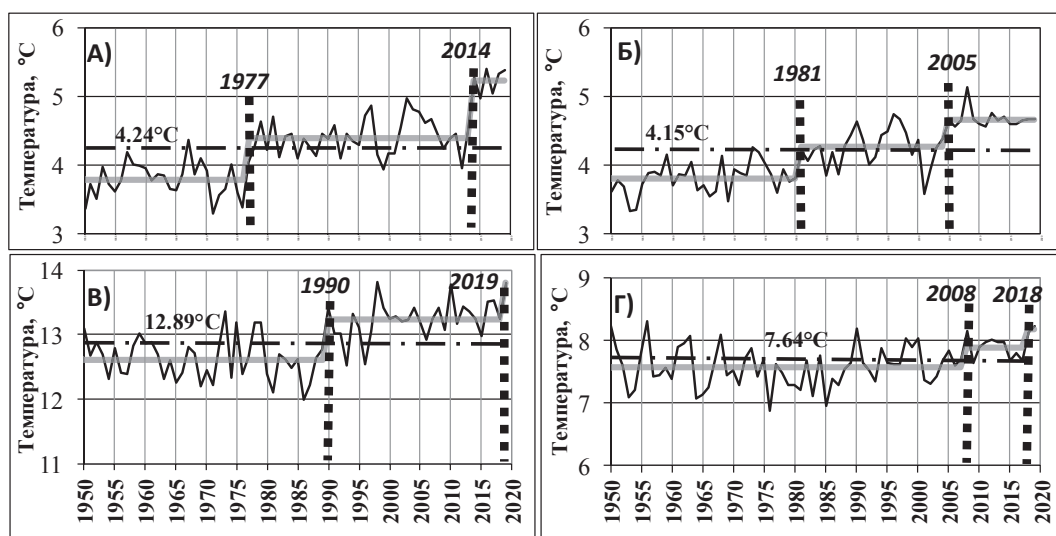


Рис. 3. Межгодовые изменения среднегодовых ТПО в дальневосточных морях (А — Берингово море; Б — Охотское море; В — Японское море) и СЗТО (Г). Ломаная сплошная линия — изменения ТПО; вертикальные прерывистые линии и цифры над ними показывают «климатические сдвиги» и годы их наступления; горизонтальные штрих-пунктирные линии — средние многолетние температуры за весь период; цифры над ними — их значения; серые линии — периоды без выраженного тренда

Fig. 3. Year-to-year variation of annual (January-December) SST in the Far-Eastern Seas (А — Bering Sea; Б — Okhotsk Sea; В — Japan Sea) and North-West Pacific (Г). The average values for the whole period of study are shown by horizontal dash-dotted lines and numbers above them; regime shifts are marked by vertical dashed lines with the years indicating; grey lines — periods without trend

СЗТО и 2019 г. в Японском море похолодание было малозаметным. Однако ему, как и предыдущим «сдвигам», предшествовал многолетний период без выраженного тренда, соответствующий «паузе в процессе глобального потепления» [Ростов и др., 2020]. Возможно, в дальнейшем по мере поступления новых данных (лет) этот скачок в сторону еще большего потепления сдвинется на более поздние сроки или совсем не проявится.

Ранее [Хен и др., 2019a] мы уже отмечали «сдвиг» режима в конце многолетнего ряда и в ходе климатических индексов с разбросом времени его наступления с 2015 по 2017 г., связанным с малым последующим периодом лет по сравнению с установленным нами параметром $l = 10$ лет при расчетах по методу С.Н. Родионова [Rodionov, 2004, 2006]. Мы предположили, что возможно совпадение сроков наступления «сдвигов» у различных индексов через 5–10 лет при дальнейшем продлении временных рядов. Данные по ТПО не исключают ложность последних «сдвигов» и более позднее резкое потепление. Но это только наше предположение, основанное на повторяемости некоторых закономерностей, в нашем случае небольшого, но заметного стартового похолодания перед скачком ТПО, которое тем не менее не является обязательным условием. Возможно, резкое потепление во второй половине прошедшего десятилетия действительно было. И можно не сомневаться в наступлении очередного потепления Берингова моря в 2014 г. (рис. 3, А), замеченного ранее другими исследователями [Bond et al., 2015; Peterson et al., 2016]. Оно продолжалось по крайней мере до 2018 г. [Басюк и Зуенко, 2019]. В других регионах потепление может проходить с некоторым запаздыванием. Так, в Чукотском море, тесно связанном с Беринговым, резкий сдвиг физических параметров произошел в 2017–2019 гг. [Baker et al., 2020].

На рис. 3 видно, что «сдвиги» в рассматриваемых регионах происходили в разные сроки, что связано с различием степени воздействия внешних факторов. Первый масштабный «сдвиг», случившийся в Беринговом море в 1977 г. (рис. 4, А), совпал

с резкими перепадами в многолетнем ходе PDO, ALPI, NPI и PNA (рис. 4, Б), т.е. во всех северотихоокеанских индексах [Хен и др., 2019а]. Несомненно, что в северотихоокеанском секторе Северного полушария во второй половине 1970-х гг. произошла быстрая смена комплекса атмосферных и океанических процессов. В Охотском море «сдвиг» запоздал на 4 года и пришелся на 1981 г. В атмосфере и в океане в этот год никаких резких перемен не наблюдалось (рис. 4, Б).

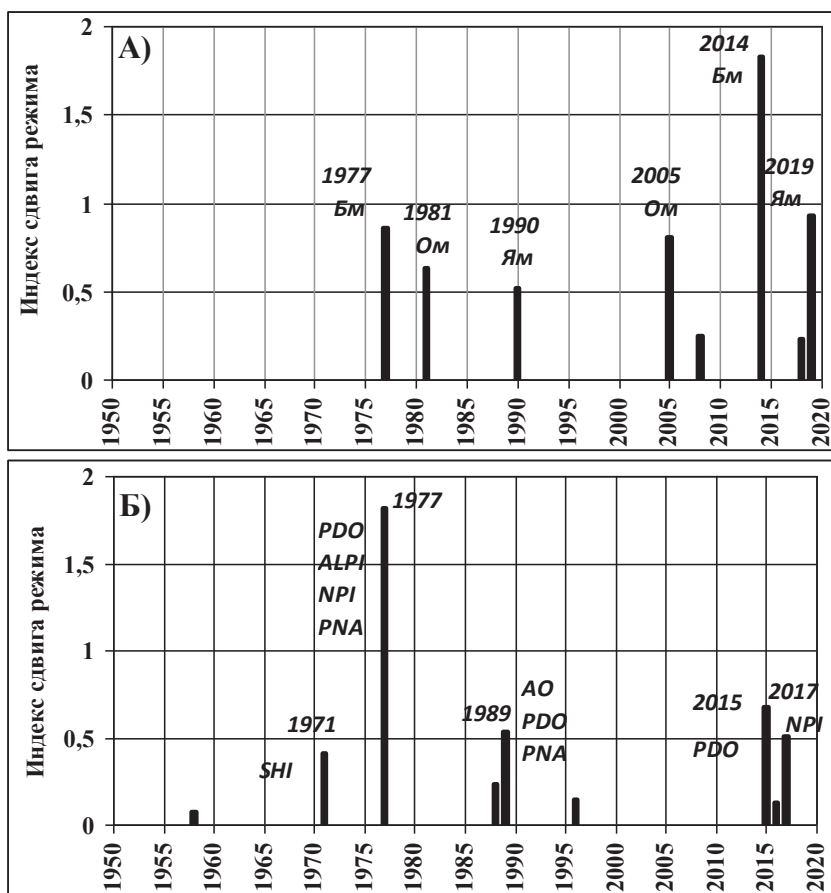


Рис. 4. Суммарные «сдвиги» режимов для дальневосточных морей (А) и зимних климатических индексов (Б). Условные обозначения как на рис. 1

Fig. 4. Aggregated regime shifts for the Far-Eastern Seas (А) and winter climatic indices (Б). See the regions and areas location at Fig. 1

В Японском море «сдвиг» термического режима пришелся на 1990 г., через год после резких перепадов в АО, PDO и PNA, описанных в предыдущем сообщении [Хен и др., 2019а]. Но их (индексов) суммарный «сдвиг», равный 0,6 RSI, заметно уступал событию в 1977 г. (1,8 RSI). Определяемый по методике С.Н. Родионова [Rodionov, 2004, 2006] основной вклад в суммарный «сдвиг» индексов в 1977 г. внес PDO (48 % суммарного RSI), вклад остальных индексов равномерно распределен в пределах 15–20 %. В 1989 г. основной вклад пришелся на индекс АО (68 %). Таким образом, «сдвиг» в Беринговом море был результатом событий в северной части Тихого океана, тогда как на Японское море основное влияние оказали резкие перемены АО, т.е. сильные изменения в атмосфере северных внетропических широт, приведшие к ослаблению зимних муссонов.

