

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СЕЗОННЫЕ И МЕЖГОДОВЫЕ ВАРИАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА В РАЙОНЕ СЕВЕРНЫХ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2025 г. Г. В. Шевченко^{1,2, *}, Ж. Р. Цхай¹, Д. М. Ложкин¹

¹Сахалинский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («СахНИРО»), Южно-Сахалинск, Россия

²Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук,
Южно-Сахалинск, Россия

*E-mail: shevchenko_zhora@mail.ru

Поступила в редакцию 06.05.2024 г.

Проанализированы средние месячные значения температуры поверхности океана в районе северных Курильских островов за 1998–2022 гг. На основе 25-летнего ряда наблюдений для каждого месяца построены нормы – средние многолетние распределения. Показано, что на прибрежном участке акватории от о. Симушир до Четвертого Курильского пролива в летний период формируется область холодного пятна с очень низкими температурами (около 6°C) и малыми амплитудами годового хода (около 3°C). Сезонные колебания характеризуются годовым ходом с максимальными значениями в августе–сентябре и минимальными в феврале–марте. В целом по району они хорошо описываются комбинацией годовой и полугодовой гармоник с амплитудами 4.9 и 1.1°C соответственно. Межгодовая изменчивость отражена в вариациях летних максимумов с периодом около шести лет. В летне-осенний период вне области холодного пятна отмечается устойчивый тренд к повышению температуры, наиболее значимый в северо-западной части Тихого океана (около 1°C за 25 лет). В зимне-весенний сезон в Охотском море наблюдается обратная ситуация с тенденцией на снижение термических показателей. При расчете отклонений средних месячных температур от нормальных величин выявлено, что в районе Северных Курил возможно формирование масштабных зон со значительными температурными аномалиями, преимущественно отрицательными, которые могут представлять серьезную опасность для гидробионтов.

Ключевые слова: термический режим, аномалии температуры, линейный тренд, гармонический анализ, метод естественных ортогональных функций, п-ов Камчатка, Охотское море, северо-западная часть Тихого океана

DOI: 10.31857/S0205961425010078, EDN: DIECFP

ВВЕДЕНИЕ

Акватория, прилегающая к северным Курильским островам и юго-восточной Камчатке, имеет важнейшее промысловое значение. Здесь вылавливается значительное количество промысловых видов рыб и беспозвоночных – тихоокеанские лососи, минтай, треска, сельдь, навага, камбалы, крабы (камчатский, синий, стригун бэрди) и т.п. По этой причине исследование особенностей гидрологического режима данной акватории, сезонной и межгодовой изменчивости океанологических условий представляет значительный интерес.

Сравнительно немногочисленные исследования основаны преимущественно на результатах судовых океанологических съемок (Копо, Kawasaki, 1997; Кантаков, 2000; Самко, Новиков, 2004). Существенно больше работ посвящено более обширной акватории северо-западной части Тихого

океана (СЗТО), в которых проанализирован широкий спектр данных, включая метеорологическую информацию (Joyce, Dunworth-Baker, 2003; Хен и др., 2004; Рогачев, Шлык, 2005; Глебова и др., 2009; Бышев и др., 2016; Ростов и др., 2020, 2021; Цхай и др., 2022). Ряд работ посвящен климатическим изменениям в Охотском море (Гидрометеорология..., 1998; Хен и др., 2008, 2022; Ростов и др., 2017; Зуенко и др., 2019; Ложкин, Шевченко, 2019, 2022). В своей статье В.И. Бышев с соавторами (2016) констатировали весьма сложный характер термических вариаций в СЗТО.

Аналогичный вывод можно сделать и в отношении Охотского моря, где, по материалам океанологических зондирований, отмечались повышение теплосодержания в различных слоях, уменьшение глубины зимней конвекции и интенсивности геострофических потоков (Зуенко и др., 2019). Этот вывод относился преимущественно к восточной

части бассейна, где исследования “ТИНРО” *in situ* наиболее детальны. В то же время, по данным спутниковых наблюдений, в западной части Охотского моря наблюдалось устойчивое снижение температуры поверхностного слоя зимой и весной (Ложкин, Шевченко, 2019), что связывалось авторами с увеличением глубины зимней конвекции вследствие уменьшения ледовитости. Эти особенности определяют интерес к изучению термического режима акватории, прилегающей к северным Курильским островам.

Из-за большой удаленности этого района сбор океанологической информации был выполнен “СахНИРО” всего три раза — весной 2013, 2015 и 2016 гг., в режиме сопровождения ихтиопланктонных съемок, что не позволило рассмотреть особенности термического режима на основе материалов экспедиционных зондирований.

В отличие от традиционных судовых съемок, спутниковые наблюдения за температурой поверхности океана (ТПО) отличаются полным охватом акватории и регулярностью поступления данных. Поэтому они являются наиболее подходящим материалом для характеристики пространственно-временных колебаний ТПО в современных условиях, когда количество морских экспедиций сокращается.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

В “СахНИРО” накоплен значительный объем спутниковых наблюдений по температуре поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий благодаря установленной в 1997 г. приемной спутниковой станции TeraScan® (<https://www.seaspace.com>). С 1998 г. налажены регулярный прием поступающей информации и формирование базы данных, основой которых являются суточные распределения ТПО с пространственным разрешением около 2 км.

В этом исследовании использовались среднемесячные данные ТПО за 1998–2022 гг. (25 лет) в области, ограниченной координатами 47–52° с.ш. и 152–160° в.д. (рис. 1). Исходная матрица состояла из 300 временных слоев размерностью 285×284 точки. Для каждого месяца и пространственной ячейки были вычислены средние многолетние значения, которые рассматривались как нормы, характеризующие типичные параметры термического режима, и среднеквадратические отклонения σ . Аномалии как разность текущих среднемесячных значений и нормы считались значительными, если по абсолютной величине превышали удвоенную величину σ (Цхай, Шевченко, 2013).

Для определения характера межгодовых колебаний ТПО использовано разложение исходной

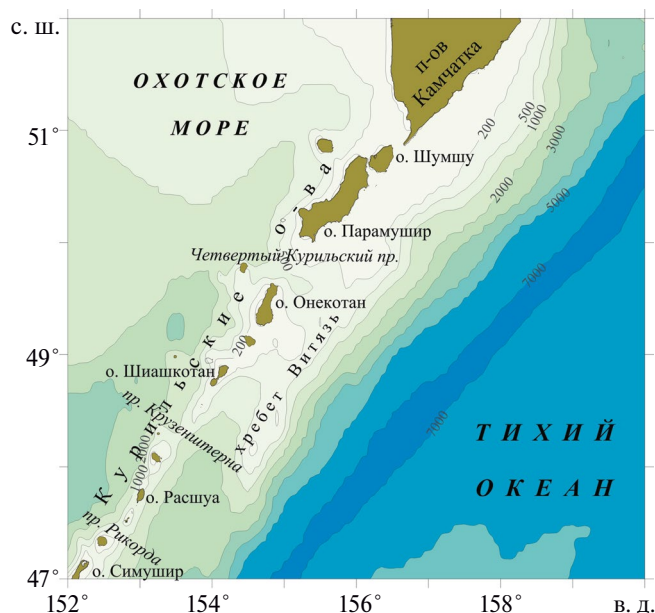


Рис. 1. Карта района исследований.

матрицы по естественным ортогональным функциям (Багров, 1959). При анализе сезонных вариаций температур методом наименьших квадратов получены амплитуды и фазы годовой и полугодовой гармоник. Аналогичный расчет выполнен и для усредненных по всей акватории значений. Также во всех точках пространства вычислены коэффициенты линейного тренда (КЛТ), характеризующие однонаправленные тенденции в межгодовых изменениях ТПО (Ложкин, Шевченко, 2019). При оценке вклада циклических составляющих рассчитаны амплитуда и фаза гармоник с заданным периодом по выборкам за август (огнибающая по максимумам). Далее эта компонента вычиталась из исходного ряда, значимость вклада гармоник определялась по отношению дисперсии остаточного ряда к дисперсии исходного, просуммированных по всей акватории. Периоды циклических компонент задавались от трех до 12 лет с шагом три месяца (Ложкин, Шевченко, 2020).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Среднемесячные распределения ТПО. На рис. 2 представлены средние многолетние распределения температуры поверхности океана в районе северных Курильских островов. В январе–марте наблюдаются наиболее холодные условия, характеризующие, как и в других дальневосточных морях, а также прилегающей к ним части Тихого океана, зимний термический режим (Гидрология и метеорология..., 1998). В этот период на большей части акватории значения ТПО колеблются в пределах от

0 до $+2^{\circ}\text{C}$. На шельфе островов Шумшу и Парамушир, а также у юго-восточного побережья Камчатки они опускаются ниже нуля. В целом в охотоморских водах температура ниже, чем в Тихом океане.

