

УДК (551.583.1:551.46.06)(265.53)

И.Д. Ростов¹, Е.В. Дмитриева¹, А.А. Воронцов^{2*}

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43;

² Всероссийский научно-исследовательский институт
гидрометеорологической информации — Мировой центр данных,
249035, г. Обнинск Калужской обл., ул. Королева, 6

ТЕНДЕНЦИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНОВ ОХОТСКОГО МОРЯ ЗА ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ

По данным срочных наблюдений на сети гидрометеорологических станций Росгидромета за 1980–2016 гг. и реанализа (NOAA) выполнен анализ межгодовой изменчивости поверхностной температуры воды в различных прибрежных акваториях и прилегающих районах Охотского моря на современном этапе «потепления». С использованием аппарата ЭОФ, методов кластерного и корреляционного анализа проведены анализ пространственно-временной структуры колебаний температуры и районирование акваторий по особенностям современных климатических изменений. Исследованы возможные причинно-следственные связи этих изменений с климатическими индексами. Проведенные исследования позволили выявить, уточнить и дать количественную оценку современным тенденциям, а также рассмотреть региональные особенности межгодовой изменчивости термических условий в выделенных районах.

Ключевые слова: Охотское море, прибрежные районы, термические условия, межгодовая изменчивость, тренды температуры, климатические индексы, корреляционные связи, разложение полей по ЭОФ, региональные особенности.

DOI: 10.26428/1606-9919-2017-191-176-195.

Rostov I.D., Dmitrieva E.V., Vorontsov A.A. Tendencies of climatic changes for thermal conditions in the coastal areas of the Okhotsk Sea in last decades // *Izv. TINRO.* — 2017. — Vol. 191. — P. 176–195.

The sea surface temperature (SST) variability in recent conditions of climatic warming is analyzed for coastal areas of the Okhotsk Sea on the data of regular observations on hydrometeorological stations in 1980–2016 and NOAA_OI_SST_V2 reanalysis data, taking into account the climate indices variations. The data series are analyzed using the methods of Empirical Orthogonal Functions (EOF), cluster analysis and correlation analysis. The SST fluctuations with period of 2–5 years prevailed in the year-to-year variability on the background of longer cycles and irregular changes with three periods of different thermal regime: cold (1977–1987), transitional (1988–2003), and warm (2004–2016). These periods were observed for the whole

* *Ростов Игорь Дмитриевич, кандидат географических наук, заведующий лабораторией, e-mail: rostov@poi.dvo.ru; Дмитриева Елена Витальевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: e_dmitrieva@poi.dvo.ru; Воронцов Александр Анатольевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, e-mail: vorv@meteo.ru.*

Rostov Igor D., Ph.D., head of laboratory, e-mail: rostov@poi.dvo.ru; Dmitrieva Elena V., Ph.D., senior researcher, e-mail: e_dmitrieva@poi.dvo.ru; Vorontsov Alexander A., Ph.D., head of laboratory, e-mail: vorv@meteo.ru.

sea area and coincided with similar changes of the air temperature and sea ice. A tendency to warming was the most noticeable in the last 15 years when the average growth rate of mean annual SST was 0.17 °C per 10 years, with 1.5–2.0 times higher values for some stations. The positive SST trend in summer was approximately twice higher than in winter; the trend increased 3-fold from northern to southern areas of the Okhotsk Sea. The trend contributed 46 % of the mean annual SST dispersion. Large-scale process of the SST regime changing is described by the first EOF mode and could be parametrized by PDO, NPI and OKH climatic indices.

Key words: Okhotsk Sea, coastal waters, thermal conditions, year-to-year variability, SST trend, climatic index, correlation, EOF analysis, regional features.

Введение

Происходящие в последние 40 лет глобальные климатические изменения, выразившиеся в изменении атмосферной циркуляции и синоптических процессов, ледовых условий, температуры и солености на морской поверхности и их вертикального распределения, в повышении уровня моря, увеличении числа экстремальных и опасных природных явлений и др., оказали существенное воздействие на фауну дальневосточных морей и отразились на динамике основных объектов морского промысла*. Это воздействие обусловлено как внешними, так и внутривидовыми причинами и биоценологическими факторами. На возможные причины и неоднозначность проявления происходящих изменений, их цикличность и многофакторность воздействия на биоту указывают результаты продолжающихся исследований и обобщающих работ (Шунтов, 2001; Кляшторин, Любушин, 2005; Шунтов и др., 2007, 2010; Глебова и др., 2009; Пономарев и др., 2013; Шунтов, Темных, 2013; и др.). Как известно, в 1970-е гг. в результате климатического сдвига произошла смена климатического режима с холодного на теплый, что означало начало нового многолетнего цикла или климатического периода. В соответствии с ходом глобальной температуры 1976 г. был выбран в качестве начала современного потепления**.

Согласно данным доклада ВМО***, средняя глобальная температура поверхности Земли в 2016 г. оказалась на 0,06 °C выше, чем в 2015 г., и стала самой высокой с 1880 г. (как и температуры поверхности океана). В 1976–2016 гг. средняя скорость потепления для земного шара составляла 0,17 °C/10 лет (в два раза больше, чем за весь 20-й век). В этот период на всей территории России среднегодовая приземная температура росла со скоростью 0,45 °C/10 лет, а по Дальневосточному региону — 0,49 °C/10 лет, т.е. в 2,6–2,9 раза быстрее глобальной****. По предварительным оценкам величина тренда температуры воздуха в прибрежных районах Охотского моря также была выше глобальной оценки и составила 0,39 °C/10 лет. Важно отметить, что при подобных масштабах пространственно-временного осреднения межгодовые колебания среднегодовых температур воздуха по району Охотского моря и территории России достаточно сильно коррелированы ($r = 0,7$), что в целом указывает на важную роль планетарных процессов в этих изменениях. В последние годы наблюдается некоторое замедление (пауза) глобального потепления, температура колеблется на уровне достигнутых высоких значений*.

Результатам анализа данных о межгодовой изменчивости термических характеристик поверхности Охотского моря на этапе современных климатических изменений

* 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.

** IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. (eds). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.; Второй оценочный доклад... (2014).

*** WMO Statement on the state of the global climate in 2016. 2017. № 1189. 26 p.

**** Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 г. М.: Росгидромет, 2017. 70 с.

посвящено множество работ (Гидрохимия..., 1998*; Устинова и др., 2002; Хен и др., 2008; Шатилина, Кравченко, 2013; Ustinova, Sorokin, 2013; и др.). В них рассматривались данные различных видов наблюдений за отдельные годы и сезоны: глубоководные гидрологические, дистанционные и расчетные, обобщенные по отдельным группам ГМС и др. Оценки трендов и корреляционных связей с климатическими индексами, полученные по этим разнородным данным, позволили составить общее представление о характере межгодовых вариаций температуры воды за многолетний период с детализацией по отдельным районам и слоям. Было установлено, что из-за перестройки глобальных и региональных атмосферных процессов во второй половине прошлого столетия и в начале нынешнего в Дальневосточном регионе произошли коренные изменения в характере циклонической циркуляции. При этом, как показал анализ различных параметров атмосферной циркуляции над дальневосточными морями, количество «холодных» синоптических типов сократилось, активность и продолжительность зимнего муссона уменьшились, а летнего — увеличились. Это определило повышение температуры воздуха и воды и привело к «потеплению» климатических условий в этих морях (Устинова и др., 2002; Глебова, 2003, 2011; Глебова и др., 2009; Шатилина, Анжина, 2011; Макагонова, 2013; Плотников и др., 2015). Климатические изменения заметно отразились на ледовитости Охотского моря, где площадь ледяного покрова уменьшилась более чем на 20 % за последние 60 лет**.

Следует отметить важную роль прибрежных акваторий Охотского моря в этом процессе с точки зрения долговременного влияния происходящих изменений на биоту. В условиях сильного приливного воздействия на мелководье процессы льдообразования и конвективного перемешивания формируют вертикальные и горизонтальные потоки более плотных, холодных высокосоленых вод на шельфе, которые являются важным поставщиком минеральных и органических веществ в подповерхностные и промежуточные слои сопредельных районов (Gladyshev et al., 2003; Ohshima et al., 2014). Эти воды образуются зимой при льдообразовании в районе стационарных прибрежных полыней в северо-западной части моря. За последние 40 лет на фоне глобального потепления, постоянного сокращения ледовитости Охотского моря и ослабления зимних конвекционных процессов произошло нарушение водно-солевого баланса, и поток плотных шельфовых вод уменьшился на 30 % (Ohshima et al., 2014). Возможным свидетельством ослабления вентиляционных процессов в эти годы являются устойчивое увеличение температуры воды, уменьшение солености и концентрации растворенного кислорода в слое примерно 50–500 м (Luchin et al., 2009).

Происходящие изменения атмосферных процессов и океанологических характеристик способны оказать заметное влияние на изменение промысловых условий и привести к масштабным перестройкам в экосистеме моря. Однако относительно вероятного сценария, тенденций дальнейших изменений термических характеристик и промысловой обстановки в ближайшей перспективе, после возможного завершения очередного климатического цикла, мнения исследователей расходятся.

Цель настоящей работы — выявление и уточнение тенденций, характеристик и возможных причинно-следственных связей межгодовых изменений термических условий в прибрежно-морских районах Охотского моря за последние 4 десятилетия (в период общего «потепления» климатических условий в дальневосточном бассейне).

Материалы и методы

В работе были использованы следующие материалы.

Для анализа межгодовых изменений термических условий в прибрежной зоне Охотского моря использовались данные 4 срочных измерений температуры воды и воздуха на сети ГМС Росгидромета с 1980 по 2016 г. включительно.

* Гидрохимия и гидрология морей. Т. 9: Охотское море, вып. 1: Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоздат, 1998. 343 с.