Во время очередного «сдвига» в Охотском море в 2005 г., как и в предыдущем случае (1981 г.), крупномасштабные климатические индексы резко не менялись. По всей видимости, изменения в Охотском море больше связаны с региональными процессами,

такими как охотский антициклон [Ильинский, 1959], дальневосточная депрессия [Шатилина, Анжина, 2006], приток тихоокеанских вод, внутренняя динамика вод и другими, которые в данной статье не рассматриваются. Нельзя исключить и их роль в затухании температурных аномалий в тихоокеанских водах, прилегающих к Охотскому морю.

Наиболее высокий уровень RSI (более 1,5) годовой температуры наблюдался в 2014 г. в Беринговом море, что на год раньше, чем у зимнего PDO. Однако по данным отдела климатических наблюдений Национального управления океанических и атмосферных исследований США [<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/GODAS/>] положительный скачок PDO начался еще в марте 2014 г., но не был замечен нами из-за расчета индекса только для зимних месяцев. Таким образом, можно не сомневаться, что сдвиги в океане и в море практически совпали. Эти события тесно связаны с аномальным развитием атмосферной циркуляции над северной частью Тихого океана зимой 2013/14 г. Они подробно описаны в предыдущем сообщении [Хен и др., 2019a].

Небольшие «сдвиги» температуры в СЗТО наблюдались в 2008 и 2018 гг., со значениями RSI около 0,2 на уровне «методического шума» (рис. 4, А, нет названия региона). К ним можно добавить малые RSI у климатических индексов, которые также остались без названий на рис. 4. Однако следует обратить внимание на «сдвиг» 2018 г. в северных областях. Например, отмечались сильное потепление в морях Восточной Арктики и экстремально низкая зимняя ледовитость в Беринговом море, что могло произойти из-за аномального смещения полярного вихря в сторону Гренландии и соответствующих изменений ветровых потоков [Overland, Wang, 2019; Baker et al., 2020]. Последний заметный «сдвиг» в Японском море в 2019 г. проявился в конце нашего ряда и не может вызывать доверия. Он будет подтвержден или опровергнут по истечении нескольких лет.

Связи температуры воды с годовыми климатическими индексами

Вначале рассмотрим связи среднегодовых аномалий температуры воды и индексов (табл. 2). Расчеты годовых индексов проводятся только для АО, Nino3.4, PDO, PNA и WP. Остальные индексы — сезонные и более показательны для холодного периода года с проявлением характерных для него барических образований.

Таблица 2

Корреляция между годовыми индексами и средней годовой ТПО
в дальневосточных морях и СЗТО

Table 2

Correlation between annual SST and climatic indices

	АО	Nino 3.4	PDO	PNA	WP
Берингово море	0,23	0,41	0,54	0,39	-0,23
Охотское море	0,34	0,10	0,15	0,16	-0,32
Японское море	0,28	-0,01	-0,07	0,12	0,08
СЗТО	0,20	-0,20	-0,30	-0,24	-0,09

Примечание. Здесь и далее выделены значимые коэффициенты корреляции при $p = 0,01$, подчеркнуты сильные связи.

Прямое сравнение температуры и индексов показывает важность двух крупномасштабных климатических процессов для рассматриваемого нами Дальневосточного региона. Изменения в северной части Тихого океана, хорошо выраженные в индексах PDO, оказывают прямое воздействие на ТПО Берингова моря ($R = 0,54$) и обратное — на СЗТО ($R = -0,30$). Отрицательный знак корреляции СЗТО обусловлен противофазностью между восточной и западной областями СТО [Хен и др., 2019б]. Берингово море тесно связано с восточной частью СТО, откуда через многочисленные проливы Алеутской гряды постоянно проникают океанические воды. Любые природные из-

менения в СТО в той или иной степени обязательно отражаются в Беринговом море, чему способствует направление основного течения (Аляскинского и его продолжения Алеутского) с востока на запад вдоль южной стороны Алеутских островов с многочисленными ответвлениями в Берингово море. Значимые связи обнаружены между ТПО Берингова моря и индексами Nino 3.4 (0,41) и PNA (0,39).

Для Охотского моря большое значение имеет АО ($R = 0,34$), отражающее планетарное взаимодействие между воздушными потоками умеренной и полярной областей Северного полушария [Мордвинов и др., 2009]. Сравнимую связь Охотское море имеет с индексом WP ($R = -0,32$). Обратный знак означает, что с ослаблением восточноазиатского струйного течения и смещением траекторий циклонов зимой к северу Охотское море заполняется холодными воздушными массами и наоборот.

Японское море также наиболее тесно связано с АО, но уровень связи низкий, $R = 0,28$. Рассматриваемые годовые климатические индексы не оказывают значительного влияния на изменчивость среднегодовой ТПО в этом море. Здесь более важными будут зимние климатические процессы, влияние которых затухает в среднегодовых температурах из-за сильной трансформации поверхности моря в теплое полугодие, когда большую роль играет приток субтропических вод.

Связи температуры воды с зимними климатическими индексами

В предыдущем сообщении [Хен и др., 2019а], где обсуждались изменения климатических индексов, мы отмечали, что зимние процессы более показательны, и этот сезон влияет на условия всего года. В зимний период взаимодействие океана и атмосферы интенсифицируется, что влияет на крупномасштабные циркуляционные процессы, которые вызывают значительные колебания климата. Можно провести объективное сравнение изменчивости зимних климатических индексов с изменчивостью термического состояния во все сезоны года. Годовые индексы годятся только для оценки термического состояния морей с годовым осреднением, а также при оценке сезонов следующего года.

Главные связи, замеченные для годовых индексов, повторяются и для зимних индексов. Так, основной вклад в изменчивость температуры Берингова моря во все сезоны вносит зимний индекс PDO (табл. 3), что было отмечено и при анализе среднегодовых значений. При этом коэффициент корреляции R , кроме лета, выше 0,5. Зимой и весной заметную роль играют ALPI и PNA, соответствующие процессам, максимально развитым в холодное полугодие. Для Охотского моря основное значение имеет колебание АО, за исключением лета, когда усиливаются региональные барические образования [Зуенко и др., 2019]. Зимой и весной усиливается роль PDO.

На зимние и весенние изменения в Японском море в равной степени влияют АО и SHI, тесно связанные между собой [Хен и др., 2019а], а также индекс WP, характеризующий состояние атмосферного струйного течения, направленного из Азии в сторону Японии [Хен и др., 2019б]. Даже при десятилетнем осреднении ТПО в Японском море тесно связана с АО и SHI [Jung et al., 2017]. Вклад WP в изменчивость ТПО значим также для осени и для среднегодовой температуры, т.е. колебание разности давлений между умеренной и субполярной зоной играет заметную роль в изменчивости ТПО Японского моря в течение всего года. Стоит отметить усиление роли Nino 3.4 зимой, тогда как в другие сезоны его вклад становится несущественным.