В апреле весенние процессы прогрева поверхностного слоя едва заметны, исчезает зона отрицательных температур над материковым склоном юго-восточной Камчатки и самых северных Курильских островов. В мае в прикурильских водах значения ТПО увеличиваются до $+2^{\circ}\text{C}$, а на остальной акватории — до $+3^{\circ}\text{C}$. Повышение термических показателей становится ощутимым только в июне, большая часть акватории прогревается до $+5$ – 6°C ,

но в это же время у Курильских островов южнее о. Парамушир начинает формироваться область с более низкими температурами — от $+3$ до $+4^{\circ}\text{C}$.

В летние месяцы особенности пространственного распределения ТПО в целом имеют те же черты, что и в июне: наиболее холодная вода отмечается в прикурильских водах южнее 50° с.ш., значения температуры возрастают по мере удаления от островов как в открытый океан, так и в Охотское море. Наиболее широкая область холодной воды наблюдается вблизи о. Шиашкотан, где возникает второе пятно в районе резко выраженного северного отрога хребта Витязь. Эта особенность под-

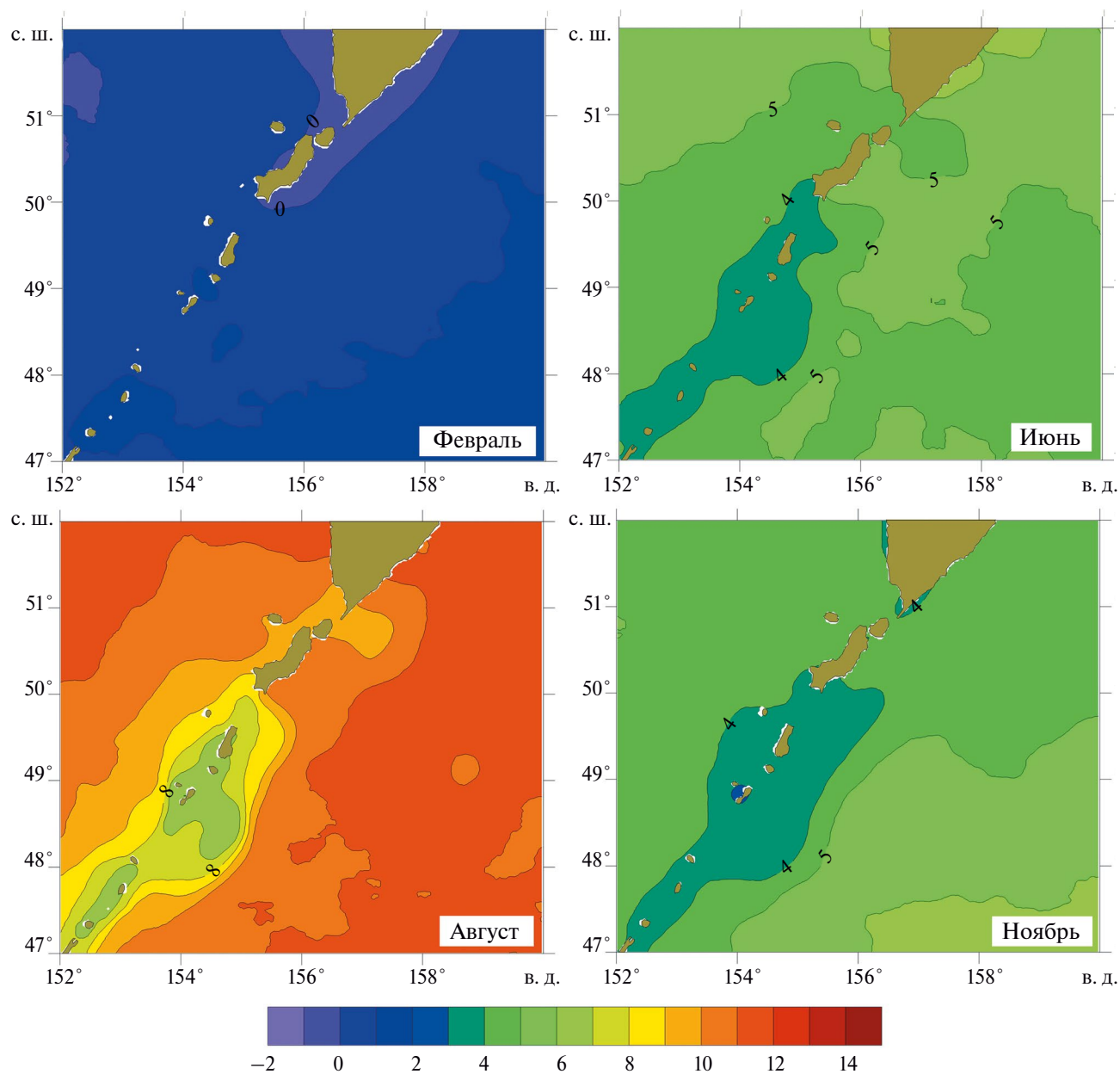


Рис. 2. Среднее многолетнее распределение ТПО (в $^{\circ}\text{C}$) в районе северных Курильских островов зимой (февраль), весной (июнь), летом (август) и осенью (ноябрь).

черкивает определяющую роль донного рельефа в возникновении холодной зоны в этой части Курильской гряды, охватывающей участок от о. Си-мушир до Четвертого Курильского пролива.

В июле, как и в июне, наиболее теплая вода ($+9-10^{\circ}\text{C}$) находится преимущественно к северу от 51-й параллели, а у западной границы изучаемого района она распространяется на юг до 50° с.ш. На основной части акватории значения ТПО варьируются в довольно узких пределах — $+8-9^{\circ}\text{C}$. По мере приближения к Курильским островам увеличивается градиент температур, в прибрежных районах отмечается более холодная вода (ниже 6°C). В августе–сентябре у побережья показатели остаются прежними, в то время как на остальной акватории они увеличиваются до $10-12^{\circ}\text{C}$.

В октябре–ноябре распределение температур аналогично летнему. В октябре в областях с самой теплой водой на северо-западе и юго-востоке акватории температура воды снижается наиболее быстро — до $8-9^{\circ}\text{C}$. В наименьшей степени выхолаживается акватория вблизи островов, где минимальные значения опускаются до 4°C . В ноябре на большей части акватории температура не превышает $4-6^{\circ}\text{C}$. Пространственное распределение ТПО существенно преобразуется в декабре, когда в результате выхолаживания поверхностного слоя оно становится более однородным и область вблизи островов уже не выделяется. Термические показатели на прибрежных участках снижаются до $1-2^{\circ}\text{C}$, в мористых районах — до 3°C .

Динамика средних месячных значений ТПО представлена на рис. 3. В этих колебаниях доминирует годовой ход и отчетливо видны межгодо-

вые вариации, которые выражены прежде всего в огибающей как по максимумам, так и по минимумам (хотя для температуры морской воды существенные изменения последних менее характерны). Отмечается также и однонаправленная тенденция к росту ТПО, причем в последние годы она явно усиливается. Если в целом по всему ряду коэффициент линейного тренда составляет около $0.04^{\circ}\text{C}/\text{год}$, что означает повышение на 1°C за 25 лет, то по расчету за последние семь–восемь лет он почти на порядок выше (около $0.3^{\circ}\text{C}/\text{год}$).

На графике просматриваются хорошо выраженные вариации термических условий в летний период (огибающая по максимумам). В 1998, 2006, 2012, 2016 и 2022 гг. в акваториях, прилегающих к северным Курильским островам, наблюдались условия существенно более теплые, чем в “обычные” годы, когда температура воды близка к средним многолетним значениям. Холодные условия отмечены в 2002, 2009, 2014 и 2019 гг., различия в средних по районам значениях ТПО достигали 3.5°C .

В вариациях максимумов ТПО прослеживаются квазиритмические составляющие. Наименьшая доля остаточной дисперсии была получена для гармоник с периодом шесть лет. Значение амплитуды этой составляющей было близко к 1°C , наиболее высокие значения зафиксированы в южной части изучаемой области (до 1.7°C), самые низкие — на юго-восточном шельфе Камчатки и на океанском шельфе северных Курильских островов.