** Второй оценочный доклад... (2014).

Данные выбраны из архивного массива «БЕРЕГЕС», прошедшего контроль на качество информации и хранящегося в Госфонде ВНИИГМИ-МЦД (<http://meteo.ru/>). Анализ исходных данных показал, что часть рядов за выбранный 37-летний период наблюдений на действующих 34 станциях сети (формально — около 54 тыс. сроков наблюдений в течение 13,5 тыс. сут. на каждой станции) содержала пропуски в несколько сроков, суток или более. Среди них для дальнейшего анализа были отобраны 22 станции с минимальным количеством пропусков (рис. 1, табл. 1). Здесь номер станции соответствует последним значениям 5-значного общероссийского кода данного пункта наблюдений.

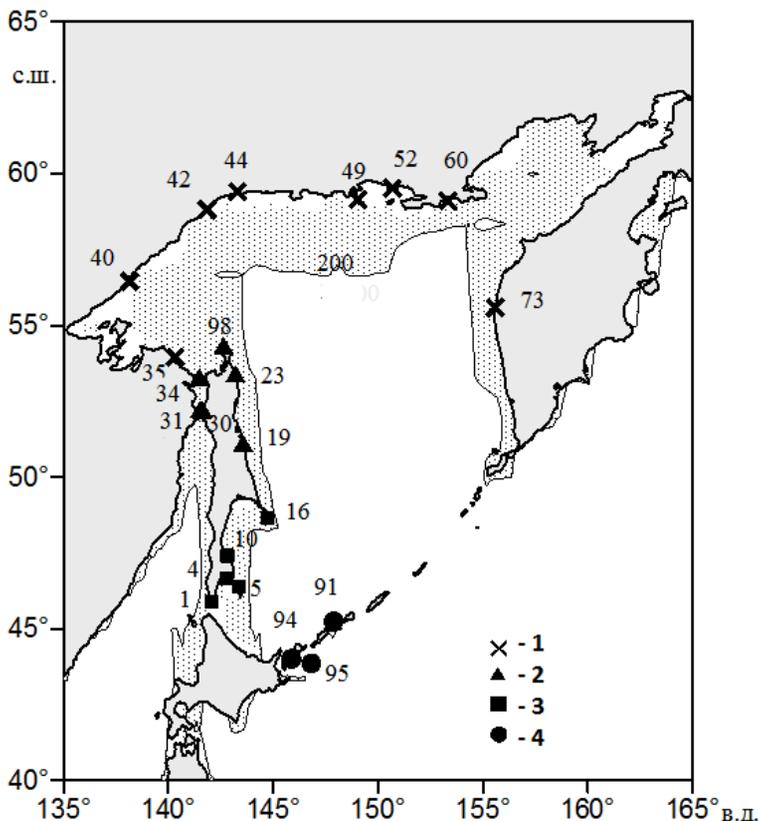


Рис. 1. Схема расположения станций наблюдений и выделенных районов: 1 — северная часть Охотского моря (район СОМ); 2 — северная часть о. Сахалин (район СОС); 3 — юго-восточная часть о. Сахалин (район ЮОС); 4 — южнокурильский район в южной части Охотского моря (район ЮОКР)

Fig. 1. Scheme of zoning the coastal waters of the Okhotsk Sea: 1 — northern Okhotsk Sea; 2 — the area at northern Sakhalin; 3 — the area at southern Sakhalin; 4 — South-Kuril area. Coastal hydrometeorological stations are shown

При выборе станций прибрежной сети учитывались непрерывность и однородность рядов наблюдений, проводимых по единой методике идентичными приборами и примерно в одни и те же сроки. Для восстановления пропущенных значений использовался метод полиномиального скользящего среднего и метод аналогии (Кендалл, Стюарт, 1976; Методические рекомендации..., 2004*). По данным срочных наблюдений рассчитывались и корректировались величины средних месячных, сезонных и средних годовых значений, что обеспечивало получение сглаженных, относительно однородных рядов межгодовых изменений температуры воды (T_w) и приземной температуры воздуха (T_a). Для большинства станций величина коэффициента вариации (показателя неоднородно-

* Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при недостаточности данных гидрометрических наблюдений. СПб.: ГОИН, 2004. 67 с.

Таблица 1

Характер и тенденции межгодовых изменений температуры воды на прибрежных ГМС за период наблюдений 1980–2016 гг.

Table 1

Year-to-year changes and long-term trends of the sea surface temperature at coastal stations for 1980–2016

№ ст.	Название	\bar{T}_w	\bar{T}_{wm}	σ^2	D	V	$T_w \pm$	R ²	КЛТ	КЛТ _м	КЛТ _т	КЛТ _х	r
1	Мыс Крильон	5,8	$\frac{6,7}{4,5}$	0,28	39	9	1,1	0,40	0,31	$\frac{0,64}{11}$	0,45	0,29	0,7
4	Корсаков	6,5	$\frac{7,6}{5,5}$	0,21	17	7	0,7	0,18	0,18	$\frac{0,47}{11}$	0,29	0,17	0,7
5	Новиково	6,2	$\frac{7,1}{5,0}$	0,23	27	8	0,9	0,28	0,24	$\frac{0,69}{8}$	0,39	0,16	0,8
10	Стародубское	5,0	$\frac{5,8}{3,7}$	0,23	39	10	1,0	0,39	0,28	$\frac{0,66}{7}$	0,54	0,10	0,8
16	Мыс Терпения	2,7	$\frac{3,3}{2,0}$	0,11	13	12	0,4	0,13	0,11	$\frac{0,35}{11}$	0,19	0,08	0,6
19	Комрво	2,2	$\frac{2,8}{1,4}$	0,11	15	15	0,4	0,16	0,12	$\frac{0,67}{9}$	0,31	0,07	0,6
23	Одопту	2,4	$\frac{3,3}{1,4}$	0,14	32	16	0,7	0,31	0,20	$\frac{0,71}{9}$	0,34	0,09	0,7
30	Погиби	5,1	$\frac{6,2}{4,5}$	0,15	8	8	0,4	0,08	0,10	$\frac{0,37}{9}$	0,27	0,00	0,6
31	Мыс Лазарева	5,6	$\frac{6,4}{4,7}$	0,15	38	7	0,9	0,40	0,23	$\frac{1,03}{10}$	0,73	0,07	0,6
34	О. Байдуков	4,9	$\frac{5,5}{3,7}$	0,18	14	9	0,6	0,15	0,15	$\frac{0,51}{9}$	0,35	0,00	0,7
35	Литке	2,1	$\frac{3,1}{1,0}$	0,24	3	24	0,3	0,03	0,08	$\frac{0,72}{9}$	0,32	0,00	0,6
40	Аян	3,0	$\frac{3,8}{1,9}$	0,18	18	14	0,6	0,18	0,17	$\frac{0,58}{8}$	0,33	0,11	0,8
42	Улья	3,1	$\frac{3,9}{2,2}$	0,20	1	14	0,2	0,01	0,04	$\frac{0,41}{9}$	0,18	0,00	0,6
44	Охотск	3,7	$\frac{4,3}{2,6}$	0,18	7	12	0,4	0,07	0,10	$\frac{0,27}{6}$	0,13	0,01	0,7
49	О. Спафарьева	2,2	$\frac{2,9}{1,5}$	0,10	5	14	0,2	0,05	0,06	$\frac{0,33}{5}$	0,03	0,03	0,5
52	Бухта Нагаева	3,3	$\frac{4,0}{2,5}$	0,16	11	12	0,4	0,10	0,12	$\frac{0,36}{8}$	0,25	0,07	0,7
60	Мыс Братьев	1,8	$\frac{2,6}{0,8}$	0,11	13	18	0,4	0,14	0,12	$\frac{0,28}{8}$	0,13	0,05	0,6
73	Ича	3,6	$\frac{4,4}{2,7}$	0,19	20	12	0,7	0,20	0,19	$\frac{0,56}{6}$	0,16	0,14	0,7
91	Курильск	5,9	$\frac{6,9}{4,5}$	0,34	36	10	1,2	0,36	0,32	$\frac{0,73}{9}$	0,57	0,20	0,9
94	Южно-Курильск	6,8	$\frac{7,8}{5,7}$	0,25	34	7	1,0	0,32	0,26	$\frac{0,55}{9}$	0,46	0,16	0,9
95	Малокурильское	5,8	$\frac{7,3}{4,6}$	0,41	30	11	1,2	0,31	0,33	$\frac{0,75}{9}$	0,59	0,24	0,9
98	Ныврово	3,9	$\frac{4,9}{3,0}$	0,18	16	11	0,6	0,16	0,16	$\frac{0,91}{9}$	0,43	-0,14	0,6

Примечание. \bar{T}_w — среднее значение температуры, °C; \bar{T}_{wm} — экстремальные величины межгодовых изменений (над чертой — максимальное значение, под чертой — минимальное); σ^2 — дисперсия T_w ; D — вклад тренда в суммарную дисперсию, %; V — коэффициент вариации, %; $T_w \pm$ — тренд за 37 лет; R² — коэффициент детерминации; КЛТ — коэффициент наклона линейного тренда, °C/10 лет; КЛТ_м — максимальная величина этого коэффициента (над чертой — значение, под чертой — месяц); КЛТ_т, КЛТ_х — коэффициент тренда для тепло-го и холодного сезонов; r — коэффициент корреляции температуры воды и воздуха. Жирным шрифтом выделены оценки значимого тренда.

сти временных рядов) не превосходила 10–15 % (табл. 1). С учетом продолжительности ледового периода*, особенностей внутrigодового хода T_w (Веселова, 1975), характера корреляционных связей и трендовых составляющих были выделены условно теплый (июль–октябрь) и условно холодный (ноябрь–апрель) сезоны (периоды года).

Для сравнительного анализа общих тенденций межгодовых изменений термических условий прибрежных и прилегающих районов открытой части Охотского моря были использованы данные реанализа NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA (Reynolds et al., 2002) — данные среднегодовых значений температуры T_{wr} (SST) на одноградусной сетке с 1982 по 2016 г. (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.html>). Следует отметить, что при отсутствии контактных или дистанционных наблюдений данные о термических условиях на поверхности акваторий, покрывающихся льдом в холодный период года, не всегда показательны.