Особняком выглядит СЗТО — во все сезоны значимые связи ($R \geq 0,3$) между ТПО и индексами отсутствуют. Отмечаются хотя и слабые, но выраженные отрицательные связи ТПО в этом регионе с Nino 3.4, PDO, ALPI, PNA и WP, тогда как между этими индексами и ТПО морей России знак R устойчиво положительный. Такая особенность СЗТО связана с противофазностью термического состояния между восточной и западной частями СТО, хорошо проявляемой при разложении аномалий ТПО на главные компоненты [Mantua et al., 1997]. Как было выяснено ранее [Хен и др., 2019а], PDO

Таблица 3

Корреляция между зимними индексами и температурой воды
в дальневосточных морях и СЗТО

Table 3

Correlation between winter SST and climatic indices

		AO	Nino 3.4	PDO	ALPI	NPI	PNA	SHI	WP
Берингово море	Зима	0,25	0,18	0,60	0,31	-0,27	0,36	-0,34	0,26
	Весна	0,21	0,31	0,55	0,36	-0,30	0,40	-0,24	0,12
	Лето	0,08	0,26	0,34	0,22	-0,15	0,24	-0,05	0,09
	Осень	0,19	0,25	0,58	0,39	-0,34	0,42	-0,21	0,24
	Год	0,20	0,29	0,58	0,37	-0,29	0,40	-0,22	0,19
Охотское море	Зима	0,36	0,03	0,36	0,18	-0,10	0,29	-0,22	0,19
	Весна	0,41	0,04	0,32	0,19	-0,12	0,28	-0,36	0,09
	Лето	0,24	-0,07	0,00	0,00	0,07	0,08	0,05	-0,05
	Осень	0,37	0,05	0,23	0,17	-0,07	0,24	-0,28	0,11
	Год	0,40	0,01	0,25	0,15	-0,05	0,25	-0,23	0,09
Японское море	Зима	0,43	0,30	0,03	-0,03	0,08	0,07	-0,46	0,46
	Весна	0,39	0,19	0,09	0,00	0,01	0,13	-0,42	0,33
	Лето	0,05	0,03	0,11	0,06	0,02	0,17	0,02	0,27
	Осень	0,06	0,17	0,10	0,05	0,07	0,19	-0,13	0,35
	Год	0,27	0,20	0,11	0,03	0,05	0,18	-0,28	0,43
СЗТО	Зима	0,11	-0,02	-0,24	-0,06	0,14	-0,16	-0,24	-0,26
	Весна	0,26	-0,19	-0,26	-0,26	0,27	-0,22	-0,25	-0,23
	Лето	0,04	-0,17	-0,04	-0,05	0,05	0,00	0,18	-0,05
	Осень	0,02	-0,06	-0,14	-0,17	0,22	-0,12	0,06	-0,03
	Год	0,12	-0,18	-0,20	-0,17	0,21	-0,13	0,00	-0,16

образует прямые связи с Nino 3.4, ALPI, PNA и WP в соответствии с основными процессами взаимодействия в атмосфере и гидросфере СТО [Newman et al., 2016].

Стоит отметить, что указанные в настоящей работе оценки статистических связей отличаются от предыдущих результатов, полученных ранее двумя авторами данной работы [Хен, Сорокин, 2008]. Во-первых, ряд стал длиннее на 14 лет; во-вторых, произведена ревизия данных ТПО с 1982 г. [Kurihara et al., 2006]; в-третьих, произведено обновление климатических индексов с организацией в 2005 г. нового «отдела физических наук лаборатории исследования системы Земли» (ESRL) при Национальной администрации по изучению океана и атмосферы (NOAA, США). Мы не проводим оценку и сравнение двух результатов. Ясно, что и в дальнейшем, с развитием и модернизацией технологий получения данных, будут проводиться новые обновления.

При пятилетнем скользящем осреднении, т.е. фильтрации высокочастотных колебаний, статистические связи с климатическими индексами усиливаются для Берингова и Охотского морей (табл. 4), тогда как в двух других регионах остаются на уровне мало-значимых величин ($R < 0,3$). Наиболее заметные повышения связей ($R \geq 0,7$) отмечаются между ТПО Берингова моря и индексами PDO, ALPI и PNA, которые рассчитываются для районов, близких по географическому положению. В Охотском море усиливаются вклады АО, PDO и PNA, коэффициент корреляции возрастает до $R = 0,50-0,65$. Следует отметить усиление корреляции с индексом WP во всех регионах, за исключением СЗТО. Однако летом сглаживание не приводит к заметному изменению уровней связей, они так и остаются незначимыми. Как известно, WP в значительной степени отражает состояние дальневосточной высотной ложбины [Ueno, 1993], которая во многом «дирижирует» основными процессами теплообмена системы океан–атмосфера в этом регионе в холодный период года. При фильтрации высокочастотных колебаний, характерных для региональных процессов, влияние крупномасштабной дальневосточной высотной ложбины проявляется более ярко.

Таблица 4

Корреляция между зимними индексами и температурой воды
в дальневосточных морях и СЗТО при 5-летнем скользящем осреднении

Table 4

Correlation between winter SST and climatic indices smoothed by running 5-year averaging

		АО	Nino 3.4	PDO	ALPI	NPI	PNA	SHI	WP
Берингово море	Зима	0,47	0,45	0,81	0,74	-0,56	0,82	-0,46	0,65
	Весна	0,31	0,58	0,70	0,62	-0,42	0,70	-0,30	0,41
	Лето	0,18	0,34	0,35	0,21	0,00	0,36	0,00	-0,05
	Осень	0,45	0,43	0,76	0,68	-0,49	0,77	-0,37	0,69
	Год	0,40	0,49	0,72	0,64	-0,41	0,74	-0,32	0,62
Охотское море	Зима	0,59	0,26	0,54	0,46	-0,22	0,65	-0,43	0,67
	Весна	0,54	0,24	0,56	0,49	-0,27	0,65	-0,53	0,59
	Лето	0,17	-0,15	-0,12	-0,20	0,37	0,04	0,10	-0,05
	Осень	0,56	0,23	0,45	0,42	-0,17	0,60	-0,45	0,59
	Год	0,53	0,16	0,40	0,34	-0,08	0,55	-0,37	0,58
Японское море	Зима	0,64	0,23	0,19	0,20	-0,02	0,37	-0,49	0,68
	Весна	0,47	0,01	0,20	0,23	-0,10	0,42	-0,46	0,58
	Лето	0,15	-0,26	0,09	0,14	0,03	0,35	-0,16	-0,05
	Осень	0,25	-0,05	-0,03	0,04	0,21	0,26	-0,10	0,54
	Год	0,41	-0,02	0,12	0,16	0,05	0,38	-0,32	0,63
СЗТО	Зима	0,45	0,23	0,07	0,11	0,07	0,21	-0,40	0,20
	Весна	0,28	-0,20	-0,25	-0,29	0,38	-0,07	-0,21	0,10
	Лето	0,09	-0,24	-0,12	-0,16	0,29	0,05	0,14	-0,05
	Осень	0,18	-0,07	-0,35	-0,31	0,53	-0,14	0,18	0,17
	Год	0,27	-0,16	-0,24	-0,25	0,46	0,00	0,01	0,31

*Связи температуры воды в отдельных районах
с зимними климатическими индексами*

Для отдельных районов (всего 11, см. рис. 1) оценивались связи с 6 индексами (рис. 5). При этом NPI и PNA не рассматривались, так как они тесно связаны с PDO и ALPI и вместе составляют северо-тихоокеанский комплекс индексов [Хен и др., 2019a]. Следует ожидать, что уровни связей между зимними индексами и ТПО отдельных районов будут близки к рассмотренным выше значениям для морей в целом и СЗТО (см. табл. 3). Однако полного совпадения этих связей ожидать не следует, так как каждый из выбранных районов имеет свои локальные особенности, иногда сильно отличающиеся от таковых соседних участков моря, причем как по физическим, так и по биологическим параметрам. Причины различий могут быть как внешние (астрономические, атмосферные, граничные), так и внутренние (сезонные, динамические, гидрофизические). Мы же рассматриваем только определенный комплекс внешних влияний, выраженный различными климатическими индексами.