Сезонные вариации ТПО. В таблице 1 приведены статистические характеристики сезонных вариаций: средние многолетние значения ТПО для каждого месяца, величина среднеквадратического

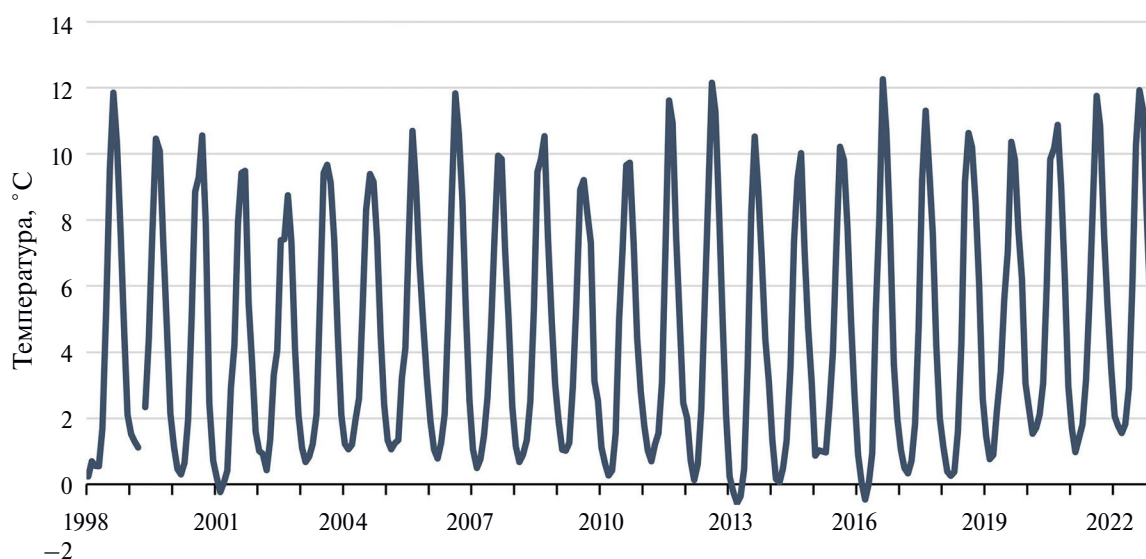


Рис. 3. График вариаций ТПО (в $^{\circ}\text{C}$), усредненных по акватории у северных Курильских островов.

отклонения σ , максимальные и минимальные значения за весь период наблюдений. Максимальный прогрев отмечается в августе (10.4°C) и сентябре (10.0°C), минимальный – в феврале–марте (0.7°C).

Таблица 1. Средние многолетние значения, среднеквадратическое отклонение σ и экстремальные значения ТПО по месяцам ($^{\circ}\text{C}$)

Месяц	Среднее	Сигма	Минимум	Максимум
Январь	1.3	0.6	0.2	2.3
Февраль	0.7	0.5	–0.2	1.8
Март	0.7	0.6	–0.6	1.7
Апрель	1.1	0.7	–0.4	2.2
Май	2.3	0.8	0.5	3.4
Июнь	4.8	0.8	3.1	6.0
Июль	8.4	0.9	7.1	10.2
Август	10.4	1.2	7.4	12.3
Сентябрь	10.0	0.8	8.2	11.3
Октябрь	7.5	0.7	5.5	9.0
Ноябрь	4.7	0.9	2.5	6.3
Декабрь	2.5	0.6	0.7	3.5

Колебания хорошо описываются комбинацией годовой и полугодовой гармоник. Годовой ход выражен сравнительно слабо, амплитуда годовой составляющей равнялась 4.9°C , а ее фаза – 224° , что отвечает максимуму в середине августа. Амплитуда полугодовой гармоник в четыре раза меньше (1.1°C), а ее фаза соответствует максимумам в начале февраля и августа. Амплитуда годовой гармоник существенно отличалась в разные годы – наименьшее значение отмечено в холодном 2002 г. (4.0°C), наибольшее – в теплом 2016 г. (5.8°C).

Рассмотрим пространственные распределения амплитуды и фазы годовой и полугодовой гармоник за период с 1998 до 2022 г. (рис. 4). Из рисунков следует, что интенсивность сезонных вариаций ТПО изменяется не только во времени, но и в пространстве. На большей части акватории как в СЗТО, так и в Охотском море амплитуда годовой гармоник колеблется от 5 до 6°C . По мере приближения к островам Курильской гряды ее значения уменьшаются и достигают минимальных значений (от 2.3 до 2.6°C) на участках от о. Онекотан до о. Шиадокан и от о. Расшуа до о. Симушир. Фаза годовой гармоник варьируется в небольших пределах – от 214 до 234° . Ее минимальные значения, означающие несколько более раннее наступление летнего температурного максимума, наблюдаются вблизи Курильских островов и на шельфе полуострова Камчатка, максимальные – на юго-востоке изучаемого района.

Вариации амплитуды полугодовой составляющей невелики, ее значения возрастают от 0.7°C в прибрежной зоне Курильских островов до 1.4°C на других участках. Фаза этой компоненты также минимальна в прибрежной зоне архипелага и на юго-восточном шельфе Камчатки (около 42°), а по мере удаления в Тихий океан увеличивается до 95° .

Межгодовая изменчивость термических условий. В современных условиях, когда главную роль в изменениях климата на Земле играет глобальное потепление, при изучении вариаций термических условий в морских акваториях наиболее часто возникает вопрос о наличии в них однонаправленных тенденций (трендов). На рис. 5 представлены результаты вычислений для различных сезонов года, где коэффициенты линейного тренда приведены к значениям за 10 лет.

Характер пространственного распределения КЛТ зимой (январь–март) достаточно сложный и мозаичный, но в целом в Охотском море преобладает тенденция к снижению ТПО, а в СЗТО, наоборот, – к повышению. Наиболее значительные отрицательные тренды отмечены вдоль западной границы района (до $0.5^{\circ}\text{C}/10$ лет или 1°C за 20 лет). Скорость роста в прилегающей к Курильским островам части Тихого океана примерно вдвое меньше.

Весной область с отрицательными значениями КЛТ расширяется за счет существенной части СЗТО, положительные тенденции наблюдаются только на северо-восточном участке, примыкающем к юго-восточному побережью Камчатки. При этом скорость снижения ТПО уменьшается по сравнению с зимним периодом, а скорость повышения возрастает до $0.4^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Летом на большей части акватории преобладает тренд к потеплению, причем в открытом океане скорости роста очень велики – до $1.1^{\circ}\text{C}/10$ лет. Исключением является отмеченное выше холодное пятно у побережья Курильских островов, где наблюдается падение ТПО, причем с достаточно высокими скоростями (от 0.2 до $0.4^{\circ}\text{C}/10$ лет). Осенью преобладает тенденция к повышению температуры поверхностного слоя воды, скорость роста колеблется от 0.3 до $0.7^{\circ}\text{C}/10$ лет, которую также можно считать значительной.

Значимые аномалии ТПО. По сути, показанные выше теплые и холодные годы – это визуальные оценки. В то же время выявление масштабных как по величине, так и по площади акватории аномалий ТПО (отклонений от средних многолетних значений, называемых “нормами”) представляет значительный интерес. Обычно отклонения от нормы подчиняются нормальному распределению, для которого величина 2σ соответствует