Дополнительно использовались данные о временной динамике климатических индексов (КИ), позволяющих оценить влияние и вклад крупномасштабных, планетарных процессов и низкочастотных составляющих в межгодовую изменчивость термических условий исследуемого района. Среди них:

— индекс тихоокеанского декадного колебания (PDO), рассчитываемый по аномалиям температуры поверхности океана, индекс южного (SOI) и арктического колебаний (АО) (https://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/);

— региональный индекс летнего охотоморского максимума (ОКН) (Ogi et al., 2004), рассчитываемый по данным реанализа атмосферного давления на уровне поверхности моря (SLP) как аномалии средних SLP за июль–сентябрь для района с координатами 50–60° с.ш. 140–160° в.д. (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/getpage.pl>);

— западнотихоокеанский (WP) (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/wp.shtml>) и северотихоокеанский (NPI) (http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/elnino/decadal/npi_index.html) индексы.

Большинство из них рассчитываются по барическому полю и характеризуют региональные и глобальные особенности изменчивости поля давления и атмосферной циркуляции над Северным полушарием.

В качестве вспомогательной информации были использованы временные ряды ледовитости Охотского моря Национального ледового центра США, находившиеся до недавнего времени в свободном доступе (http://www.natice.noaa.gov/products/weekly_products.html).

Тренды оценивались для временных рядов, включающих среднегодовые значения наблюдаемых параметров и их аномалий, определяемых как отклонение от средней величины за все годы 30-летнего периода 1984–2013 гг. В качестве критического значения коэффициента корреляции на 5 %-ном уровне значимости линейного тренда была принята величина 0,33 (коэффициент детерминации $R^2 \geq 0,11$).

Исследование межгодовых изменений температуры воды по данным наблюдений на ГМС и реанализа проводилось с использованием метода разложения множества рядов (полей) на главные компоненты (Обухов, 1960; Jackson, 1991) или эмпирические ортогональные функции (ЭОФ), что предусматривает возможность извлечения из данных (параметризации) наиболее важной информации путем понижения размерности и выделения главных компонентов, или мод. Главные компоненты ортогональны, т.е. не коррелируют друг с другом. Этот метод широко используется для анализа нелинейных нестационарных процессов.

Районирование обширной прибрежной зоны Охотского моря для выделения акваторий, относительно обособленных по характеру климатических изменений, проводилось по трем главным компонентам ЭОФ методами кластерного анализа. Правомерность такого подхода, который обеспечивает возможность геометрического отображения данных большой размерности как на плоскости, так и в трехмерном пространстве, показана в ряде работ (Ding, He, 2004; Пономарев и др., 2013; и др.).

* Гидрохимия и гидрология морей (1998).

Результаты и их обсуждение

Общие характеристики межгодовой изменчивости термических условий в прибрежных и сопредельных районах Охотского моря

Выбранные для анализа ГМС охватывают систематическими наблюдениями большую часть прибрежной зоны моря, за исключением Пенжинского залива, юго-западного побережья Камчатки, а также центральной и северной частей Курильской островной гряды. Основные черты и особенности межгодовых изменений термического режима исследуемого района складываются под влиянием муссонной циркуляции и связаны с различиями в гидрометеорологических условиях этих прибрежных акваторий. Они определяются физико-географическим положением, влиянием глобальных климатических и океанологических факторов, проявлением внутренних термодинамических процессов в системе океан–атмосфера на региональном уровне*.

Общее представление о характере и тенденциях межгодовых изменений температуры воды в исследуемом районе дают количественные оценки, приведенные в табл. 1.

Среднегодовые значения температуры воды на станциях, расположенных на побережье северной части моря и у северо-восточного Сахалина, были минимальны. Здесь они изменялись в пределах 1,8–3,9 °С, а размах их межгодовых вариаций в пунктах наблюдений составлял 1,3–2,1 °С. В Амурском лимане, у юго-восточного Сахалина и у южных Курильских островов значения T_w возросли до 5,0–6,8 °С, как и размах их межгодовых вариаций (2,1–2,7 °С). Последние два района отличались и максимальными величинами дисперсии температуры воды. Средние же за весь период наблюдений приземные температуры воздуха на большинстве участков побережья были отрицательными (за исключением групп станций, расположенных южнее 49° с.ш.). Вследствие быстрого отклика на атмосферные воздействия межгодовые флюктуации температуры воды и воздуха на 60 % станций характеризуются сильными корреляционными связями ($r = 0,7–0,9$). Для других участков побережья из-за нарушения естественного процесса прогрева и охлаждения водной поверхности в результате сгонно-нагонных явлений, апвеллинга или других причин они слабее ($r = 0,5–0,6$). В холодный период эти связи нарушаются из-за влияния ледяного покрова, когда величины r уменьшаются в 1,5–2,5 раза по сравнению с теплым периодом.

Предварительный анализ кривых временного хода аномалий T_w и T_a показал, что для описания общих тенденций их межгодовой изменчивости на выбранном временном интервале можно ограничиться оценками линейного тренда. Представленные в табл. 1 оценки коэффициентов наклона линейных трендов являются характеристикой скорости изменения среднегодовой температуры воды после начала этапа современного глобального потепления. $КЛТ_M$ означает максимальную величину этого коэффициента в годовом ходе, а $КЛТ_T$ и $КЛТ_X$ — в теплый и холодный сезоны. На всех станциях величины тренда межгодовых изменений среднегодовых значений температуры положительны. Однако в линейном приближении для шести станций эти оценки статистически не значимы, а для трех из них — значимы только в августе или сентябре. Все они расположены в прибрежной зоне северной и северо-западной части моря. Наибольшая скорость роста среднегодовых значений T_w (до 0,33 °С/10 лет) отмечается в водах у южной оконечности о. Сахалин и у южных Курильских островов. В этих районах доля трендовой составляющей в общей дисперсии T_w достигает максимальных величин (табл. 1).

Максимальный вклад в увеличение среднегодовой температуры воды вносит теплый сезон. Обобщенно по всем ГМС оценки тренда за этот сезон превосходят среднегодовые почти в 2 раза. Наибольшие тренды, величиной от 0,71 до 1,03 °С/10 лет, наблюдались в сентябре-октябре (табл. 1). В холодный сезон значимые положительные тренды отмечались только на 10 ГМС, расположенных главным образом в южной части моря, южнее мыса Терпения. Оценки $КЛТ_X$ за этот сезон в 2,0 раза меньше среднегодовых и в 3,9 раза меньше, чем за теплый сезон. На станциях Комрво и

* Гидрохимия и гидрология морей (1998).

Погиби, расположенных в северной части Сахалина, статистически значимые оценки тренда были отрицательными в начале весны, а на ст. Ныврово — в течение всего холодного сезона. Общая тенденция преимущественного влияния аномалий теплого периода на среднегодовые значения для всего моря в целом отмечалась ранее (Хен и др., 2008; Ustinova, Sorokin, 2013). Эти особенности ярко проявляются и в оценках КЛТ временного хода величин разности внутригодовых экстремумов температуры, наблюдаемых в течение теплого и холодного сезонов.

На рис. 2 сопоставлены обобщенные кривые временного хода среднегодовых величин, аномалий и накопленных аномалий различных климатических переменных: температуры воздуха и воды по данным прибрежных ГМС (2, а–г), температуры воды

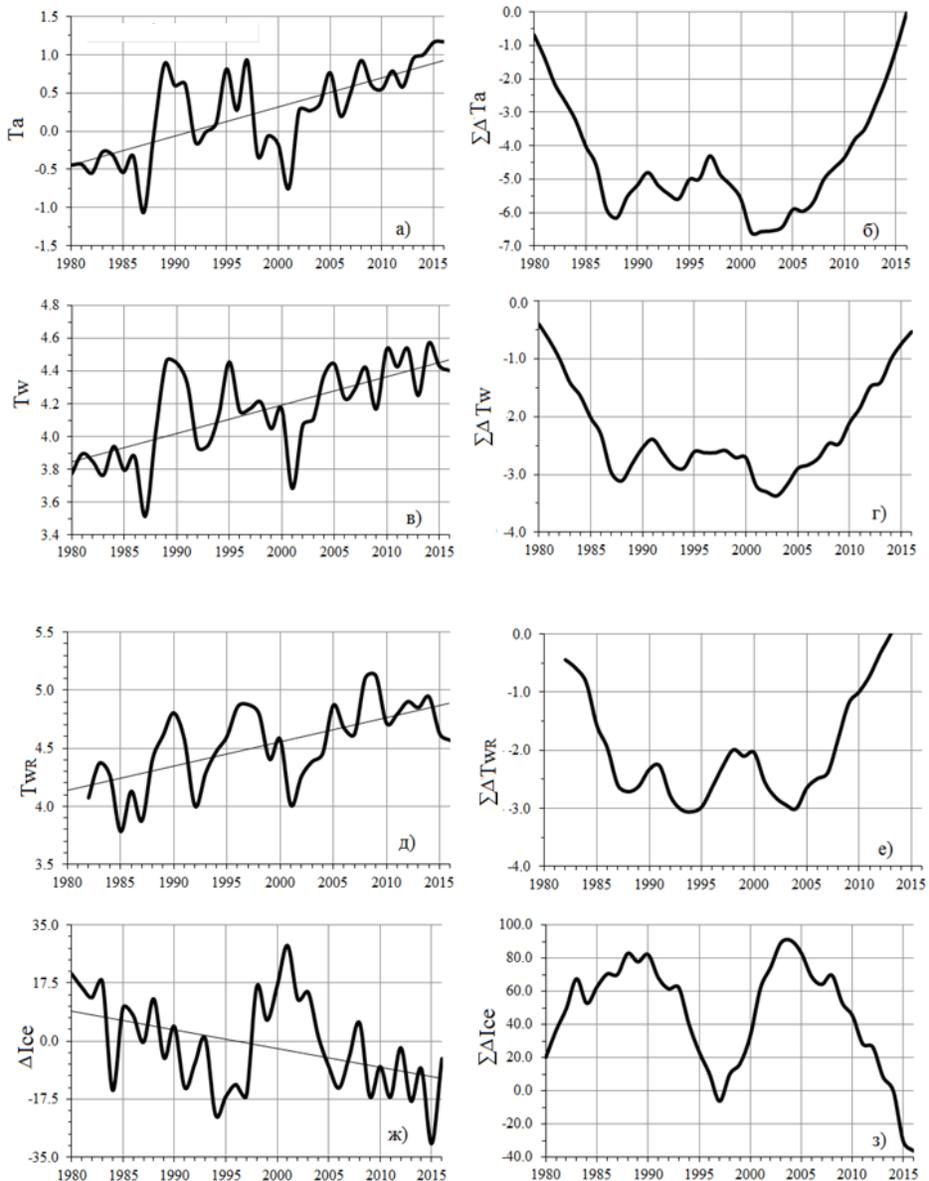


Рис. 2. Межгодовая изменчивость средних значений и накопленных аномалий температуры воздуха (а, б) и температуры воды (в, г) на ГМС; температуры воды по данным реанализа (д, е); аномалий и накопленных аномалий ледовитости в феврале (ж, з). На рис. а, в, д, ж показан линейный тренд