Все 4 района Охотского моря в течение двух сезонов связаны с АО, связи на уровне значимых величин ($R \geq 0,3$ при $p = 0,01$). Во всех районах связи значимы весной, тогда как второй сезон с такими связями меняется от района к району. Для всего моря значимые связи отмечались во все сезоны, кроме лета (табл. 3). Надо заметить, что значимые связи с АО весной наблюдались и в обоих районах Японского моря. Несомненно, эти два моря, расположенные на краю азиатского континента, испытывают сильное воздействие континентального климата, во многом определяемого одним из основных регуляторов в северном полушарии — АО. Зимой влияние АО проявляется только в районах, свободных от ледяных полей. В районах с устойчивым ледяным покровом ТПО принимается равной $-1,8^{\circ}\text{C}$, поэтому межгодовые изменения в них зимой слабые и могут не совпадать с изменениями открытых районов. Весной с таянием льдов тем-

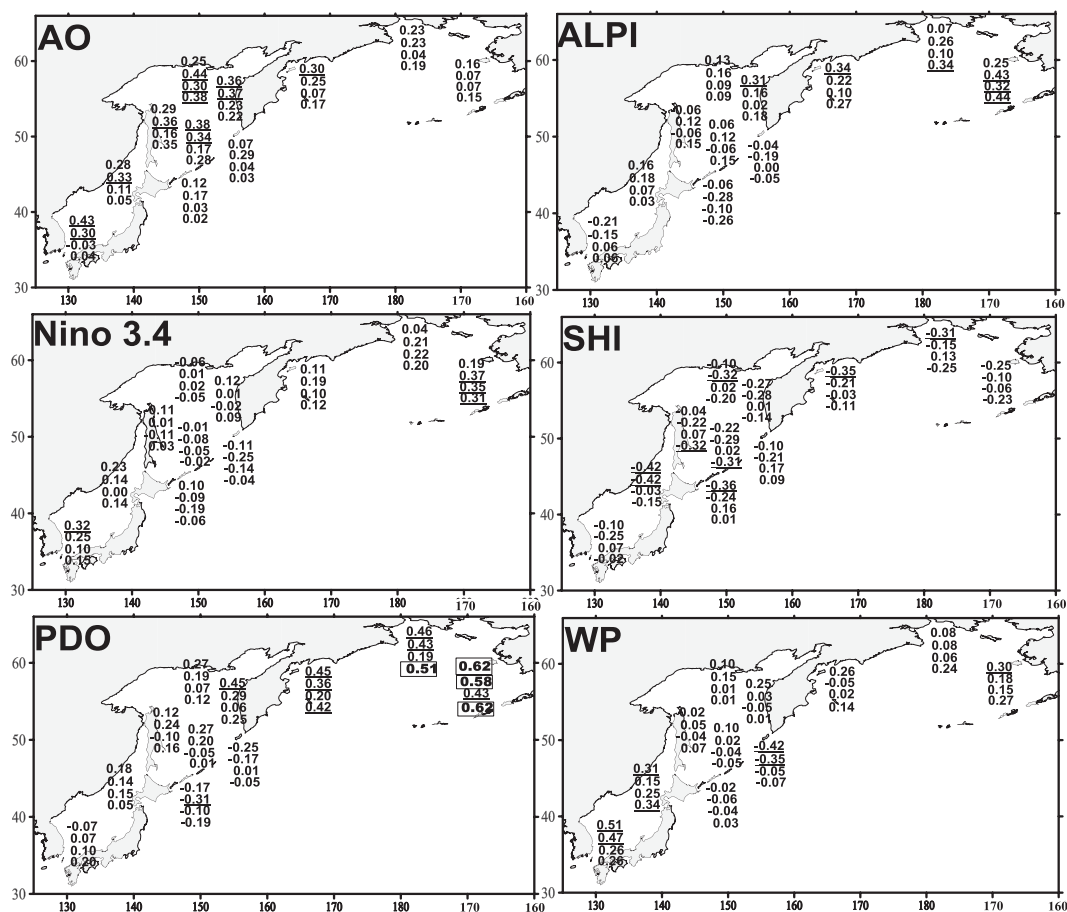


Рис. 5. Корреляции между зимними климатическими индексами и ТПО выделенных районов (см. рис. 1) по сезонам (сверху вниз: зима, весна, лето, осень). Подчеркнуты связи с $0,3 \leq R < 0,5$; прямоугольным контуром выделены связи $R \geq 0,5$ (при коэффициенте Пирсона $p = 0,01$)

Fig. 5. Correlation between winter climatic indices and SST in certain seasons (from top to bottom: winter, spring, summer, autumn). The values $0.3 \leq R < 0.5$ are underlined; the values $R \geq 0.5$ with Pearson's coefficient $p = 0.01$ are contoured

пература принимает значения, зависящие от погодных условий, т.е. континентальных атмосферных процессов, что приводит установлению значимой связи с АО.

Учитывая близость сибирского антициклона и его тесную связь с АО [Хен и др., 2019а], можно было ожидать повышенную роль SHI в формировании ТПО Охотского моря. Однако значимые связи на уровне $R = 0,30-0,35$ наблюдались по одному сезону в трех районах, причем на западе и юге осенью (скорее всего случайные), а на востоке во все сезоны они были незначимыми. Ожидание высокой связи с SHI оправдал только северный район Японского моря с $R = 0,42$ зимой и весной. Здесь свою роль сыграл ярко выраженный муссонный климат Японского моря с сильными северными ветрами в холодное полугодие.

PDO — один из самых популярных индексов, часто используемый океанологами и биологами в самых разнообразных случаях и вариантах. Его вклад в формирование ТПО действительно может быть основным, но для определенных районов, непосредственно контактирующих с Тихим океаном. Самым близким районом, постоянно подвергающимся прямому воздействию PDO через атмосферу или восточные проливы Алеутской гряды, является восточная часть Берингова моря. Уровень связи здесь самый высокий из всех районов и достигает $R = 0,62$ зимой и осенью (рис. 5), когда Алеутский

минимум наиболее развит, а приток тихоокеанских вод в Берингово море достигает годового максимума [Stabeno et al., 2016]. Даже летом, когда влияние Тихого океана заметно понижается, R остается на уровне значимой величины и составляет 0,43. С удалением от восточной части моря против часовой стрелки роль PDO ослабевает, но связи все еще превышают 0,3, а летом становятся незначимыми. В Охотском море значимая связь проявляется только на западной Камчатке в сезон наибольшей активности Алеутского минимума, т.е. зимой. Для остальных районов R значительно ниже 0,3, а летом и осенью не превышает 0,1, т.е. в эти сезоны связи незначимы.

Хорошо известна роль Алеутского минимума в переносе тепла из восточной части Тихого океана в Берингово море [Rodionov et al., 2007]. Не случайно ТПО восточной части Берингова моря значимо связана с ALPI, за исключением зимы, что стало неожиданностью. С другой стороны, в противоположной стороне Берингова моря и прилегающей части Охотского моря зимние коэффициенты корреляции превышают 0,3, тогда как в остальные сезоны они ниже этой пороговой величины. Надо полагать, что влияние Алеутского минимума на восточную часть Берингова моря происходит с сезонным запаздыванием, а на западе моря основную роль играют направления и скорости ветра в тыловой части зимней атмосферной депрессии.