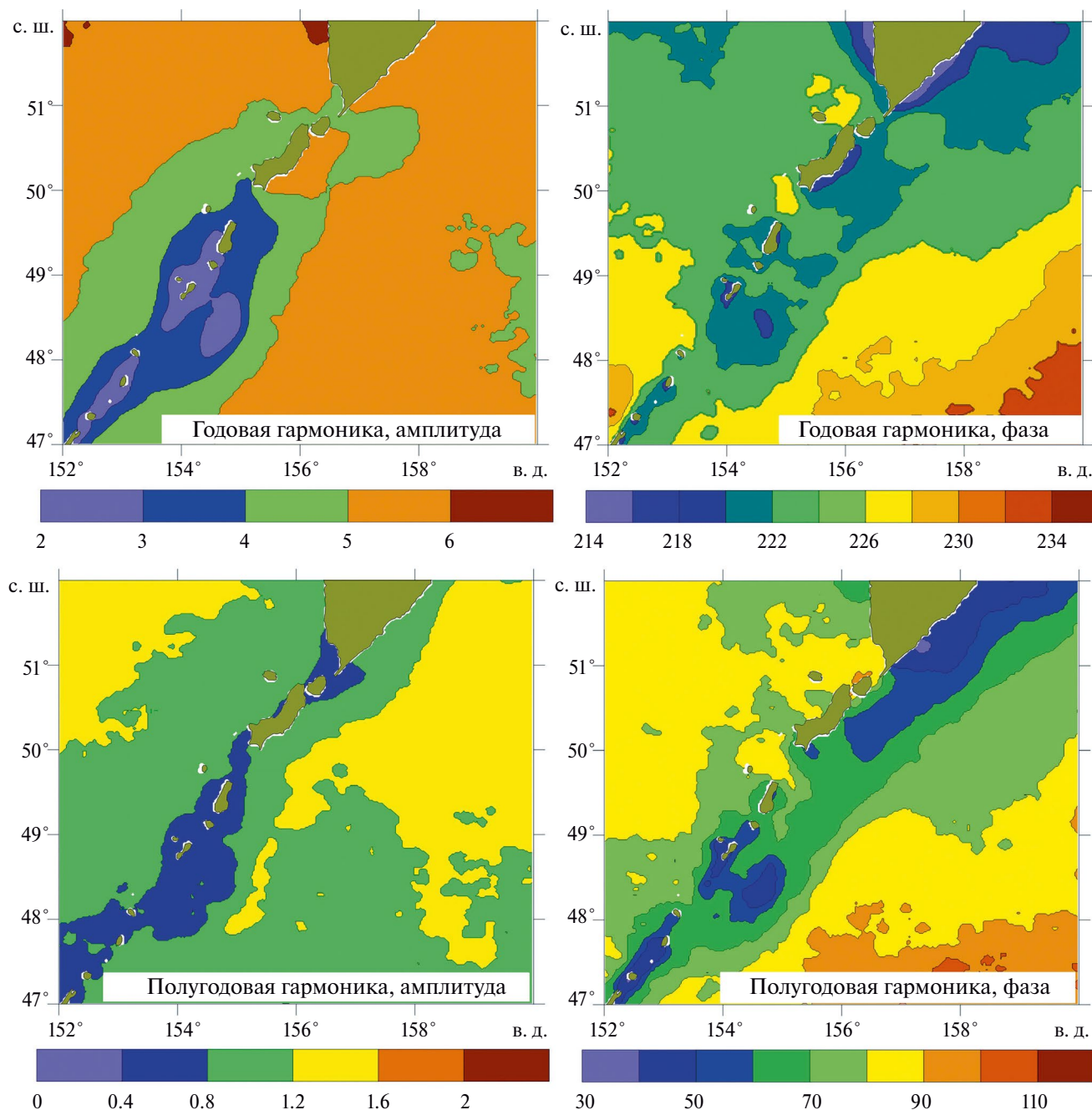


Рис. 4. Пространственное распределение амплитуды (в °C) и фазы (в °) годовой и полугодовой гармоник ТПО в районе северных Курильских островов.

границе, в пределах которой лежат 95% значений, и выход за ее пределы свидетельствует об экстраординарных термических условиях (некоторые специалисты даже используют термин “thermic catastrophe”) окружающей среды (Ustinova, 2021). Если такие аномалии распространяются на обширную часть акватории, то ситуация становится действительно опасной для жизни гидробионтов, особенно на ранней стадии их развития, и заслуживает внимательного изучения. На рисунке 6

представлен график, на котором отложена доля площади значимых аномалий по отношению ко всей изучаемой области.

Наибольший интерес представляли ситуации, когда такие аномалии занимали значительную часть изучаемого бассейна. В большинстве случаев они проявлялись на небольших участках, составлявших 2–5% от площади изучаемой акватории, и сравнительно редко превышали отметку 10%.

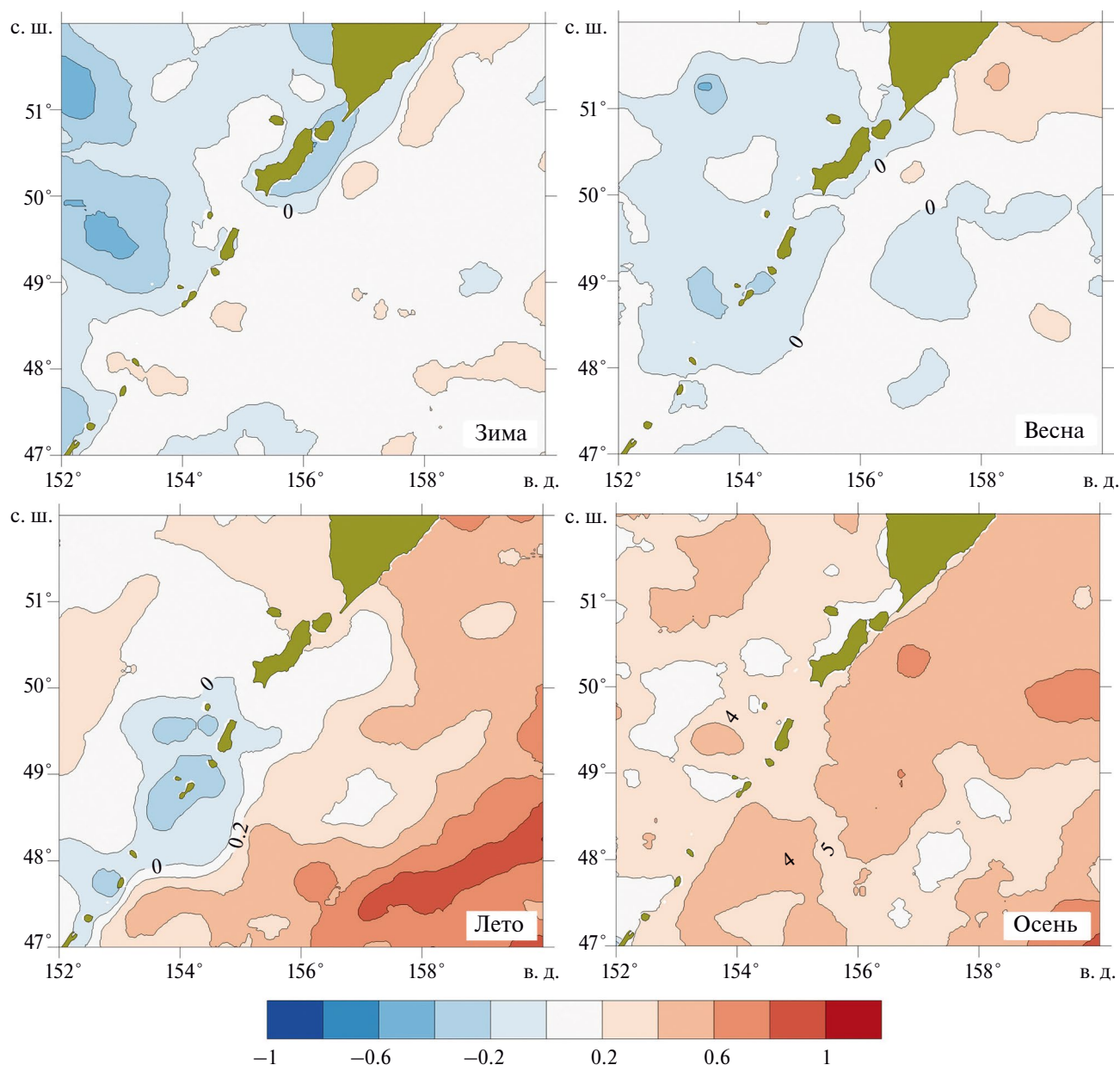


Рис. 5. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда в вариациях ТПО (в °C/10 лет) в различные сезоны года в районе северных Курильских островов.

Интересно, что в течение ряда лет (с 2003 по 2009 г.) этого не наблюдалось ни разу, а в некоторые годы неоднократно (например, в 2013 г. в течение шести месяцев). Отметим, что при расчете аномалий из данных не вычитался линейный тренд, что могло привести к росту числа положительных аномалий в последние годы. Однако, как следует из рис. 6, этого не произошло, очевидно, эффекты, связанные с наличием тенденции к росту ТПО, не сказались существенно на рассматриваемом явлении.