Fig. 2. Mean annual values and accumulated anomalies of air temperature (а, б), mean annual SST on coastal stations (в, г); mean annual SST and its accumulated anomalies by reanalysis (д, е); anomalies and accumulated anomalies of ice cover in February (ж, з). Linear trend is shown at panels а, в, д, ж

по данным реанализа (2, д, е), а также ледовитости (2, ж, з), полученные в результате осреднения данных по всем станциям или площади акватории моря в целом. Если колебания температуры отражают чередование теплых и холодных лет в рядах наблюдений, то интегральные кривые накопленных аномалий позволяют выделить низкочастотные составляющие и отдельные периоды в межгодовом ходе этих климатических параметров.

На рис. 2 видно, что колебания температуры воздуха (T_a) и воды (T_w и T_{wr}) квазисинхронны, а вариации аномалий ледовитости (Δlce) и T_a происходят в противофазе. Парные коэффициенты корреляции между рядами T_a/T_w и T_w/T_{wr} (рис. 2, а, в, д) высоки — 0,8–0,9, а между $T_a/\Delta lce$ этот коэффициент несколько меньше ($r = -0,6$). Наиболее значительные колебания температуры воды и воздуха происходили в период с конца 1980-х до начала 2000-х гг. Накануне этого периода в целом происходило накопление их отрицательных аномалий и преобладали положительные аномалии ледовитости, а в последующие 15 лет после него — постепенное потепление и уменьшение ледовитости (рис. 2, б, г, е, з). Череда теплых лет по температуре воздуха в середине рассматриваемого периода завершилась резким похолоданием после 1997 г., сопровождавшимся максимальным развитием ледяного покрова в 2001 г., что отмечалось другими авторами (Хен и др., 2008; Пономарев и др., 2013; Ustinova, Sorokin, 2013). Обобщенные по данным ГМС экстремально высокие среднегодовые величины температуры воды ($T_w > 4,4$ °C) отмечались в 1989/90, 1995, 2005 и в 2008–2016 гг. (за исключением 2009 и 2013 гг.), а наименьшие ($T_w < 3,8$ °C) — в 1980, 1983, 1987 и 2001 гг.

Совокупно по всем ГМС величина статистически значимых линейных трендов (КЛТ) температуры воздуха и воды (рис. 2, а, в) составляет соответственно 0,39 и 0,17 °C/10 лет, а по данным реанализа (T_{wr}) для всей акватории моря (рис. 2, д) величина КЛТ несколько больше — 0,20 °C/10 лет. По этим осредненным данным, как и для отдельных станций, наиболее быстрый рост T_w и T_{wr} наблюдался в теплый сезон (в среднем на 0,34 °C/10 лет на ГМС и на 0,44 °C/10 лет для всей акватории). В холодный сезон величина КЛТ пренебрежимо мала (0,09 °C/10 лет). Вклад трендовой составляющей в общую изменчивость температуры воздуха (дисперсию) на ГМС оценивается величиной $D = 49$ %. Она сопоставима с соответствующими оценками для северной части Японского моря (1980–2015 гг.) и Дальневосточного региона в целом (1976–2016 гг.). Для этих регионов $D = 34$ и 53 % при величине трендов соответственно 0,32 и 0,49 °C/10 лет (Ростов и др., 2016; Доклад..., 2017*). По данным ГМС для температуры воды Охотского моря $D = 46$ %.

Для анализа взаимосвязи пространственных изменений T_w были рассчитаны матрицы парных коэффициентов корреляции межгодовых колебаний температурных аномалий для всех станций. Для 52 % пар ГМС колебания среднегодовых значений ΔT_w характеризуются статистически значимыми положительными величинами корреляционной связи ($r = 0,33–0,91$). Наличие пространственных корреляционных связей, а также характер и тенденции межгодовых изменений температуры воды позволяют объединить соседние станции в отдельные группы и выделить в прибрежной зоне моря ряд обособленных по характеру климатических изменений районов.

Современные тенденции и региональные особенности климатических изменений в различных районах

Районирование проводилось методами кластерного анализа по трем главным компонентам разложения ЭОФ временных рядов среднегодовых аномалий температуры воды. Число выделенных районов лимитировалось общим количеством и характером пространственного распределения отобранных 22 ГМС. Всего было выделено четыре физико-географических района (см. рис. 1), расположенных в различных участках прибрежной зоны с заметно различающимися характеристиками гидрометеорологических условий**:

- в северной части Охотского моря (район СОМ);
- в северной части о. Сахалин (район СОС);

* Доклад... (2017).

** Гидрохимия и гидрология морей (1998).

— в юго-восточной части о. Сахалин (район ЮОС);

— южнокурильский район в южной части Охотского моря (район ЮКР).

В пределах каждого из выделенных районов величины парных коэффициентов корреляции между межгодовыми колебаниями аномалий температуры на отдельных станциях и осредненных по району в целом возросли до 0,65–0,97. Отмечено, что среднегодовые значения температуры воды растут от района к району с севера на юг от 2,8 (СОМ) до 6,2 °С (ЮКР), а величина положительного линейного тренда в этих районах — от 0,4 до 1,1 °С за 37 лет при одновременном увеличении дисперсии колебаний (табл. 2, рис. 3).

Таблица 2

Характер и тенденции межгодовых изменений температуры воды в прибрежных районах Охотского моря за период 1980–2016 гг.

Table 2

Year-to-year changes and long-term trends of the sea surface temperature in certain coastal areas of the Okhotsk Sea for 1980–2016

Район	Среднегодовая величина				Теплый сезон				Холодный сезон			
	$T_w \pm$	σ^2	R^2	КЛТ	$T_w \pm$	σ^2	R^2	КЛТ	$T_w \pm$	σ^2	R^2	КЛТ
СОМ	0,4	0,17	0,15	0,11	0,7	0,66	0,18	0,19	0,2	0,04	0,20	0,05
СОС	0,6	0,15	0,33	0,16	1,5	0,77	0,42	0,40	0,1	0,05	0,02	0,02
ЮОС	0,8	0,21	0,35	0,22	1,4	0,88	0,25	0,38	0,6	0,12	0,34	0,16
ЮКР	1,1	0,32	0,34	0,30	2,0	1,12	0,32	0,54	0,7	0,24	0,22	0,20
Все станции	0,6	0,19	0,47	0,17	1,3	0,79	0,50	0,34	0,3	0,08	0,29	0,09

Примечание. $T_w \pm$ — величина тренда за 37 лет, °С; σ^2 — дисперсия; R^2 — коэффициент детерминации; КЛТ — коэффициент линейного тренда, °С/10 лет.

В рядах наблюдений в группах ГМС, соответствующих выделенным районам, в разной степени выражены циклические колебания с периодами от 2–3 до 7–9 лет, характерные для повторяемости типов атмосферных процессов регионального и локального масштаба (Глебова, 2003; Пономарев и др., 2013; и др.). В последнее десятилетие, по мере постепенного увеличения средних значений температуры, амплитуда колебаний ΔT_w затухала, а величина дисперсии во всех районах в целом уменьшалась.

При этом наблюдается трехкратное увеличение скорости роста среднегодовой температуры воды (КЛТ) в направлении с севера на юг акватории моря от 0,11 (СОМ) до 0,30 °С/10 лет (ЮКР). Во всех районах коэффициенты линейного тренда достигают максимальных положительных значений в теплый период года, увеличиваясь в том же направлении от 0,19 до 0,54 °С/10 лет. В это время они почти в 2,0 раза больше среднегодовых и в 2,3–3,8 раза больше аналогичных оценок для холодного сезона (табл. 2). В этот сезон на станциях СОМ и СОС тренды очень малы или статистически не значимы.