В течение трех сезонов (за исключением зимы) связи между температурой воды на поверхности восточной части Берингова моря и Nino 3.4 на уровне значимых ($R = 0,31-0,34$). Влияние Nino 3.4 (Эль-Ниньо/Южного колебания (ENSO)), скорее всего, здесь опосредованное, через PDO, причем волны ENSO распространяются вдоль западного побережья Америки [Newman et al., 2016]. О проникновении волн ENSO на запад вдоль Северо-Пассатного течения можно судить по значимой связи зимой с ТПО южной части Японского моря. Вклад Nino 3.4 в изменчивости ТПО остальных районов дальневосточных морей и СЗТО статистически незначим.

Вклад еще одного индекса, WP, важен для обоих районов Японского моря и северной части СЗТО, причем везде обязательно зимой и дополнительно — весной или осенью. При этом с обоими районами Японского моря связи положительные, т.е. со смещением траекторий циклоном на север [Ueno, 1993] ТПО повышается, тогда как с северным районом СЗТО, расположенным практически в центре WP диполя, связи отрицательные. На другие районы WP не оказывает никакого влияния.

Все сказанное выше можно отобразить схематически в виде диаграммы связей (рис. 6). По вкладу в изменчивость ТПО индексы можно разбить на две категории: западные и восточные. К первой относятся АО, SHI и WP, которые воздействуют на западную часть дальневосточного бассейна, условно ограниченную долготой Камчатки. АО имеет большое значение для всех районов Охотского и Японского морей, причем ее влияние прямое: с усилением зонального потока в положительную фазу АО температура воды повышается, а с усилением меридиональных потоков (отрицательная фаза), наоборот, понижается. SHI также влияет на термическое состояние этих двух морей, но с обратным знаком, что обусловлено противоположностью его хода с АО [Хен и др., 2019а]. Прямой вклад WP в изменчивость ТПО ограничен двумя районами Японского моря; обратная связь отмечена для ТПО в районе ОмС.

Для Берингова моря, отнесенного к восточной части дальневосточного бассейна, изменения АО, SHI и WP не играют заметной роли. Для него наиболее важны изменения, происходящие в восточной категории индексов PDO, PNA и ALPI, а также в NPI и Nino 3.4, но в меньшей степени.

Следует отметить слабую связь ТПО обоих районов СЗТО с индексами, за исключением СзС с WP, о чем было сказано выше. Даже с PDO связь обнаруживается только для одного сезона в СзЮ. Такую особенность можно объяснить сильным влиянием на эту область двух мощных течений (теплого Кюросио и холодного Ойясио), которые вносят основной вклад в межгодовую изменчивость ТПО в регионе.

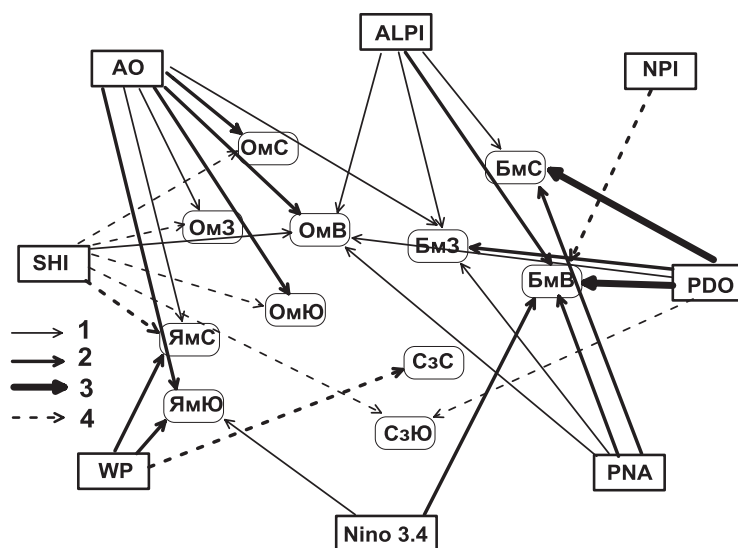


Рис. 6. Схема связей сезонных ТПО отдельных районов дальневосточных морей России и СЗТО (рис. 1) с зимними климатическими индексами: 1 — значимая ($R \geq 0,30$) связь в одном сезоне; 2 — значимая ($R \geq 0,30$) связь в двух и более сезонах; 3 — сильная ($R \geq 0,50$) связь хотя бы в одном сезоне; 4 — значимая обратная ($R \leq -0,30$) связь (тонкая штриховка — в одном сезоне, толстая — в двух сезонах)

Fig. 6. Scheme of relationships between winter climate indices and SST in certain regions and seasons: 1 — significant ($R \geq 0.30$) relationship in one season; 2 — significant ($R \geq 0.30$) relationship in two or more seasons; 3 — strong ($R \geq 0.50$) relationship at least in one season; 4 — significant inverse ($R \leq -0.30$) relationship (thin dashed line — in one season, thick dashed line — in two seasons)

Подводя итог, можем отметить, что при анализе влияния климатических индексов на гидрологию отдельных районов или биологию выбранных видов рыб и их популяции не следует слепо привлекать их только из-за того, что они сегодня стали достаточно доступными и имеют длинные ряды данных. Во всех случаях следует провести их тщательный анализ с учетом объективности привлечения того или иного индекса для конкретного района или объекта исследования.

Заключение

Были исследованы закономерности многолетних изменений ТПО в дальневосточных морях и СЗТО. Во все сезоны года температура воды повышалась, при этом зимой и осенью тренды выражены наиболее ярко, а летом они менее показательны. В Охотском и Беринговом морях коэффициенты детерминации ($R^2 > 0,5$) трендов имеют максимальные значения, тогда как в Японском море он заметно слабее ($R^2 = 0,3-0,4$). Закономерности многолетней изменчивости в СЗТО сильно отличаются от таковых морей. Линейный тренд практически отсутствует, во все сезоны $R^2 < 0,1$, т.е. вероятность многолетнего потепления здесь незначима.

Первый масштабный скачок ТПО в дальневосточном бассейне произошел в 1977 г. в Беринговом море. Он совпал с резкими перепадами в изменчивости PDO, ALPI, NPI и PNA. В Охотском море скачок ТПО запоздал на 4 года и пришелся на 1981 г. В атмосфере и в океане в этот год никаких резких перемен не наблюдалось. В Японском море скачок ТПО пришелся на 1990 г., через год после резких перепадов в АО, PDO и PNA. Скачок ТПО в Беринговом море был результатом событий в северной части Тихого океана, тогда как на Японское море основное влияние оказали резкие перемены в АО. В 2008 и 2018 гг. наблюдались небольшие скачки температуры в СЗТО.

Проведен анализ связей ТПО трех дальневосточных морей России, а также СЗТО, являющихся основными районами отечественного морского промысла, с 8 основными климатическими индексами СТО: АО, Nino 3.4, PDO, ALPI, NPI, PNA, SHI, WP.

Связи ТПО с годовыми и зимними индексами практически не различаются. Исключением является WP. При его годовом осреднении он значим для Охотского моря, а при зимнем — для Японского моря. Основной вклад в изменчивость температуры Берингова моря во все сезоны вносит PDO. При этом коэффициент корреляции R, кроме лета, выше 0,5. Зимой и весной заметную роль играют ALPI и PNA, максимально развитые в холодное полугодие. Для Охотского моря основное значение имеет колебание АО, за исключением лета, когда усиливаются региональные барические образования.

На зимние и весенние изменения термических условий в Японском море в равной степени влияют АО, SHI, тесно связанные между собой, и WP. Вклад WP значим также в осенней и годовой изменчивости. Зимой усиливается роль Nino 3.4, тогда как в другие сезоны его вклад становится несущественным.