Для более тщательного анализа были отобраны ситуации, когда площадь значимых аномалий

была выше 20% (табл. 2). Их было десять, в девяти из них наблюдались отрицательные и только в одном случае положительные аномалии. В четырех из них зоны экстремальных температур занимали более 40%, а в восьми случаях — более четверти всей площади. Это говорит о том, что отклонения термического режима от “нормы” у Северных Курил могут быть масштабными. При этом явно преобладают случаи чрезвычайно холодных условий. Такая диспропорция весьма необычна, ее физические причины неясны и требуют дальнейшего изучения.

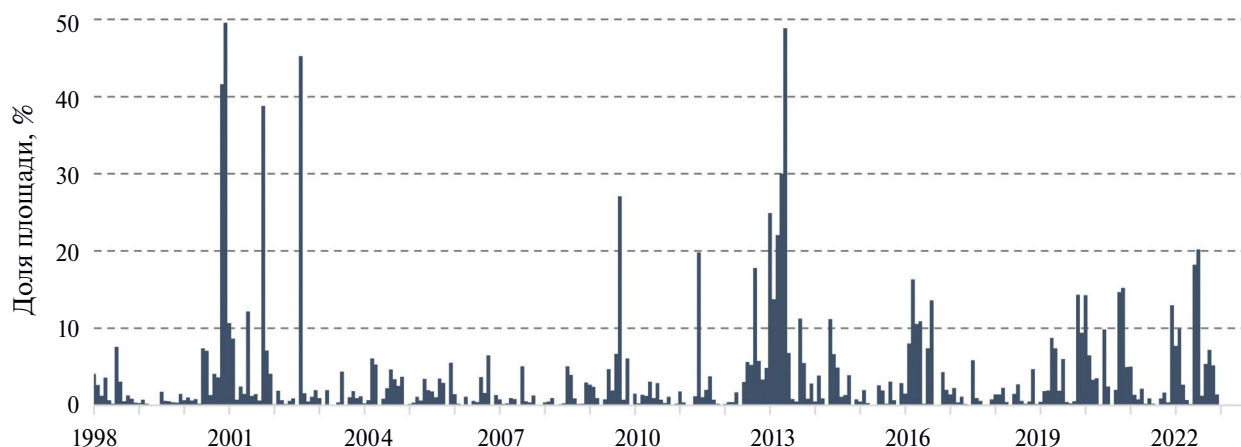


Рис. 6. Доли площади экстремальных аномалий ТПО, превышающих величину 2σ , в районе Северных Курильских островов.

Таблица 2. Информация о наиболее значительных аномалиях ТПО в районе северных Курильских островов

Период	Доля площади, %	Знак аномалии
Ноябрь 2000 г.	41.64	Отрицательный
Декабрь 2000 г.	49.61	Отрицательный
Октябрь 2001 г.	38.81	Отрицательный
Август 2002 г.	45.25	Отрицательный
Сентябрь 2009 г.	27.09	Отрицательный
Январь 2013 г.	24.91	Отрицательный
Март 2013 г.	22.07	Отрицательный
Апрель 2013 г.	30.03	Отрицательный
Май 2013 г.	48.86	Отрицательный
Июль 2022 г.	20.22	Положительный

На рис. 7 представлены пространственные распределения с наиболее значительными аномалиями ТПО. В декабре 2000 г. на большей части района температура была на 2°C , а на отдельных участках на 2.5°C ниже средне многолетней нормы. Обычно такие показатели рассматриваются как рядовые события, однако в декабре изменчивость ТПО сравнительно невысока при величине среднеквадратического отклонения 0.6°C (см. табл. 2).

В августе 2002 г. отрицательные аномалии охватывали практически всю акваторию, причем на удаленных от берега участках как в Охотском море, так и в Тихом океане они имели значительную величину — от -4 до -6°C . При этом вблизи побережья Камчатки и Курильских островов они были гораздо меньше и не превышали $1-2^{\circ}\text{C}$.

Весной “аномального” 2013 г. площадь отклонений, превышающих по величине 2σ , составила более 20% акватории в течение трех последующих месяцев — с марта по май (см. табл. 2). В мае почти по-

ловиная изучаемой области (49%) находилась в зоне существенных отрицательных аномалий (до 3°C).

В августе 2022 г. зафиксирован единственный случай, когда на достаточно большой площади отмечались значительные положительные аномалии ТПО. На отдельных участках температура воды была на 4°C выше нормы. В прибрежных районах юго-восточной Камчатки и Курильских островов термические показатели в целом соответствовали средне многолетней норме.

Разложение поля ТПО по ЕОФ. Важные особенности сезонной и межгодовой изменчивости можно определить при помощи разложения гидрометеорологических полей по естественным ортогональным функциям (Новиненко, Шевченко, 2007). Результаты расчета в виде пространственных распределений первых трех основных мод (на их долю приходится 96.65; 0.51 и 0.25% дисперсии ТПО) и соответствующих им временных функций представлены на рис. 8.

При разложении методом ЕОФ гидрометеорологических полей с выраженным сезонным ходом (вариации температуры морской воды или атмосферного воздуха являются одними из наиболее ярких примеров такого рода) первая мода дает подавляющий вклад в общую дисперсию параметра, что, однако, не обесценивает роль более высоких составляющих.

Пространственная структура первой моды практически идентична усредненному распределению ТПО в летний период (низкие значения у побережья Курильских островов и высокие в открытом океане и удаленной от побережья части Охотского моря), а ее временная функция имеет очень высокую корреляцию ($r=0.996$) со средними месячными значениями температуры. По этой причине глав-

ную составляющую ЕОФ рассматривать подробно нет смысла. Отметим только, что временная функция хорошо аппроксимируется комбинацией годовой и полугодовой гармоник с амплитудами 0.9 и 0.2 °C, достигает максимальных значений в августе—сентябре и минимума в феврале—марте. Первая мода описывает колебания параметра, которые во всей области происходят синфазно, хотя и с различной интенсивностью на участках, характеризующейся пространственной функцией.

Вторая мода отражает вариации ТПО, которые не укладываются в представление об одинаковом

ходе параметра. Поэтому в пространственном распределении выделяются зоны с различными знаками, разделенные узловой линией, вблизи которой вклад данной моды незначителен. Эта линия проходит в районе 49-й параллели, к северу от которой значения моды положительные (до 1.2 у юго-восточного берега Камчатки), а к югу — отрицательные (до -1.1 на юго-восточном участке).

Усредненная кривая временной функции имеет положительные значения с июня по август с выраженным максимумом в июле. В остальные месяцы — величины отрицательные, с минимумами