Анализ кривых вариаций накопленных сумм среднегодовых аномалий за исследуемый период (рис. 3) позволяет выделить и сопоставить низкочастотные составляющие межгодового хода температуры на различных временных интервалах в выделенных районах. Интервалы спада этих кривых отражают процесс выхолаживания вод, стабилизации — варьирования около средних значений, а интервалы роста — тренд накопления тепла в результате совокупного воздействия разнообразных адвективных и климатических факторов. Хорошо заметны различия в интенсивности (размах колебаний) и характере протекания (синхронности колебаний) этого процесса между группами станций выделенных районов. На рис. 3 видно, что в южных районах, особенно в теплый период, эти процессы выражены более ярко. Быстрое и устойчивое накопление отрицательных аномалий происходит в начале «периода потепления» до 1987–1988 гг., а положительных — с 2002–2004 гг. по настоящее время. В переходный период с конца 1980-х и до начала 2000-х гг. в теплый сезон в изменениях $\sum \Delta T_w$ преобладали колебания с 4–6-летним периодом, а процесс накопления аномалий был ослаблен. Все районы, кроме акватории СОС, характеризуются сильными корреляционными связями межгодовых колебаний накопленных аномалий в теплый и холодный сезоны ($r \geq 0,8$). В районе же СОС они значительно ослаблены ($r = 0,4$). Эти особенности являются следствием

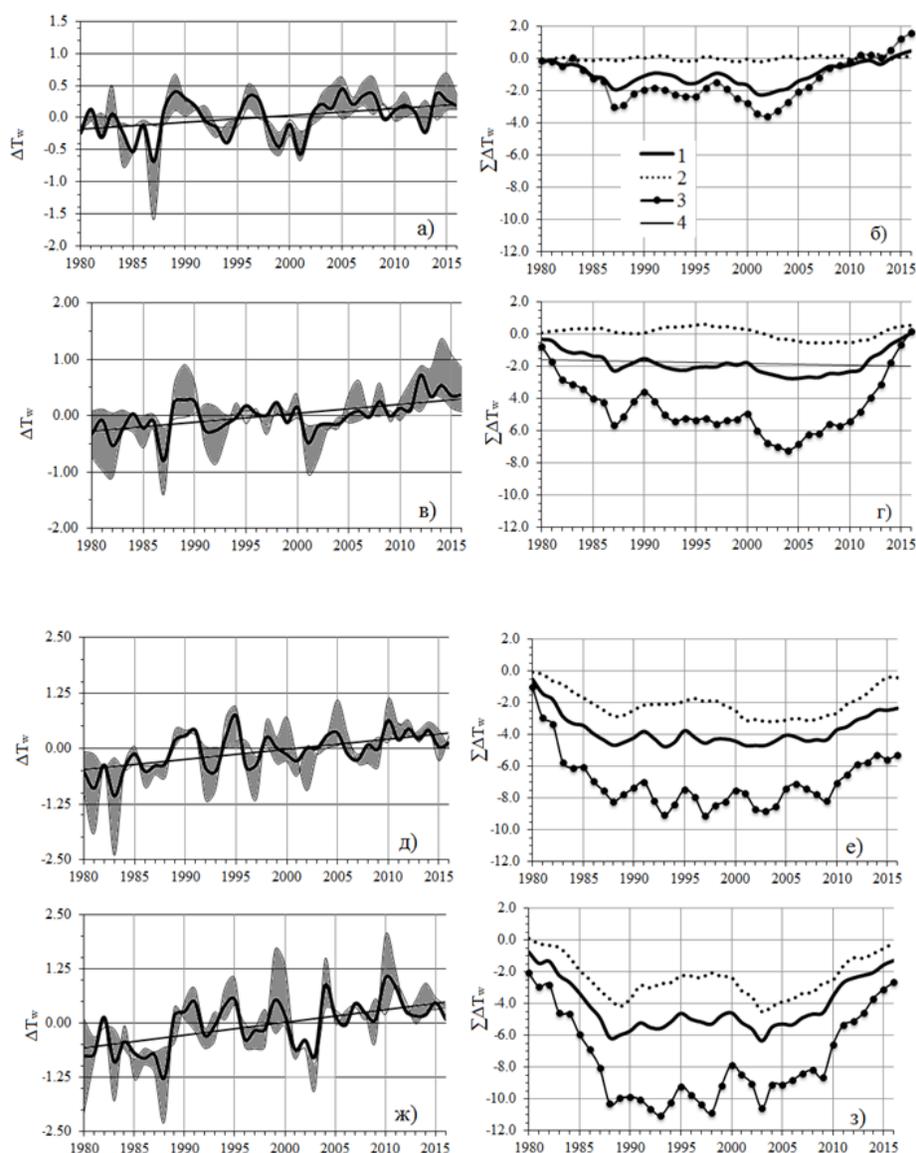


Рис. 3. Межгодовая изменчивость аномалий и накопленных аномалий температуры воды по районам: COM (а, б), СОС (в, г), ЮОС (д, е), ЮКР (ж, з); 1 — среднегодовые значения; 2, 3 — значения за теплый и холодный сезоны; 4 — линейный тренд

Fig. 3. SST and its accumulated anomalies, by areas of the coastal waters: northern Okhotsk Sea (а, б), the area at northern Sakhalin (в, г), the area at southern Sakhalin (д, е), South-Kuril area (ж, з); 1 — mean annual; 2 — warm season, 3 — cold season; 4 — linear trend

неоднозначности происходящих изменений климатических условий и циркуляционных факторов и требуют дальнейшего изучения.

Исходя из величины соотношения среднегодовых аномалий ΔT_w и стандартных отклонений $\sigma \Delta T_w$ (Терещенко, 1997; Карпова, Шатилина, 2000) были выделены годы, соответствующие 5 режимам теплового состояния вод: аномально холодные (АХ), холодные (Х), средние (нормальные — Н), теплые (Т) и аномально теплые (АТ). Результаты расчетов приведены в виде диаграммы для групп станций выделенных районов (рис. 4).

Как видно на рис. 4, периоды потепления и похолодания перемежаются во времени и охватывают одновременно обширные участки акваторий, принадлежащих к одному или нескольким районам. В многолетнем ходе температуры воды на фоне чередования

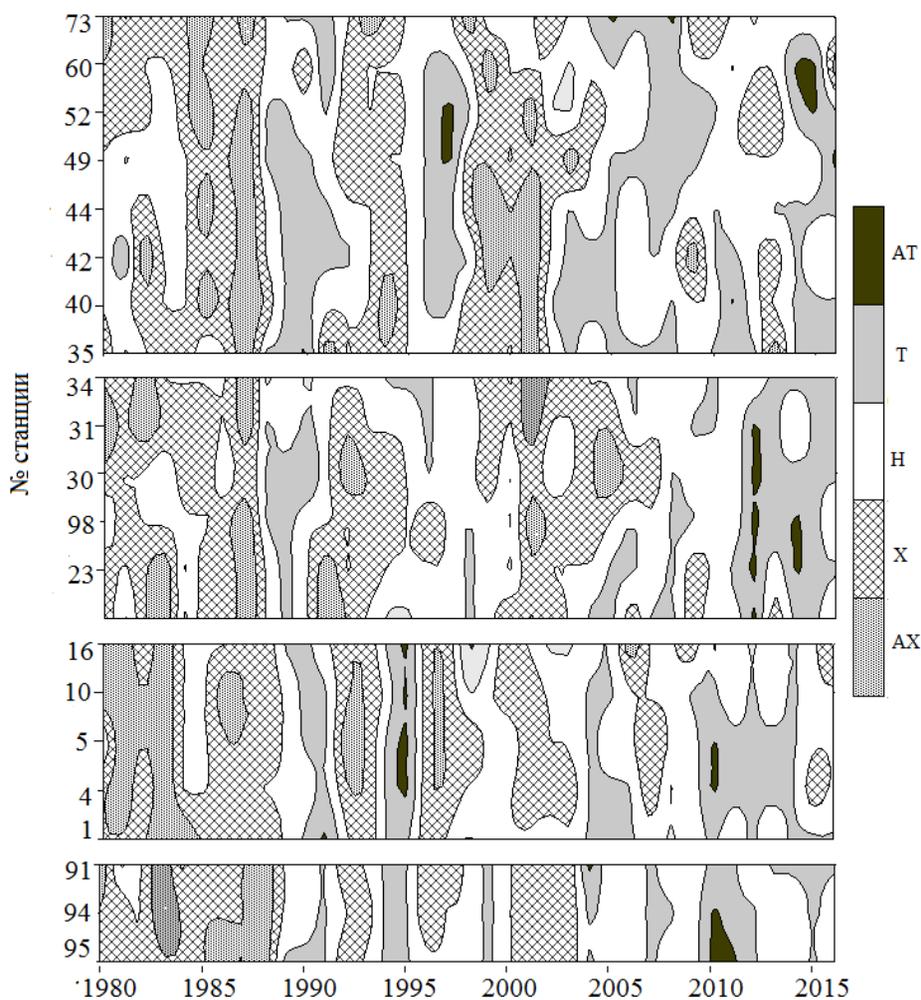


Рис. 4. Чередование периодов anomalно теплых (AT), теплых (T), нормальных (H), холодных (X) и anomalно холодных (AX) лет в выделенных районах прибрежной зоны Охотского моря (сверху вниз): COM, СОС, ЮОС, ЮКР

Fig. 4. Abnormally warm (AT), warm (T), normal (H) cold (X) and abnormally cold (AX) years in certain areas of the Okhotsk Sea coastal waters (the order from top to down: northern Okhotsk Sea, the area at northern Sakhalin, the area at southern Sakhalin, South-Kuril area)

«холодных» и «теплых» периодов четко выражена общая тенденция потепления вод прибрежных районов, которая особенно заметна в последнее десятилетие (табл. 3).

Таблица 3

Повторяемость (количество) лет с наблюдениями anomalных режимов теплового состояния вод на прибрежных станциях за десятилетний период, %

Table 3

Frequency (percentage of years with observations) of abnormal thermal conditions at coastal stations, by decades

Период, годы	AX	X	T	AT
1980–1989	19	32	15	1
2007–2016	1	6	46	9

Анализ структуры межгодовых изменений температуры воды

Межгодовые пространственно-временные вариации температуры воды отражают результат взаимодействия большого числа разномасштабных процессов, происходящих

в море и атмосфере. Для выявления наиболее важной информации о структуре этих вариаций были вычислены ЭОФ среднегодовых аномалий ΔT_w для всех ГМС. Был проведен взаимный корреляционный анализ временных рядов компонентов ЭОФ и индексов атмосферной циркуляции, характеризующих динамику климатической системы северо-западной части Тихого океана. Полученные результаты были сопоставлены с аналогичными оценками для поля температурных аномалий по данным реанализа для всей акватории моря.