В СЗТО во все сезоны значимые связи между ТПО и индексами не наблюдаются. Еще одной особенностью СЗТО являются противоположные связи с Nino 3.4, PDO, ALPI, PNA и WP, тогда как между этими индексами и ТПО ДВ морей России знак R устойчиво положительный. Такая особенность СЗТО связана с противофазностью термического состояния между восточной и западной частями СТО, хорошо проявляющейся при разложении ТПО на главные компоненты [Mantua et al., 1997].

По вкладу в изменчивость ТПО в отдельных районах дальневосточного бассейна индексы можно разделить на две категории: западные и восточные. К первой относятся АО, SHI и WP, которые отражают процессы, воздействующие на западную часть дальневосточного бассейна, условно ограниченную долготой Камчатки. К основным индексам восточной категории относятся PDO, PNA и ALPI, а NPI и Nino 3.4 играют второстепенные роли.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы выражают благодарность С.Н. Родионову за доступное программное обеспечение методики выявления сдвигов климатического режима, анонимным рецензентам за ценные замечания, позволившие качественно улучшить данную статью, а также Японскому метеорологическому агентству (проект NEAR-GOOS), Центру климатического прогнозирования (*Climate Prediction Center*), Национальному центру по прогнозированию окружающей среды (NCEP) и Национальному центру атмосферных исследований (NCAR) Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) США за регулярно обновляемые данные о ТПО и климатических индексах на открытых информационных интернет-ресурсах.

Authors are thankful to S.N. Rodionov for available software for regime shifts detecting and to anonymous reviewers for valuable comments that allowed to improve the article, and are grateful to Japan Meteorological Agency (NEAR-GOOS project), Climate Prediction Center, National Center for Environmental Prediction (NCEP), and National Center for Atmospheric Research (NCAR) of the US National Oceanic and Atmospheric Administration for regularly updated time-series of climate indices available on open information resources in Internet.

Финансирование работы (FUNDING)

Результаты настоящего исследования были получены в рамках выполнения государственного задания № 076-00005-20-00 ФГБНУ «ВНИРО» на 2020 г.

Results of this study were obtained within implementation of the government assignment No. 076-00005-20-00 to the Federal State Budgetary Research Institution VNIRO for 2020.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Авторы заявляют, что настоящая работа не содержит собственных экспериментальных данных, полученных с использованием животных или с участием людей. Библиографические ссылки на все использованные данные других авторов оформлены в соответствии с ГОСТом. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

The authors declare that this work does not contain their own experimental data obtained using animals or with participation of people. Bibliographic references to all used data of other authors are designed in accordance with the State Standards of Russia. The authors declare that they have no conflict of interest.

Информация о вкладе авторов (AUTHOR CONTRIBUTIONS)

Постановка задачи принадлежит Г.В. Хену, работу с базами данных, основные расчеты и часть иллюстраций выполнил Ю.Д. Сорокин, в анализе и обсуждении результатов принимали участие все авторы, подготовку текста статьи осуществляли Г.В. Хен и Е.И. Устинова.

Problem of the study was formulated by G.V. Khen; data processing, basic calculations and partially illustration were performed by Yu.D. Sorokin, all authors took part in the analysis and discussion of the results; text and illustrations were prepared by G.V. Khen and E.I. Ustinova.

Список литературы

Басюк Е.О., Зуенко Ю.И. Берингово море 2018 — экстремально малоледовитый и теплый год // Изв. ТИНРО. — 2019. — Т. 198. — С. 119–142. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-198-119-142.

Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных : пер. с англ. : моногр. — М. : Мир, 1989. — 540 с.

Зуенко Ю.И., Асеева Н.Л., Глебова С.Ю. и др. Современные изменения в экосистеме Охотского моря (2008–2018 гг.) // Изв. ТИНРО. — 2019. — Т. 197. — С. 35–61. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-197-35-61.

Ильинский О.К. Охотский антициклон // Тр. ДВНИГМИ. — 1959. — Вып. 7. — С. 10–32.

Кильматов Т.Р., Тринько О.И., Дмитриева Е.В. Климатический тренд в Тихом океане и теория катастроф // Изв. ТИНРО. — 2012. — Т. 170. — С. 184–191.

Кровнин А.С., Котенев Б.Н., Мордасова Н.В., Муры́й Г.П. Дальние связи в атмосфере и океане как основа долгосрочного рыбопромыслового прогнозирования // Тр. ВНИРО. — 2018. — Т. 173. — С. 33–65.

Лобанов В.Б., Данченков М.А., Лучин В.А. и др. Глава 5.4. Дальневосточные моря России // Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. — М. : Росгидромет, 2014. — С. 684–743.

Мордвинов В.И., Иванова А.С., Девятова Е.В. Возбуждение Арктической и Антарктической осцилляций крутильными колебаниями // Солнечно-земная физика. — 2009. — Вып. 13. — С. 55–65.

Пономарев В.И., Каплуненко Д.Д., Крохин В.В. Тенденции изменений климата во второй половине XX века в Северо-Восточной Азии, на Аляске и северо-западе Тихого океана // Метеорол. и гидрол. — 2005. — № 2. — С. 15–26.

Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Воронцов А.А. Тенденции климатических изменений термических условий в прибрежных акваториях западной части Берингова моря и прилегающих районах за последние десятилетия // Изв. ТИНРО. — 2018. — Т. 193. — С. 167–182. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-193-167-182.

Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Рудых Н.И., Воронцов А.А. Климатические изменения термических условий окраинных морей западной части Тихого океана // Метеорол. и гидрол. — 2020. — № 3. — С. 44–57.

Смирнов Н.П., Вайновский П.А., Титов Ю.Э. Статистический диагноз и прогноз океанологических процессов : моногр. — СПб. : Гидрометеиздат, 1992. — 202 с.

Устинова Е.И., Сорокин Ю.Д. Сравнительная оценка баз данных о температуре поверхности океана, используемых для дальневосточных морей // Математическое моделирование и

информационные технологии в исследованиях биоресурсов Мирового океана : мат-лы отраслевого семинара. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2013. — С. 83–86.

Хен Г.В., Басюк Е.О., Сорокин Ю.Д. и др. Термические условия на поверхности Берингова и Охотского морей в начале 21-го века на фоне полувековой изменчивости // Изв. ТИНРО. — 2008. — Т. 153. — С. 254–263.

Хен Г.В., Сорокин Ю.Д. Сезонные особенности многолетних изменений ТПО в северной части Тихого океана и в отдельных его областях // Вопр. промысл. океанол. — 2008. — Вып. 5, № 1. — С. 164–183.

Хен Г.В., Устинова Е.И., Сорокин Ю.Д. Изменчивость и взаимосвязь основных климатических индексов для северной части Тихого океана: тренды, климатические сдвиги, спектры, корреляции // Изв. ТИНРО. — 2019а. — Т. 199. — С. 163–178. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-199-163-178.

Хен Г.В., Устинова Е.И., Сорокин Ю.Д. Основные климатические индексы для северной части Тихого океана: природа и история (литературный обзор) // Изв. ТИНРО. — 2019б. — Т. 197. — С. 166–181.

Хен Г.В., Устинова Е.И., Сорокин Ю.Д., Матюшенко Л.Ю. Долгопериодные изменения термических характеристик поверхностных вод Японского моря и залива Петра Великого и их связь с крупномасштабными климатическими процессами // Тр. ВНИРО. — 2020. — Т. 180. — С. 72–87. DOI: 10.36038/2307-3497-2020-180-72-87.

Шатилина Т.А., Анжина Г.И. Изменчивость параметров азиатской и дальневосточной атмосферных депрессий во второй половине 20-го века // Изв. ТИНРО. — 2006. — Т. 144. — С. 300–311.