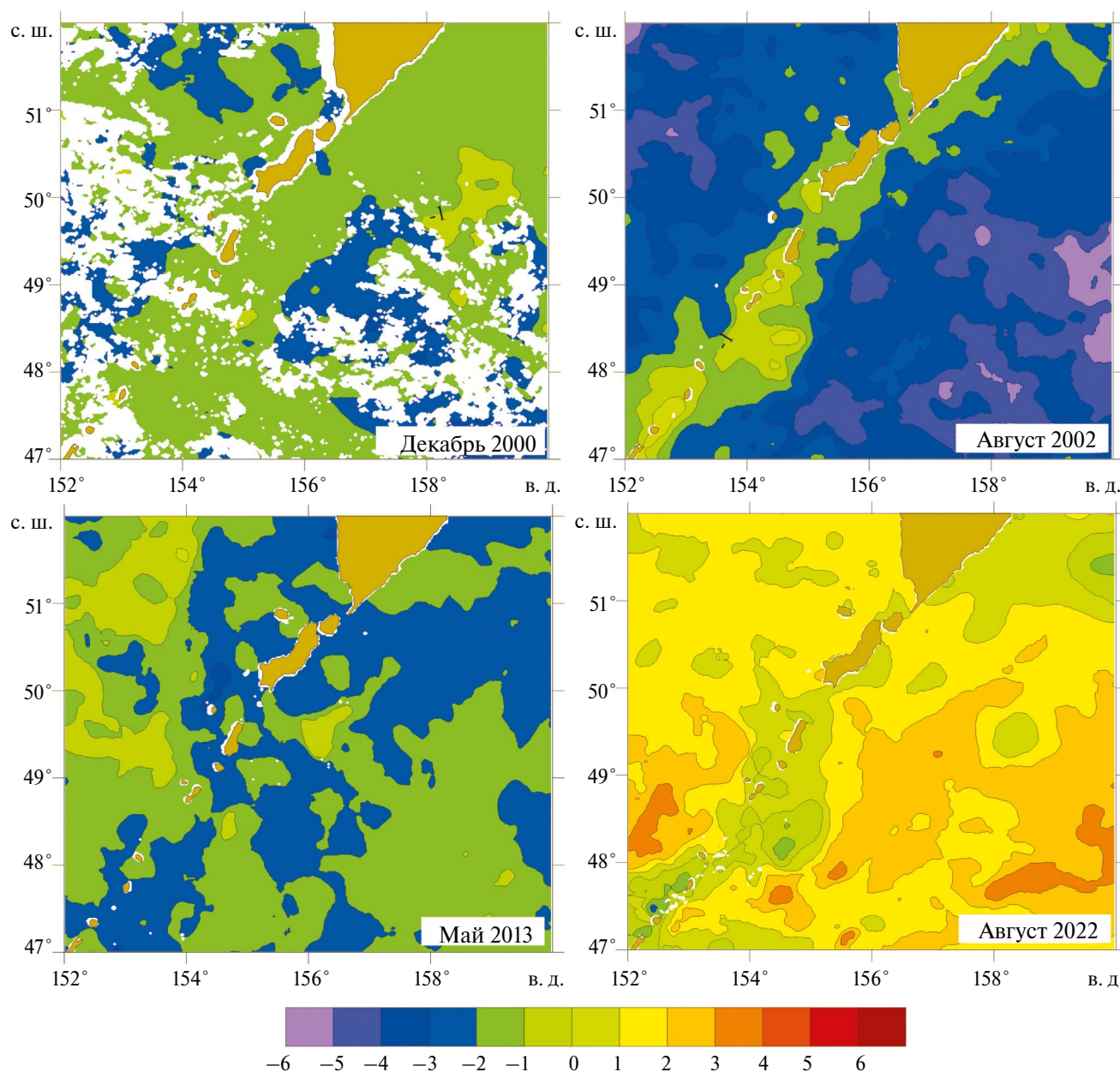


Рис. 7. Пространственное распределение наиболее значительных аномалий ТПО (в °C) в районе северных Курильских островов.

в октябре–ноябре. Это означает, что летом вторая мода дает поправку к основной составляющей, положительную – в северной части акватории и отри-

цательную – в южных районах. В холодный период года ситуация обратная – на севере ее вклад отрицательный, в южных районах положительный.

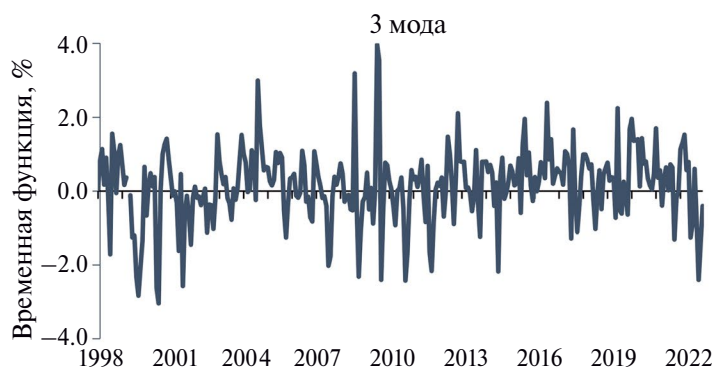
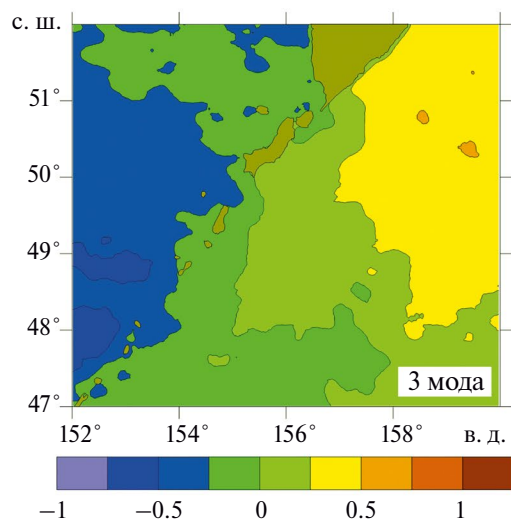
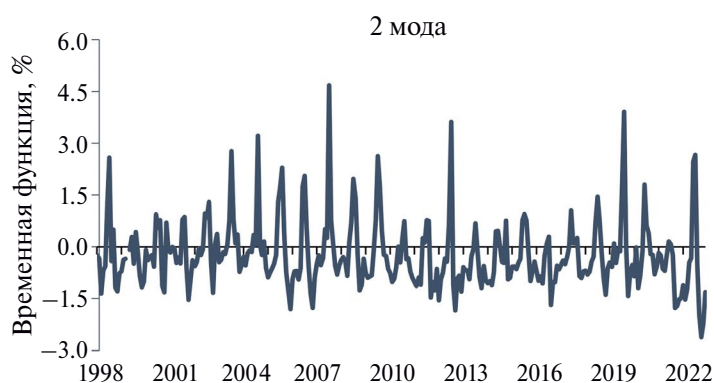
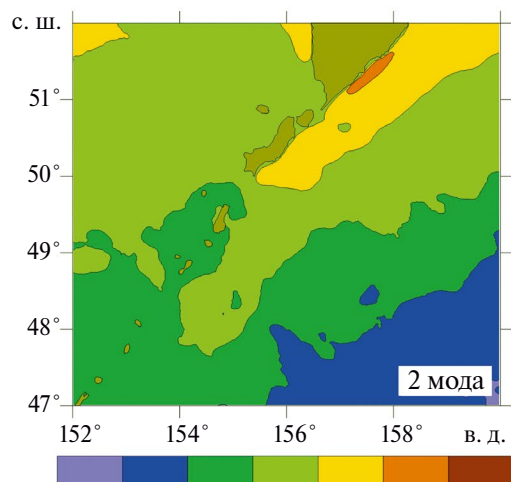
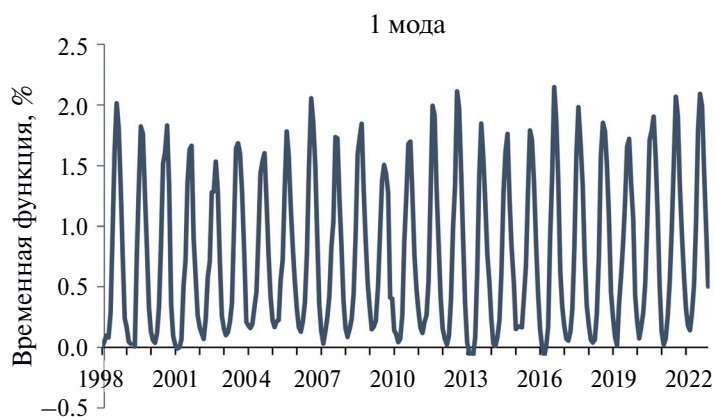
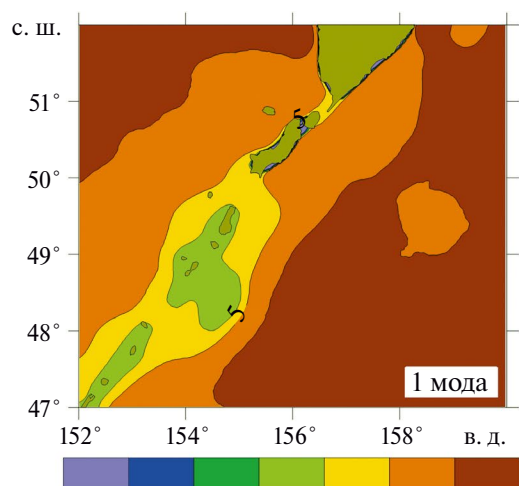


Рис. 8. Пространственное распределение (безразмерное) и графики временных функций (в °C) первых трех мод разложения поля ТПО по ЕОФ в районе северных Курильских островов.

Во временной функции этой моды заметны значительные межгодовые вариации, значимо выделяется 11-летний цикл, в меньшей степени — 6-летний, при этом годовой ее ход в целом сохраняется. Наибольшие положительные значения и, соответственно, максимальный вклад моды в общее поле ТПО, отмечены в июле 2007, 2012 и 2019 гг. В некоторые годы (например, в 1999 и 2016 гг.) летний максимум ослаблен, значения временной функции на порядок меньше, чем в случаях выраженного максимума. Отрицательные величины более стабильны, экстремальные минимумы выявлены осенью 2022 г. (ниже -2°C).