Выявлено, что первые три моды аккумулируют 63–72 % информации об изменчивости среднегодовых и сезонных значений температуры воды на прибрежных ГМС, расположенных по периметру моря. Эти оценки, а также соотношение величин вклада каждой из главных компонентов (моды) в суммарную дисперсию колебаний T_w сопоставимы с аналогичными оценками для акватории открытого моря (табл. 4). Главные компоненты дают наиболее полное представление об особенностях крупномасштабной межгодовой изменчивости термических полей исследуемого района (Лучин, Матвеев, 2016).

Таблица 4

Вклад первых трех собственных векторов ЭОФ разложения полей аномалий температуры в дисперсию межгодовых изменений по данным наблюдений на ГМС и реанализа, %

Table 4

Contribution of the first three vectors of EOF decomposition of SST anomaly fields in dispersion of its year-to-year variability, by observations on coastal stations and reanalysis data, %

Показатель	Данные ГМС			
	C1	C2	C3	ΣC
ЭОФ				
Среднегодовые	43	18	8	69
Теплый сезон	39	16	8	63
Холодный сезон	56	9	7	72
	Данные реанализа			
ЭОФ	CC1	CC2	CC3	ΣCC
Среднегодовые	56	14	9	79
Теплый сезон	53	16	11	80

Выделенная первая мода в прибрежной зоне (C1) описывает 43 % общей дисперсии среднегодовых колебаний T_w , а в теплый и холодный сезоны — 39 и 56 %. Особенности временного хода T_w хорошо коррелируются с колебаниями временных коэффициентов первой моды разложения. Величины коэффициента корреляции тех же переменных ($\Delta T_w/C1$) для их среднегодовых и сезонных значений составляют соответственно 0,96, 0,92 и 0,74. По данным реанализа по всей акватории моря в целом вклад главной составляющей (CC1) в пространственно-временную изменчивость поля температуры несколько выше — 53–56 %. Вклад второй и третьей мод (C2, C3 и CC2, CC3) в суммарную изменчивость быстро уменьшается.

Взаимосвязь колебаний главных компонентов ЭОФ, рассчитанных по рядам наблюдений на ГМС и данным реанализа (рис. 5, а, б), характеризуется высокими значениями корреляции ($r = 0,7$). По данным наблюдений на ГМС в прибрежной зоне статистически значимые положительные трендовые составляющие в анализируемых рядах временных коэффициентов ЭОФ присутствуют только в первой моде. Судя по величине КЛТ, процессы, описываемые этой модой, получают максимальное развитие в течение теплого сезона. По данным реанализа на всей акватории моря значимые положительные тренды выделялись в изменениях КЛТ как первой, так и третьей мод. В холодный сезон по данным ГМС и реанализа в распределении временной составляющей третьей моды выделяется незначительный отрицательный тренд.

По данным наблюдений на ГМС поле пространственного распределения коэффициентов первого компонента в прибрежной зоне представлено только положительными значениями, что свидетельствует о синхронности колебаний T_w различной интенсив-

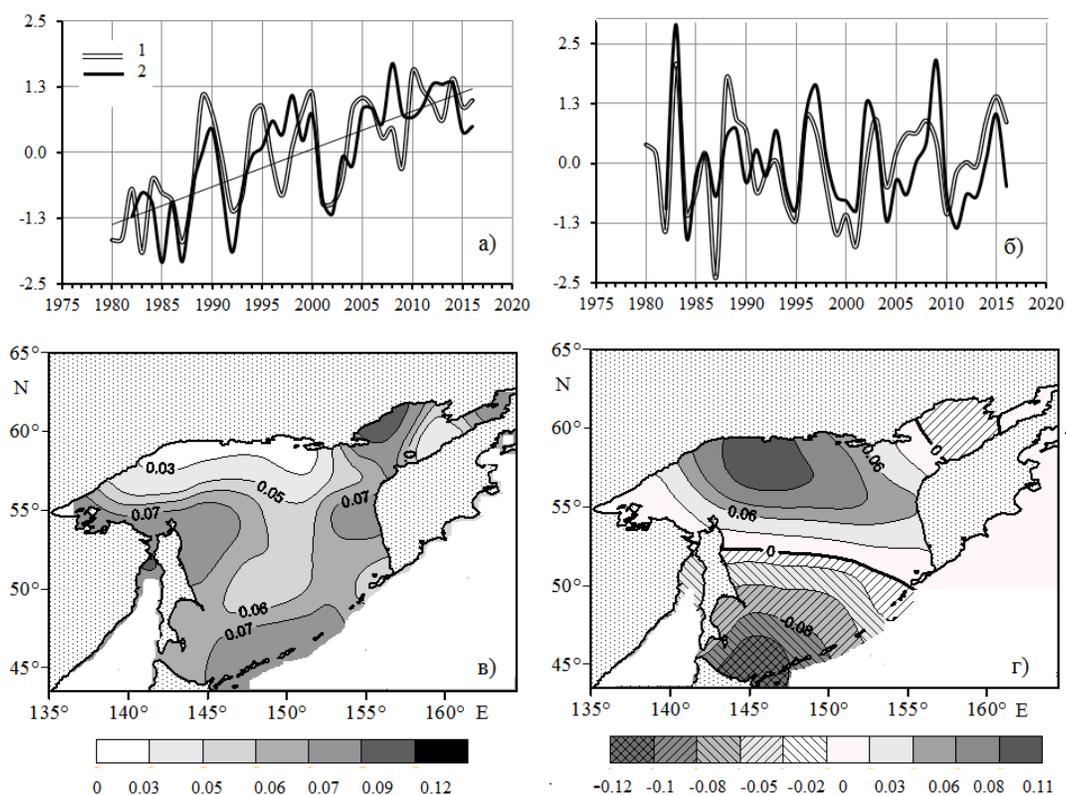


Рис. 5. Временной ход первой и второй мод ЭОФ по данным наблюдений на ГМС (1) и реанализа (2) в теплый период года (а, б); пространственное распределение первой и второй мод в теплый период года по данным реанализа (в, г). На рис. а показан линейный тренд

Fig. 5. Temporal coefficients of the first and second EOF modes (а, б) in warm season, by observations on coastal stations (1) and by reanalysis data (2); spatial distribution of the first and second modes in warm season by for reanalysis data (в, г). Linear trend is shown at panel а

ности по всему периметру моря. Области повышенных значений коэффициентов разложения формируются южнее 56° с.ш., охватывая главным образом группы станций районов СОС, ЮОС и ЮКР. При этом величина этих коэффициентов пропорциональна величине тренда температуры (КЛТ) на каждой станции ($r = 0,9$, см. табл. 1).

Второй и третий компоненты подобных разложений обычно характеризуют более сложные связи межгодовых колебаний в сопредельных или удаленных районах (Лучин, Матвеев, 2016). В пространственном распределении коэффициентов второй моды отражена противофазность этого процесса в прибрежной зоне южной части моря (районы ЮКР и ЮОС) по отношению к северной (районы СОС и СОМ), а третьей моды — в юго-западной (районы ЮОС и СОС) по отношению к юго-восточной и северной (ЮКР и СОМ). Статистически значимая корреляционная связь синфазных и противофазных изменений временных рядов коэффициентов этих компонентов ЭОФ с трендовой составляющей ΔT_w проявляется во всех выделенных районах. Как видно на рис. 5 (в, г), эти особенности отражают соответствующие изменения, происходящие на всей акватории моря.

*Корреляционные связи между изменениями термических условий
и атмосферными процессами*

Отмеченные особенности пространственно-временной изменчивости поля температуры являются результатом комбинации различных факторов и сложного взаимодействия процессов регионального и локального масштабов. Для их выявления и оценки широко используются данные о временной динамике и корреляционных

связях колебаний региональных климатических параметров и климатических индексов (КИ), позволяющих оценить влияние крупномасштабных, планетарных процессов и низкочастотных составляющих на межгодовую изменчивость термических условий исследуемого района (Хен и др., 2008; Лучин, Матвеев, 2016; и др.). К числу наиболее информативных КИ относятся индекс тихоокеанского декадного колебания (PDO), северо-тихоокеанский (NPI) и западно-тихоокеанский (WP), индексы южного (SOI) и арктического колебаний (АО), региональный индекс летнего охотоморского максимума (ОКН), характеризующего интенсивность летнего охотского антициклона. Колебания КИ в многолетнем ходе нерегулярны, а их амплитудные и частотные характеристики изменяются в силу нелинейности системы океан–атмосфера. Колебания с периодичностью 2–3, 5–6, 8–35 лет вообще свойственны динамике атмосферы северо-тихоокеанского региона (Пономарев и др., 2007; и др.). На региональном и локальном уровнях влияние колебаний КИ на климат проявляется в изменении повторяемости и чередовании теплых и холодных климатических периодов, определяемых типами атмосферных процессов и их сезонными особенностями (Глебова, 2003; Глебова и др., 2009). Между индексами, характеризующими состояние как термического, так и барического полей, имеются прямые и обратные взаимосвязи, о чем свидетельствуют рассчитанные коэффициенты корреляции (табл. 5).

Таблица 5

Корреляционные коэффициенты межгодовых колебаний климатических индексов за теплый период 1980–2016 гг.

Table 5

Correlation coefficients between year-to-year fluctuations of climatic indices for warm season in 1980–2016

	PDO	NPI	WP	SOI	АО	ОКН
PDO	1	-0,2	-0,2	-0,5	-0,2	0,5
NPI		1	0,3	0,2	0,4	0,3
WP			1	0,0	0,4	-0,3
SOI				1	0,2	-0,2
АО					1	0,0
ОКН						1

Примечание. Жирным шрифтом выделены значимые величины.