Шатилина Т.А., Цициашвили Г.Ш., Радченкова Т.В. Комплексная оценка изменчивости температуры воды на поверхности в северо-западной части Тихого океана в июле-сентябре 1950–2014 гг. // Изв. ТИНРО. — 2016. — Т. 184. — С. 120–134. DOI: 10.26428/1606-9919-2016-184-120-134.

Baker M.R., Kivva K.K., Pisareva M.N. et al. Shifts in the physical environment in the Pacific Arctic and implications for ecological timing and conditions // Deep-Sea Res. II. — 2020. — Vol. 177. 104802. DOI: 10.1016/j.dsr2.2020.104802.

Bond N.A., Cronin M.F., Freeland H., Mantua N. Causes and impacts of the 2014 warm anomaly in the NE Pacific // Geophys. Res. Lett. — 2015. — Vol. 42, Iss. 9. — P. 3414–3420. DOI: 10.1002/2015GL063306.

IPCC, 2007: 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 / eds R.K. Pachauri and A. Reisinger. — Geneva, Switzerland : IPCC, 2007. — 104 p.

Ishii M., Shouji A., Sugimoto S., Matsumoto T. Objective Analyses of Sea-Surface Temperature and Marine Meteorological Variables for the 20th Century using ICOADS and the Kobe Collection // Int. J. Climatol. — 2005. — № 25. — P. 865–879.

Jung H.K., Rahman S.M., Kang C.-K. et al. The influence of climate regime shifts on the marine environment and ecosystems in the East Asian Marginal Seas and their mechanisms // Deep-Sea Res. II. — 2017. — Vol. 143. — P. 110–120. DOI: 10.1016/j.dsr2.2017.06.010.

Kurihara Y., Sakurai T., Kuragano T. Global daily sea surface temperature analysis using data from satellite microwave radiometer, satellite infrared radiometer and in-situ observations // Weath. Bull. — 2006. — Vol. 73, Spec. Iss. — P. 1–18 (in Jap.).

Mantua N.J., Hare S.R., Zhang Y. et al. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production // Bull. Amer. Meteor. Soc. — 1997. — Vol. 78, № 6. — P. 1069–1079. DOI: 10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2.

Miyasaka T., Nakamura H., Taguchi B., Nonaka M. Multidecadal modulations of the low-frequency climate variability in the wintertime North Pacific since 1950 // Geophys. Res. Lett. — 2014. — Vol. 41, Iss. 8. — P. 2948–2955. DOI: 10.1002/2014GL059696.

Nakanowatari T., Ohshima K.I., Wakatsuchi M. Warming and oxygen decrease of intermediate water in the northwestern North Pacific, originating from the Sea of Okhotsk, 1955–2004 // Geophys. Res. Lett. — 2007. — Vol. 34, Iss. 4. L04602. DOI: 10.1029/2006GL028243.

Newman M., Alexander M.A., Ault T.R. et al. The Pacific Decadal Oscillation, Revisited // J. Climate. — 2016. — Vol. 29. — P. 4399–4427. DOI: 10.1175/jcli-d-15-0508.1.

Overland J.E., Wang M. Impact of the winter polar vortex on greater North America // Int. J. Climatol. — 2019. — Vol. 39, Iss. 15. — P. 5815–5821. DOI: 10.1002/joc.6174.

Peterson W., Bond N., Robert M. The Blob is gone but has morphed into a strongly positive PDO/SST pattern // *PICES Press*. — 2016. — Vol. 24, № 2. — P. 46–47.

Rodionov S.N. A sequential algorithm for testing climate regime shifts // *Geophys. Res. Lett.* — 2004. — Vol. 31, № 9. — L09204, DOI: 10.1029/2004GL019448.

Rodionov S.N. The use of prewhitening in climate regime shift detection // *Geophys. Res. Lett.* — 2006. — Vol. 33, № 12. — L12707, DOI: 10.1029/2006GL025904.

Rodionov S.N., Bond N.A., Overland J.E. The Aleutian Low, storm tracks, and winter climate variability in the Bering Sea // *Deep-Sea Res. II*. — 2007. — Vol. 54, Iss. 23–26. — P. 2560–2577. DOI: 10.1016/j.dsr2.2007.08.002.

Stabeno P.J., Danielson S.L., Kachel D.G. et al. Currents and transport on the Eastern Bering Sea shelf: An integration of over 20 years of data // *Deep-Sea Res. II*. — 2016. — Vol. 134. — P. 13–29. DOI: 10.1016/j.dsr2.2016.05.010.

Ueno K. Inter-annual variability of surface cyclone tracks, atmospheric circulation patterns, and precipitation patterns, in winter // *J. Meteor. Soc. Japan*. — 1993. — Vol. 71, № 6. — P. 655–671. DOI: 10.2151/jmsj1965.71.6_655.

Yeh S.-W., Kang Y.-J., Noh Y., Miller A.J. The North Pacific Climate Transitions of the Winter of 1976/77 and 1988/89 // *J. Climate*. — 2011. — Vol. 24, Iss. 4. — P. 1170–1183. DOI: 10.1175/2010JCLI3325.1.

References

Basyuk, E.O. and Zuenko, Yu.I., Bering Sea: 2018 as the extreme low-ice and warm year, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2019, vol. 198, pp. 119–142. doi 10.26428/1606-9919-2019-198-119-142

Bendat, J.S. and Piersol, A.G., *Analysis and Measurement Procedures*, Moscow: Mir, 1989.

Zuenko, Yu.I., Aseeva, N.L., Glebova, S.Yu., Gostrenko, L.M., Dubinina, A.Yu., Dulepova, E.P., Zolotov, A.O., Loboda, S.V., Lysenko, A.V., Matveev, V.I., Muktepavel, L.S., Ovsyannikov, E.E., Figurkin, A.L., and Shatilina, T.A., Recent changes in the Okhotsk Sea ecosystem (2008–2018), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2019, vol. 197, pp. 35–61. doi 10.26428/1606-9919-2019-197-35-61

Il'inskii, O.K., The Okhotsk anticyclone, *Tr. Dal'nevost. Nauchno-Issled. Gidrometeorol. Inst.*, 1959, vol. 7, pp. 10–32.

Klimatov, T.R., Trinko, O.I., and Dmitrieva, E.V., Climate trend in the Pacific Ocean and catastrophe theory, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2012, vol. 170, pp. 184–191.

Krovnin, A.S., Kotenev, B.N., Mordasova, N.V., and Mury, G.P., Long-range communications in the atmosphere and ocean as the basis for long-term fishing forecasting, *Tr. Vseross. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2018, vol. 173, pp. 33–65.

Lobanov, V.B., Danchenkov, M.A., Luchin, V.A., Mezentseva, L.I., Ponomarev, V.I., Sokolov, O.V., Trusenkov, O.O., Ustinova, E.I., Ushakova, R.N., and Hen, G.W., Chapter 5.4. Far Eastern seas of Russia, in *Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii* (Second Roshydromet Assessment Report on Climate Change and its Consequences in the Russian Federation), Moscow: Roshydromet, 2014, pp. 684–743.

Mordvinov, V.I., Ivanova, A.S., and Devyatova, E.V., Excitation of Arctic and Antarctic oscillations by torsional oscillations, *Soln.-Zemnaya Fiz.*, 2009, vol. 13, pp. 55–65.

Ponomarev, V.I., Kaplunenko, D.D., and Krokhin, V.V., Climatic Trends in Northeast Asia, Alaska Peninsula, and Northwest Pacific in the Second Half of the 20th Century, *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2005, no. 2, pp. 15–26.

Rostov, I.D., Dmitrieva, E.V., and Vorontsov, A.A., Tendencies of climate changes for thermal conditions in the coastal waters of the western Bering Sea and adjacent areas in the last decades, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2018, vol. 193, pp. 167–182. doi 10.26428/1606-9919-2018-193-167-182

Rostov, I.D., Dmitrieva, E.V., Rudykh, N.I., and Vorontsov, A.A., Climatic changes in thermal conditions of marginal seas in the Western Pacific, *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, no. 3, pp. 169–178.