Если вторая мода дает к основной компоненте зональную поправку, то третья вносит корректировку меридионального характера. Ее пространственная функция принимала отрицательные значения практически на всем охотоморском участке изучаемой области. В СЗТО узловая линия проходила приблизительно вдоль 155-го меридиана с положительными величинами в восточной части акватории и отрицательными — в западной. Разброс значений составил от -0.6 до $+0.5^{\circ}\text{C}$.

В отличие от первых двух мод, временная функция третьей моды не носила устойчивого повторяющегося сезонного характера. Ее усредненные за 1998–2022 гг. значения для различных месяцев года положительны в январе–июне, в августе и декабре. В случае положительных значений временной функции положительная поправка имела место в восточной части изучаемой области, а отрицательная — в западной. При отрицательных значениях поправка приобретала обратный характер. Наибольшее общее изменение ТПО, обусловленное вкладом третьей моды, отмечалось в июле 2009 г., оно составило около $+2^{\circ}\text{C}$ в восточной и -2.5°C — в западной части бассейна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчет усредненных распределений ТПО по сезонам установил главную особенность термического режима в районе северных Курильских островов, выраженную в наличии постоянно существующей области с низкими значениями температуры воды. Она охватывает прибрежную акваторию архипелага от о. Симушир до Четвертого Курильского пролива и не включает воды вблизи о-вов Шумшу и Парамушир. Термические показатели возрастают по мере удаления от нее как в открытый океан, так и в Охотское море. Наиболее широкой зона холодной воды становится вблизи о. Шиашкотан, где в районе северного отрога хребта Витязь образуется второе пятно. Эта особенность подчеркивает ключевую роль донного рельефа в формировании холодной зоны.

Сезонные колебания ТПО характеризуются отчетливым годовым ходом с максимальными значениями в августе–сентябре и минимальными в феврале–марте. Они хорошо описываются комбинацией годовой и полугодовой гармоник с амплитудами 4.9 и 1.1°C , колебания которых уменьшаются в зоне холодных вод и увеличиваются по мере удаления от островов в мористые районы. Межгодовая изменчивость термического режима выявлена главным образом в модуляции годового хода с периодом около шести лет.

Во временных функциях двух главных мод разложения поля ТПО по ЕОФ в огибающей по летним максимумам проявляются циклы с периодами около 11 и шести лет. В пространственной структуре первой моды выделяется область низких значений вблизи Курильских островов. Вторая мода отражает различия термических условий в северной и южной частях изучаемого района, третья — в акватории Охотского моря и СЗТО.

Расчет коэффициентов линейного тренда определил направление к повышению температуры в целом по району со скоростью около 1°C за 25 лет. Тенденция к потеплению наиболее заметна в прилегающей части СЗТО в летний и в несколько меньшей степени в осенний период. В области холодного пятна преимущественно зимой и весной отмечается обратный тренд.

Анализ полей ТПО за 25 лет наблюдений показал, что временами в районе Северных Курил могут формироваться значительные, превышающие удвоенную величину среднеквадратического отклонения температурные аномалии. В десяти случаях из 300 доля площади, на которой наблюдались такие аномалии, составила более 20%, а в четырех из них — более 40%. Это говорит о том, что отклонения термического режима могут быть масштабными, проявляться на значительной части акватории и представлять серьезную опасность для обитающих здесь гидробионтов. При этом явно преобладали случаи аномально холодных условий. Такая диспропорция весьма необычна, ее физические причины неясны и требуют дальнейшего изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Багров Н.А. Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих // Труды ЦИП. 1959. Вып. 74. С. 3–24.
- Бышев В.И., Фигуркин А.Л., Анисимов И.М. Современные климатические изменения термохалинной структуры вод СЗТО // Изв. ТИНРО. 2016. Т. 185. С. 215–227.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том IX. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Ф. С. Терзиева и др. СПб.: Гидрометеиздат, 1998. 342 с.

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 // Известия ТИНРО. 2009. Т. 159. С. 285–298.

Зуенко Ю.И., Асеева Н.Л., Глебова С.Ю., Гостренко Л.М., Дубинина А.Ю., Дулепова Е.П., Золотов А.О., Лобода С.В., Лысенко А.В., Матвеев В.И., Муктепавел Л.С., Овсянников Е.Е., Фигуркин А.Л., Шатилина Т.А. Современные изменения в экосистеме Охотского моря (2008–2018 гг.) // Известия ТИНРО. 2019. Т. 197. С. 35–61. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-197-35-61.

Кантаков Г.А. Океанографический режим тихоокеанского шельфа и материкового склона Северных Курил и его влияние на распределение промысловых объектов // Промыслов-биологические исследования рыб в тихоокеанских водах Курильских островов и прилежащих районах Охотского и Берингова морей в 1992–1998 гг. М.: ВНИРО, 2000. С. 54–64.

Ложкин Д.М., Шевченко Г.В. Тренды температуры поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным 1998–2017 гг. // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 1. С. 55–61. DOI 10.31857/S0205-96142019155-61.

Ложкин Д.М., Шевченко Г.В. Циклические вариации температуры поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным в 1998–2018 гг. // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 1. С. 44–51. DOI: 10.31857/S0205961420010066.

Новиненко Е.Г., Шевченко Г.В. Пространственно-временная изменчивость температуры поверхности Охотского моря по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 5. С. 50–60.

Рогачев К.А., Шлык Н.В. Многолетние изменения вихря ветра и уровень моря в Камчатском течении // Океанология. 2005. Т. 45. № 3. С. 339–348.

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

Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Рудых Н.И. Климатические изменения термических условий в тихоокеанской субарктике

в условиях современного глобального потепления // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37. № 2. С. 162–178. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-2-162-178>.

Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Воронцов А.А. Тенденции климатических изменений термических условий прибрежных районов Охотского моря за последние десятилетия // Известия ТИНРО. 2017. Т. 191. С. 176–195.

Самко Е.В., Новиков Ю.В. Среднемноголетняя геострофическая циркуляция вод прикурильского района Тихого океана // Океанология. 2004. Т. 44. № 1. С. 5–10.

Хен Г.В., Устинова Е.И., Фигуркин А.Л., Зуенко Ю.И., Новиков Ю.В., Сорокин Ю.Д., Гаманюк М.В. Гидрологические условия северо-западной части Тихого океана и дальневосточных морей в начале XXI века и ожидаемые тенденции // Вопросы промысловой океанологии. 2004. № 1. С. 40–58.

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

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. 2022. Т. 202. № 1. С. 187–207. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-187-207.

Цхай Ж.Р., Шевченко Г.В., Ложкин Д.М. Анализ термических условий в северо-западной части Тихого океана по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 1. С. 30–37. DOI: 10.31857/S0205961422010079.

Joyce T., Dunworth-Baker J. Long-term hydrographic variability in the Northwest Pacific Ocean // Geophysical Research Letters. 2003. Vol. 30. Is. 2. P. 1043. <https://doi.org/10.1029/2002GL015225>.

Kono T., Kawasaki Y. Modification of the western subarctic water by exchange with the Okhotsk Sea // Deep Sea Res. Part I. 1997. Vol. 44. Is. 4. P. 689–711.

Ustinova E. Extreme events in the thermal state of the Far-Eastern Seas and adjacent waters of the Northwestern Pacific // PICES-2021 Virtual Annual Meeting. Book of Abstract. Victoria, BC, Canada. 2021. P. 26.

Seasonal and Interannual Variations in Ocean Surface Temperature in the Area of the Northern Kuril Islands According to Satellite Data

G. V. Shevchenko^{1,2}, Zh. R. Tshay¹, D. M. Lozhkin¹

¹Sakhalin Branch of “VNIRO” (“SakhNIRO”), Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

²Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

The average monthly values of ocean surface temperature in the area of the northern Kuril Islands for 1998–2022 are analyzed. On the basis of a 25-year series of observations, the norms are constructed for each month – the average long-term distributions. It is shown that in the coastal area from the Simushir Island to the Fourth Kuril Strait, a cold spot area with very low temperatures (about 6 °C) and small annual cycle amplitudes (about 3 °C) is formed in summer. Seasonal fluctuations are characterized by an annual cycle with maximum values in August–September and minimum values in February–March. In general, they are well described in the region by a combination of annual and semi-annual harmonics with amplitudes of 4.9 and 1.1 °C, respectively. The interannual variability is reflected in variations of summer maxima with a period of about six years. In the summer and autumn period, outside the cold spot area, there is a steady trend towards an increase in temperature, the most significant in the northwestern Pacific Ocean (about 1 °C in 25 years). In the winter-spring season in the Sea of Okhotsk, the reverse situation is observed with a tendency to decrease thermal parameters. When

calculating deviations of average monthly temperatures from normal values, it was revealed that large-scale zones with significant temperature anomalies, mainly negative ones, can be formed in the area of the North Kuril Islands, which can pose a serious danger to aquatic organisms.