В теплый сезон, для которого тенденции изменений большинства этих переменных хорошо выражены, статистически значимые отрицательные коэффициенты корреляции связывают колебания индексов PDO/SOI, а положительные — PDO/ОКН, АО/NPI и АО/WP. Оценки величины и значимости этих корреляционных связей могут различаться для разных сезонов и временных периодов, а механизмы соответствующих атмосферных процессов сложны и требуют самостоятельного рассмотрения. Отметим, что в рассматриваемый период в ходе межгодовых изменений отдельных индексов присутствовали статистически значимые положительные и отрицательные трендовые составляющие. Так, если отрицательный тренд был выявлен только для среднегодовых величин PDO, то в теплый сезон отрицательные тренды отмечались уже в ходе четырех индексов — PDO, NPI, АО и ОКН. В холодный сезон знак трендовой составляющей межгодовых флюктуаций NPI изменился на противоположный, а для других индексов тренд отсутствовал. После периода преимущественно «холодной фазы» PDO (1947–1976 гг.) с 1977 до конца 1980-х гг. наблюдалась устойчивая положительная фаза состояния PDO (Mantua et al., 1997), затем следовали интервалы чередования положительных и отрицательных аномалий при общей тенденции уменьшения индекса и усиления холодной фазы. При сравнении рис. 2 и 6 видно, что синфазные колебания индексов PDO и ОКН ($r = 0,5$, табл. 5) и накопление их положительных аномалий сопровождалось похолоданием в исследуемом районе и накоплением отрицательных аномалий температуры воды и воздуха и наоборот. Характерные точки перегиба этих кривых, указывающие на различные фазы хода накопленных аномалий, отмечены на

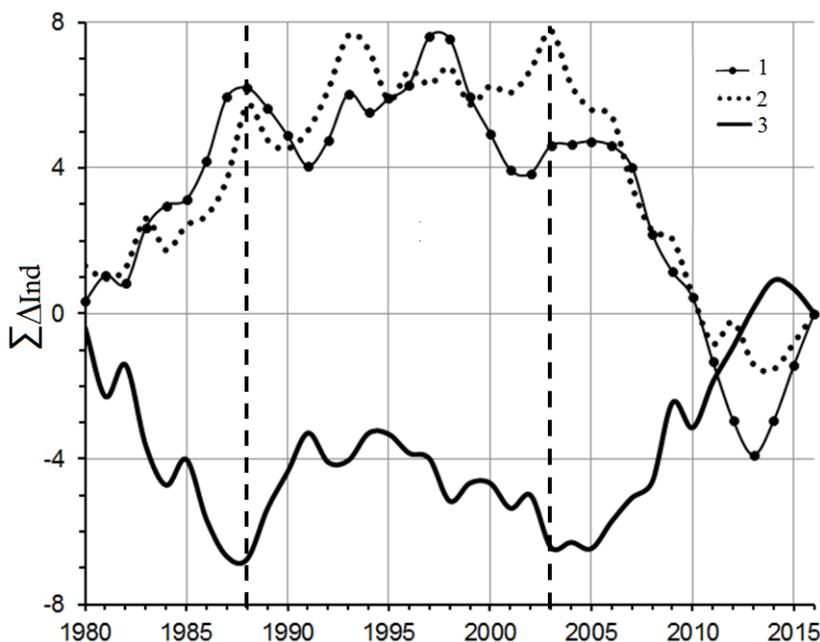


Рис. 6. Нормированные накопленные аномалии климатических индексов: 1 — PDO (среднегодовое); 2 — ОКН (июль-сентябрь); 3 — NPI (ноябрь-март)

Fig. 6. Normalized accumulated anomalies of climatic indices: 1 — PDO (mean annual); 2 — ОКН (July-September); 3 — NPI (November-March)

рис. 6 пунктирной линией. Изменения среднегодовых величин PDO/SOI и PDO/NPI (NPI за холодный сезон) также происходили синхронно, но в противофазе.

В холодный период статистически значимый положительный тренд выражен только в межгодовом ходе индекса NPI. Положительные величины этого индекса указывают на ослабление Алеутской депрессии, а отрицательные — на усиление (углубление). Действительно, с конца 1970-х гг. и до 1987 г. происходило накопление отрицательных аномалий NPI (рис. 6), углубление Алеутской депрессии (Макагонова, 2013), обострение барического градиента между ней и сибирским максимумом, сопровождавшиеся усилением зимнего муссона (Глебова, 2011) и накоплением отрицательных аномалий температуры воздуха и воды (см. рис. 2, 3). Позднее эта тенденция изменилась, и с 2003 г. начался процесс накопления положительных аномалий. В теплый сезон повышение температуры в Охотском море происходит на фоне ослабления летнего муссона и формирования благоприятных условий для сезонного прогрева (Глебова и др., 2009).

Одновременно с этими изменениями NPI с начала 2000-х гг. отмечалось преобладание отрицательной фазы вариаций западнотихоокеанского индекса (WP), что обычно сопровождается потеплением в Восточной Сибири. А судя по изменениям индекса ОКН, в период 1980–1988 гг. охотский антициклон, являющийся сезонным ЦДА, был наиболее интенсивным, а с 2003 по 2013 г. он ослабевал. При слабовыраженном охотском антициклоне наблюдаются усиление циклонической активности над северо-западной частью Тихого океана, выход циклонов и вынос теплых воздушных масс на акваторию Охотского моря (Шатилина и др., 2016). Эти процессы происходят синхронно с межгодовыми изменениями температуры (см. рис. 2) и являются следствием изменения давления в климатических ЦДА, их смещения и тесных связей с крупномасштабными колебаниями в системе океан–атмосфера всей северной части Тихого океана (Пономарев и др., 2007; и др.).

С целью выявления наиболее информативных показателей воздействия этих процессов на термические условия региона были рассчитаны коэффициенты линейной корреляции между межгодовыми изменениями аномалий температуры воды, климатическими индексами и временными коэффициентами мод ЭОФ (табл. 6).

Таблица 6

Коэффициенты корреляции между межгодовыми колебаниями климатических индексов, аномалий температуры и временных рядов компонентов (мод) ЭОФ за период 1980–2016 гг.

Table 6

Correlation coefficients between year-to-year fluctuations of climatic indices, SST anomalies and temporal coefficients of EOF modes in 1980–2016

Показатель	PDO	NPI	WP	SOI	AO	ОКН
ΔT_w	-0,4	0,3	-0,3	0,3	0,2	-0,5
$\Delta T_{w(t)}$	-0,4	0,4	-0,2	0,4	0,3	-0,5
$\Delta T_{w(x)}$	-0,2	0,3	-0,2	0,0	0,2	-0,3
ΔT_{wr}	-0,4	0,2	-0,3	0,4	0,0	-0,4
Среднегодовые ΔT_w по районам						
СОМ	0,0	0,0	-0,5	0,2	0,3	-0,2
СОС	-0,2	0,3	-0,4	0,4	0,2	-0,2
ЮООС	-0,5	0,4	0,0	0,2	0,1	-0,5
ЮОКР	-0,5	0,4	0,1	0,2	0,2	-0,7
$\Delta T_{w(t)}$ в теплый сезон по районам						
СОМ	-0,1	0,1	-0,4	0,2	0,3	-0,2
СОС	-0,3	0,4	-0,2	0,4	0,3	-0,2
ЮООС	-0,5	0,4	0,1	0,3	0,0	-0,5
ЮОКР	-0,5	0,3	0,1	0,3	0,1	-0,7
ЭОФ						
С1	-0,5	0,4	-0,2	0,3	0,2	-0,6
С2	0,3	-0,2	-0,5	0,1	0,2	0,2
С3	0,1	-0,2	0,1	-0,2	0,1	-0,3

Примечание. ΔT_w — среднегодовые аномалии по данным всех ГМС; $\Delta T_{w(t)}$, $\Delta T_{w(x)}$ — то же за теплый и холодный сезоны; ΔT_{wr} — среднегодовые аномалии по данным реанализа. Жирным шрифтом выделены значимые величины.

В целом по району статистически значимые (отрицательные) линейные корреляционные связи между колебаниями среднегодовых значений ΔT_w , T_{wr} (рис. 2, в, д) и среднегодовых КИ проявляются только в ходе PDO и ОКН. В теплый сезон становятся значимыми положительные связи аномалий температуры с индексами NPI и SOI, а отрицательные — сохраняются для PDO и ОКН. В холодный сезон они отсутствуют (табл. 6). В этом может проявляться влияние особенностей ледового режима моря и преимущественный вклад аномалий теплого периода в среднегодовые значения, что отмечалось выше.

Корреляционные связи между рядами среднегодовых значений ΔT_w , осредненных по группам станций выделенных районов (рис. 3), с колебаниями КИ проявляются по-разному. На севере моря (район СОМ) значимыми являются только противофазные связи колебаний температуры с индексом WP, в районе северного Сахалина (СОС) — противофазные с WP и синфазные с SOI (характеризующим атмосферную составляющую Эль-Ниньо), а в южной и юго-западной частях (ЮОКР, ЮООС) — отрицательные PDO и ОКН и положительные с NPI. В теплый сезон для районов СОМ, ЮОКР и ЮООС характеристики этих связей не меняются. В районе же СОС влияние SOI сохраняется, WP ослабевает, а NPI усиливается (табл. 6). В холодный сезон значимые связи между изменениями температуры и рассматриваемых КИ отсутствуют. Во всех районах и во все сезоны года эта связь не проявляется также с индексом АО. С 2013–2014 гг. наблюдается смена фазы колебаний индексов PDO, NPI, ОКН, сопровождающаяся небольшим уменьшением температуры воды после 2014 г. (см. рис. 2, 3, 6). Однако это не является достаточным основанием для утверждения о начале очередной смены климатического режима.

Как следует из данных табл. 6, в формировании первой моды ЭОФ разложения, описывающей однонаправленные изменения температуры воды в пределах всей акватории моря, участвуют крупномасштабные процессы, параметризуемые климатическими индексами PDO, NPI и ОКН. Временные коэффициенты второй моды, характеризу-

ющей противофазные межгодовые колебания ΔT_w на севере и юге, коррелированы только с процессами, описываемыми индексом WP. Статистически значимые связи с какими-либо индексами для третьей и более высоких мод ЭОФ не выявлены. По среднемноголетним данным линейная корреляция временных рядов первых трех мод ЭОФ разложений и индексов арктического и южных колебаний в прибрежной зоне никак не проявляется.