Smirnov, N.P., Vainovsky, P.A., and Titov, Yu.E., *Statisticheskii diagnost i prognoz okeanologicheskikh protsessov* (Statistical diagnosis and forecast of oceanological processes), St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992.

Ustinova, E.I. and Sorokin, Yu.D., Comparative assessment of databases on ocean surface temperature used for the Far Eastern seas, in *Matematicheskoye modelirovaniye i informatsionnyye tekhnologii v issledovaniyakh bioresursov Mirovogo okeana: mat-ly otrasl semin* (Mathematical modeling and information technology in the study of biological resources of the oceans: industry workshop materials), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2013, pp. 83–86.

Khen, G.V., Basyuk, E.O., Sorokin, Yu.D., Ustinova, E.I., and Figurkin, A.L., Surface thermal conditions in the Bering and Okhotsk Seas in the early 21 Century against previous semi-centennial changes, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2008, vol. 153, pp. 254–263.

Hen, G.V. and Sorokin, Yu.D., *Sezonnyye osobennosti mnogoletnikh izmeneniy TPO v severnoy chasti Tikhogo okeana i v otdel'nykh yego oblastyakh* (Seasonal features of perennial changes in SST in the northern part of the Pacific Ocean and in its individual areas), *Vopr. Promysl. Okeanol.*, 2008, vol. 5, no. 1, pp. 164–183.

Khen, G.V., Ustinova, E.I., and Sorokin, Yu.D., Variability and interrelation of the basic climate indices for the North Pacific: trends, climate shifts, spectra, correlations, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2019, vol. 199, pp. 163–178. doi 10.26428/1606-9919-2019-199-163-178

Khen, G.V., Ustinova, E.I., and Sorokin, Yu.D., Principal climate indices for the North Pacific: nature and history (a review), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2019, vol. 197, pp. 166–181.

Khen, G.V., Ustinova, E.I., Sorokin, Yu.D., and Matyushenko, L.Yu., Long-term changes of the thermal characteristics in the Japan Sea surface water and peter the great bay and their relationship with large-scale climatic processes, *Tr. Vseross. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2020, vol. 180, pp. 72–87. doi 10.36038/2307-3497-2020-180-72-87

Shatilina, T.A. and Anzhina, G.I., Change of the Asian and Far Eastern depressions parameters in the second half of 20th century, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2006, vol. 144, pp. 300–311.

Shatilina, T.A., Tsitsiashvili, G.Sh., and Radchenkova, T.V., Complex assessment of variability for the sea surface temperature in the North-West Pacific in July–September 1950–2014, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2016, vol. 184, pp. 120–134. doi 10.26428/1606-9919-2016-184-120-134

Baker, M.R., Kivva, K.K., Pisareva, M.N., Watson, J.T., and Selivanova, J., Shifts in the physical environment in the Pacific Arctic and implications for ecological timing and conditions, *Deep Sea Res., Part II*, 2020, vol. 177, 104802. doi 10.1016/j.dsr2.2020.104802

Bond, N.A., Cronin, M.F., Freeland, H., and Mantua, N., Causes and impacts of the 2014 warm anomaly in the NE Pacific, *Geophys. Res. Lett.*, 2015, vol. 42, no. 9, pp. 3414–3420. doi 10.1002/2015GL063306

IPCC, 2007: 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, Pachauri, R.K. and Reisinger, A., eds, Geneva, Switzerland: IPCC, 2007.

Ishii, M., Shouji, A., Sugimoto, S., and Matsumoto, T., Objective Analyses of Sea-Surface Temperature and Marine Meteorological Variables for the 20th Century using ICOADS and the Kobe Collection, *Int. J. Climatol.*, 2005, no. 25, pp. 865–879.

Jung H.K., Rahman SM M., Kang C.-K., Park, S.-Y., Lee, S.H., Park, H.J., Kim, H.-W., and Lee, C.I., The influence of climate regime shifts on the marine environment and ecosystems in the East Asian Marginal Seas and their mechanisms, *Deep-Sea Res., Part II*, 2017, vol. 143, pp. 110–120. doi 10.1016/j.dsr2.2017.06.010

Mantua, N.J., Hare, S.R., Zhang, Y., Wallace, J.M., and Francis, R.C., A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, vol. 78, no. 6, pp. 1069–1079. doi 10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2

Miyasaka, T., Nakamura, H., Taguchi, B., and Nonaka, M., Multidecadal modulations of the low-frequency climate variability in the wintertime North Pacific since 1950, *Geophys. Res. Lett.*, 2014, vol. 41, no. 8, pp. 2948–2955. doi 10.1002/2014GL059696

Nakanowatari, T., Ohshima, K.I., and Wakatsuchi, M., Warming and oxygen decrease of intermediate water in the northwestern North Pacific, originating from the Sea of Okhotsk, 1955–2004, *Geophys. Res. Lett.*, 2007, vol. 34, no. 4, L04602. doi 10.1029/2006GL028243

Newman, M., Alexander, M.A., Ault, T.R., Cobb, K.M., Deser, C., Di Lorenzo, E., Mantua, N.J., Miller, A.J., Minobe, S., Nakamura, H., Schneider, N., Vimont, D.J., Phillips, A.S., Scott, J.D., and Smith, C.A., The Pacific decadal oscillation, revisited, *J. Climate*, 2016, vol. 29, pp. 4399–4427. doi 10.1175/jcli-d-15-0508.1

Overland, J.E. and Wang, M., Impact of the winter polar vortex on greater North America, *Int. J. Climatol.*, 2019, vol. 39, no. 15, pp. 5815–5821. doi 10.1002/joc.6174

Peterson, W., Bond, N., and Robert, M., The Blob is gone but has morphed into a strongly positive PDO/SST pattern, *PICES Press*, 2016, vol. 24, no. 2, pp. 46–47.

Rodionov, S.N., A sequential algorithm for testing climate regime shifts, *Geophys. Res. Lett.*, 2004, vol. 31, no. 9, L09204, doi 10.1029/2004GL019448

Rodionov, S.N., The use of prewhitening in climate regime shift detection, *Geophys. Res. Lett.*, 2006, vol. 33, no. 12, L12707, doi 10.1029/2006GL025904

Rodionov, S.N., Bond, N.A., and Overland, J.E., The Aleutian Low, storm tracks, and winter climate variability in the Bering Sea, *Deep-Sea Res., Part*, 2007, vol. 54, no. 23–26, pp. 2560–2577. doi 10.1016/j.dsr2.2007.08.002

Stabeno, P.J., Danielson, S.L., Kachel, D.G., Kachel, N.B., and Mordy, C.W., Currents and transport on the Eastern Bering Sea shelf: An integration of over 20 years of data, *Deep-Sea Res., Part II*, 2016, vol. 134, pp. 13–29. doi 10.1016/j.dsr2.2016.05.010

Ueno, K., Inter-annual variability of surface cyclone tracks, atmospheric circulation patterns, and precipitation patterns, in winter, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 1993, vol. 71, no. 6, pp. 655–671. doi 10.2151/jmsj1965.71.6_655

Yeh, S.-W., Kang, Y.-J., Noh, Y., and Miller, A.J., The North Pacific Climate Transitions of the Winter of 1976/77 and 1988/89, *J. Climate*, 2011, vol. 24, no. 4, pp. 1170–1183. doi 10.1175/2010JCLI3325.1

Поступила в редакцию 24.11.2021 г.

После доработки 4.02.2022 г.

Принята к публикации 25.02.2022 г.

*The article was submitted 24.11.2021; approved after reviewing 4.02.2022;
accepted for publication 25.02.2022*