Keywords: thermal regime, temperature anomalies, linear trend, harmonic analysis, method of natural orthogonal functions, Kamchatka Peninsula, Sea of Okhotsk, Northwestern Pacific Ocean

REFERENCES

- Bagrov N.A.* Analiticheskoe predstavlenie posledovatel'nosti meteorologicheskikh polei posredstvom estestvennykh orthogonal'nykh sostavlyayushchikh [Analytical representation of a sequence of meteorological fields by means of natural orthogonal components] // Tr. Tsentral'nogo instituta prognozov. 1959. Issue 74. P. 3–24. (In Russian).
- Byshev V.I., Figurkin A.L., Anisimov I.M.* Sovremennye klimaticheskie izmeneniya termohalinnoy struktury vod SZTO [Recent climate changes of thermohaline structure in the North-West Pacific] // Izv. TINRO. 2016. V. 185. P. 215–227. (In Russian).
- Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morej. Tom IX. Ohotskoe more. Vyp. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. Volume IX. The Sea of Okhotsk. Issue 1. Hydrometeorological conditions] / Pod red. F. S. Terzieva i dr. SPb. : Gidrometeoizdat, 1998. 342 p. (In Russian).
- Glebova S.Yu., Ustinova E.I., Sorokin Yu.D.* Dolgoperiodnye tendencii v hode atmosferykh processov i termicheskogo rezhima dal'nevostochnykh morej za poslednij 30-letnij period [Long-period trends in the course of atmospheric processes and thermal regime of the Far Eastern seas over the last 30 years] // Izvestiya TINRO. 2009. V. 159. P. 285–298. (In Russian).
- 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., SHatilina T.A.* Sovremennye izmeneniya v ekosisteme Ohotskogo morya (2008–2018 gg.) [Modern changes in the ecosystem of the Sea of Okhotsk (2008–2018)] // Izvestiya TINRO. 2019. V. 197. P. 35–61. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-197-35-61.
- Kantakov G.A.* Okeanograficheskij rezhim tihookeanskogo shel'fa i materikovogo sklona Severnykh Kuril i ego vliyanie na raspredelenie promyslovyykh ob'ektov [The oceanographic regime of the Pacific shelf and the continental slope of the North Kuril Islands and its impact on the distribution of fishing facilities] // Promyslov-biologicheskie issledovaniya ryb v tihookeanskih vodakh Kuril'skikh ostrovov i prilozhashchih rajonah Ohotskogo i Beringova morej v 1992–1998 gg. M.: VNIRO, 2000. P. 54–64. (In Russian).
- Lozhkin D.M., Shevchenko G.V.* Trendy temperatury poverhnosti Ohotskogo morya i prilgayushchih akvatorij po sputnikovym dannym 1998–2017 gg. [Trends in sea surface temperature of the Sea of Okhotsk and adjacent water areas according to satellite data 1998–2017] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2019. Iss. 1. P. 55–61. DOI: 10.31857/S0205-96142019155-61. (In Russian).
- Lozhkin D.M., Shevchenko G.V.* Ciklicheskie variacii temperatury poverhnosti Ohotskogo morya i prilgayushchih akvatorij po sputnikovym dannym v 1998–2018 gg. [Cyclic variations of the sea surface temperature of the Sea of Okhotsk and adjacent areas according to satellite data in 1998–2018] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2020. Iss. 1. P. 44–51. DOI: 10.31857/S0205961420010066. (In Russian).
- Novinenko E.G., Shevchenko G.V.* Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' temperatury poverhnosti Ohotskogo morya po sputnikovym dannym [Spatial and temporal variability of the sea surface temperature of the Sea of Okhotsk according to satellite data] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2007. Iss. 5. P. 50–60. (In Russian).
- Rogachev K.A., Shlyk N.V.* Mnogoletnie izmeneniya vikhrya vetra i uroven' morya v Kamchatskom techenii [Long-term changes in the wind vortex and sea level in the Kamchatka current] // Okeanologiya. 2005. V. 45. Iss. 3. P. 339–348. (In Russian).
- Rostov I.D., Dmitrieva E.V., Rudykh N.I., Voroncov A.A.* Klimaticheskie izmeneniya termicheskikh uslovij okrainnykh morej zapadnoj chasti Tihogo okeana [Climatic changes in the thermal conditions of the marginal seas of the Western Pacific Ocean] // Meteorologiya i gidrologiya. 2020. Iss. 3. P. 44–57. (In Russian).
- Rostov I.D., Dmitrieva E.V., Rudykh N.I.* Klimaticheskie izmeneniya termicheskikh uslovij v tihookeanskoj subarktikke v usloviyah sovremennogo global'nogo potepeniya [Climatic changes in thermal conditions in the Pacific Subarctic in the context of modern global warming] // Morskoy gidrofizicheskij zhurnal. 2021. V. 37. Iss. 2. S. 162–178. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-2-162-178>. (In Russian, English translation).
- Rostov I.D., Dmitrieva E.V., Voroncov A.A.* Tendencii klimaticheskikh izmenenij termicheskikh uslovij pribrezhnykh rajonov Ohotskogo morya za poslednie desyatiletia [Trends in climatic changes in thermal conditions of the coastal areas of the Sea of Okhotsk in recent decades] // Izvestiya TINRO. 2017. V. 191. P. 176–195. (In Russian).
- Samko E.V., Novikov Y.V.* Srednemnogoletnyaya geostroficheskaya cirkulyaciya vod prikuril'skogo rajona Tihogo okeana [Average long-term geostrophic water circulation in the Kuril Islands region of the Pacific Ocean] // Okeanologiya. 2004. V. 44. Iss. 1. S. 5–10. (In Russian, English translation).
- Khen G.V., Ustinova E.I., Figurkin A.L., Zuenko Yu.I., Novikov Yu.V., Sorokin Yu.D., Gamanyuk M.V.* Gidrologicheskie usloviya severo-zapadnoj chasti Tihogo okeana i dal'nevostochnykh morej v nachale XXI veka i ozhidaemye tendencii [Hydrological conditions of the Northwestern Pacific Ocean and the Far Eastern seas at the beginning of the XXI century and expected trends] // Voprosy promyslovoj okeanologii. 2004. Iss. 1. P. 40–58.
- Khen G.V., Basyuk E.O., Sorokin Yu.D., Ustinova E.I., Figurkin A.L.* Termicheskie usloviya na poverkhnosti Beringova i Ohotskogo morej v nachale 21-go veka na fone poluvekovoi izmenchivosti [Surface thermal conditions in the Bering and Okhotsk Seas in the early 21 Century against previous semi-centennial changes] // Izv. TINRO. 2008. V. 153. P. 254–263 (In Russian).

Khen G.V., Ustinova E.I., Sorokin Yu.D. Mnogoletnie izmeneniya termicheskikh uslovii na poverkhnosti dal'nevostochnykh morei i SZTO i ikh svyaz' skrupnomasshtabnymi klimaticheskimi protsessami [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. TINRO*. 2020. V. 202. Issue 1. P. 187–207. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-187-207. (In Russian).

Tskhai Zh.R., Shevchenko G.V., Lozhkin D.M. Analiz termicheskikh uslovii v severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana po sputnikovym dannym [Analysis of Thermal Conditions in the Northwest Pacific Ocean from Satellite Data] // *Issledo-*

vanie Zemli iz kosmosa. 2022. Iss. 1. P. 30–37. DOI: 10.31857/S0205961422010079. EDN HRSJAX. (In Russian).

Joyce T., Dunworth-Baker J. Long-term hydrographic variability in the Northwest Pacific Ocean // *Geophysical Research Letters*. 2003. Vol. 30. Is. 2. P. 1043. <https://doi.org/10.1029/2002GL015225>.

Kono T., Kawasaki Y. Modification of the western subarctic water by exchange with the Okhotsk Sea // *Deep Sea Res. Part I*. 1997. Vol. 44. Is. 4. P. 689–711.

Ustinova E. Extreme events in the thermal state of the Far-Eastern Seas and adjacent waters of the Northwestern Pacific // *PICES-2021 Virtual Annual Meeting. Book of Abstract*. Victoria, BC, Canada. 2021. P. 26.