Заключение

Проведенные исследования изменчивости термических условий прибрежных акваторий Охотского моря позволили выявить и уточнить основные характеристики, современные тенденции, региональные особенности и возможные причинно-следственные связи межгодовых изменений поверхностной температуры воды с климатическими параметрами за последние четыре десятилетия.

В межгодовом ходе среднегодовой температуры на прибрежных ГМС с 1977 по 2016 г. преобладали колебания с периодом 2–5 лет и присутствовали более долговременные циклы однонаправленных изменений. Они соответствовали фазам похолодания (примерно 1977–1987 гг.), потепления (2004–2016 гг.) и переходного режима (1988–2003 гг.), внутри которых происходило устойчивое накопление отрицательных, положительных аномалий температуры или замедление этого процесса. Эти изменения хорошо согласуются с соответствующими фазами вариаций температуры воздуха на ГМС, температуры воды на всей акватории моря и ледовитости.

На фоне общего «потепления» климатических условий в морях дальневосточного бассейна, происходящего с конца 1970-х гг. и связанного с глобальными изменениями, в межгодовом ходе температуры воды на большинстве ГМС в прибрежных районах Охотского моря прослеживаются значимые трендовые составляющие. Они по-разному проявляются в пределах рассматриваемого региона и в различные сезоны.

В процессе чередования «холодных» и «теплых» периодов в последние 10–15 лет четко выражена общая тенденция потепления вод прибрежных районов. Обобщенно по всем станциям, расположенным по периметру прибрежной зоны, скорость роста среднегодовых температур составила $0,17\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет, а на отдельных станциях она была в 1,5–2,0 раза выше. Максимальный вклад в увеличение среднегодовой температуры воды вносит теплый сезон, когда оценки тренда возрастают примерно в 2 раза. В холодный сезон они в 2 раза меньше среднегодовых. В выделенных, сравнительно обособленных по характеру климатических изменений районах оценки величин КЛТ возрастают в направлении от более северных к южным примерно в 3 раза. Вклад тренда температуры воды в ее межгодовую изменчивость в среднем описывает 46 % общей дисперсии.

Анализ структуры межгодовых изменений температуры воды показал, что особенности временного хода T_w хорошо коррелированы с колебаниями временных коэффициентов первой моды ЭОФ разложения, которая описывает 43 % общей дисперсии среднегодовых колебаний температуры. Процессы, описываемые этой модой, получают максимальное развитие в течение теплого сезона. Колебание главных компонентов ЭОФ, рассчитанных по рядам наблюдений на ГМС и данным реанализа для всей акватории моря, характеризуется тесными корреляционными связями. В формировании первой моды, которая описывает однонаправленные изменения температуры воды в пределах всей акватории моря, участвуют крупномасштабные процессы, параметризуемые климатическими индексами PDO, NPI и ОКН.

Межгодовые изменения ΔT_w и основных КИ в разных районах и в различные сезоны характеризуются сложными причинно-следственными связями. В целом по району статистически значимые отрицательные линейные корреляционные связи между колебаниями ΔT_w и КИ проявляются только в ходе PDO и ОКН. В теплый сезон становятся значимыми положительные связи аномалий температуры с индексами NPI и SOI, а отрицательные — сохраняются. В холодный — они практически отсутствуют. Изменения накопленных аномалий величин ΔT_w , PDO, ОКН, NPI и SOI, отражающие более долговременные тенденции изменений, тесно взаимосвязаны.

Список литературы

- Веселова Л.Е.** Особенности годового хода температуры воды на поверхности в южной части Охотского моря // Тр. ДВНИГМИ. — 1975. — Т. 50. — С. 38–56.
- Глебова С.Ю.** Типы атмосферных процессов над дальневосточными морями, межгодовая изменчивость их повторяемости и сопряженности // Изв. ТИНРО. — 2003. — Т. 134. — С. 209–257.
- Глебова С.Ю.** Циклоническая деятельность над Азиатско-Тихоокеанским регионом зимой и ее влияние на термические условия дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана // Метеорол. и гидрол. — 2011. — № 10. — С. 35–43.
- 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.
- 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.
- Кендалл М., Стюарт А.** Многомерный статистический анализ и временные ряды : моногр. — М. : Наука, 1976. — 736 с.
- Кляшторин Л.Б., Любушин А.А.** Циклические изменения климата и рыбопродуктивности : моногр. — М. : ВНИРО, 2005. — 235 с.
- Лучин В.А., Матвеев В.И.** Межгодовая изменчивость термического состояния холодного подповерхностного слоя Охотского моря // Изв. ТИНРО. — 2016. — Т. 187. — С. 205–216.
- Макагонова М.А.** Особенности зимней атмосферной циркуляции в Восточной Азии // География и природные ресурсы. — 2013. — № 3. — С. 18–26.
- Обухов А.М.** О статистически ортогональных разложениях эмпирических функций // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. — 1960. — № 3. — С. 432–439.
- Плотников В.В., Мезенцева Л.И., Дубина В.А.** Циркуляция атмосферы над Дальним Востоком и ее отражение в ледовых условиях : моногр. — Владивосток : Дальнаука, 2015. — 160 с.
- 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.
- Пономарев В.И., Каплуненко Д.Д., Дмитриева Е.В. и др.** Климатические изменения в северо-западной части Азиатско-Тихоокеанского региона // Дальневосточные моря России. Кн. 1 : Океанологические исследования. — М. : Наука, 2007. — С. 17–48.
- Ростов И.Д., Рудых Н.И., Ростов В.И., Воронцов А.А.** Тенденции климатических и антропогенных изменений морской среды прибрежных районов России в Японском море за последние десятилетия // Изв. ТИНРО. — 2016. — Т. 186. — С. 163–181.
- Терещенко В.В.** Сезонные и межгодовые изменения температуры и солености воды основных течений на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море : моногр. — Мурманск : ПИНРО, 1997. — 70 с.
- Устинова Е.И., Сорокин Ю.Д., Хен Г.В.** Межгодовая изменчивость термических условий Охотского моря // Изв. ТИНРО. — 2002. — Т. 130. — С. 44–51.
- 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.
- Шатилина Т.А., Анжина Г.И.** Изменчивость интенсивности дальневосточного муссона в 1948–2010 гг. // Изв. ТИНРО. — 2011. — Т. 167. — С. 146–159.
- Шатилина Т.А., Кравченко Р.Б.** Результаты классификации временного ряда температуры воды в Южно-Курильском районе и связь с региональными атмосферными индексами // Изв. ТИНРО. — 2013. — Т. 172. — С. 208–223.
- 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. // Метеорол. и гидрол. — 2016. — № 1. — С. 17–28.
- Шунтов В.П.** Биология дальневосточных морей России : моногр. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2001. — Т. 1. — 580 с.
- Шунтов В.П., Бочаров Л.Н., Волвенко И.В. и др.** Экосистемное изучение биологических ресурсов дальневосточных морских вод России: некоторые результаты исследований в конце 20 — начале 21-го столетия // ТИНРО—85. Итоги десятилетней деятельности. 2000–2010 гг. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2010. — С. 25–78.
- Шунтов В.П., Дулепова Е.П., Темных О.С. и др.** Глава 2. Состояние биологических ресурсов в связи с динамикой макроэкосистем в дальневосточной российской экономической

зоне // Динамика морских экосистем и современные проблемы сохранения биологического потенциала морей России. — Владивосток : Дальнаука, 2007. — С. 75–176.

Шунтов В.П., Темных О.С. Иллюзии и реалии экосистемного подхода к изучению и управлению морскими и океаническими биологическими ресурсами // Изв. ТИНРО. — 2013. — Т. 173. — С. 3–29.

Ding C., He X. K-means clustering via principal component analysis // Proc. 21st Intern. Conf. on machine learning. — Banff, Canada : ACM Press, 2004. — P. 225–232. DOI: 10.1145/1015330.1015408.

Gladyshev S., Talley L., Kantakov G. et al. Distribution, formation, and seasonal variability of Okhotsk Sea Mode Water // J. Geophys. Res. — 2003. — Vol. 108, № C6. — P. 17-1–17-21. DOI: 10.1029/2001JC000877.

Jackson J.E. A user's guide to principal components. — N.Y. : John Wiley and Sons, ink, 1991. — 592 p.

Luchin V., Kruts A., Sokolov O. et al. 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 p. (DVD Disc).

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, Iss. 6. — P. 1069–1079. DOI: 10.1175/1520-0477(1997)078.

Ogi M., Tachibana Y., Yamazaki K. The connectivity of the winter North Atlantic Oscillation (NAO) and the summer Okhotsk High // J. Meteor. Soc. Japan. — 2004. — Vol. 82, № 3. — P. 905–913.

Ohshima K.I., Nakanowatari T., Riser S. et al. Freshening and dense shelf water reduction in the Okhotsk Sea linked with sea ice decline // Prog. Oceanog. — 2014. — Vol. 126. — P. 71–79. DOI: 10.1016/j.pcean.2014.04.020.

Reynolds R.W., Rayner N.A., Smith T.M. et al. An improved in situ and satellite SST analysis for climate // J. Climate. — 2002. — Vol. 15, Iss. 13. — P. 1609–1625. DOI: 10.1175/1520-0442(2002)015.

Ustinova E.I., Sorokin Yu.D. Recent state and variability of climate and oceanographic conditions in the Far-Eastern Seas // Ecology of the marginal seas and their basins : materials of the Intern. Scient. Conf. — Vladivostok : FEFU, 2013. — С. 343–352.

Поступила в редакцию 21.07.17 г.

Принята в печать 23.10.17 г.