

Особенности формирования аномальных состояний термического режима вод в Курило-Камчатском районе

В. В. Мороз ¹, ✉, Т. А. Шатилина ², Н. И. Рудых ¹

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного
отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства
и океанографии, тихоокеанский филиал ФГБНУ ВНИРО (ТИНРО), Владивосток, Россия
✉ moroz@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 05.02.2025; одобрена после рецензирования 20.02.2025;
принята к публикации 15.05.2025.

Аннотация

Цель. Цель работы – определить причинно-следственные связи и механизмы формирования аномалий термического режима вод в западной и восточной акваториях у побережья Камчатки, а также в северных проливах Курильской гряды с учетом воздействия региональных атмосферных процессов в теплый период года за последние четыре десятилетия.

Методы и результаты. По данным многолетних наблюдений на прибрежных гидрометеорологических станциях Росгидромета и данным реанализа NCEP/NCAR на прилегающих акваториях изучена межгодовая изменчивость термических условий района в июне – сентябре 1980–2022 гг. С применением методов кластерного и корреляционного анализов оценена изменчивость состояний температурных режимов акваторий и атмосферной циркуляции. Выявлено увеличение экстремальных положительных среднемесячных значений поверхностной температуры воды в течение последних двух десятилетий. Показаны причинно-следственные связи между аномальными изменениями структуры атмосферных полей, их воздействием на акватории и формированием аномальных термических условий.

Выводы. Формирование аномальных термических условий в прибрежных районах Камчатки и в прилегающей северной зоне Курильской гряды связано с изменчивостью интенсивности развития таких центров действия атмосферы, как Охотский и Гавайский антициклоны, изменениями их положения (в том числе распространением на северо-запад северотихоокеанской ветви Гавайского максимума) и локального воздействия.

Ключевые слова: полуостров Камчатка, северные Курильские проливы, гидрологические условия, аномалии температуры, атмосферная циркуляция

Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания ТОИ ДВО РАН № 124022100079-4, в рамках Комплексной межведомственной программы «Экологическая безопасность Камчатки: изучение и мониторинг опасных природных явлений и антропогенных воздействий» (НИОКТР 122012700198-9). Авторы выражают благодарность разработчикам за возможность использования данных, размещенных на сайтах глобальной метеорологической сети, JMA и NOAA, а также рецензенту за высказанные полезные замечания.

Для цитирования: Мороз В. В., Шатилина Т. А., Рудых Н. И. Особенности формирования аномальных состояний термического режима вод в Курило-Камчатском районе // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 4. С. 436–452. EDN OYVMBC.

Features of Forming the Water Abnormal Thermal Regimes in the Kuril-Kamchatka Region

V. V. Moroz ¹, ✉, T. A. Shatilina ², N. I. Rudykh ¹

¹ V. I. Il'yichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

² Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Pacific Branch of VNIRO (TINRO), Vladivostok, Russia
✉ moroz@poi.dvo.ru.

Abstract

Purpose. The study is aimed at identifying the cause-effect relations and mechanisms forming the water abnormal thermal regimes in the western and eastern water areas off the Kamchatka Peninsula coast, as well as in the northern straits of the Kuril ridge with due regard for the impact of regional atmospheric processes during the warm period of a year over the past four decades.

Methods and Results. The data resulted from long-term observations performed at the coastal hydrometeorological stations (Hydrometeorological Centre of Russia) and NCEP/NCAR reanalysis data on the adjacent water areas permitted to study the interannual variability of thermal conditions in the adjacent to Kamchatka region in June – September periods in 1980–2022. Application of the cluster and correlation analysis methods made it possible to assess the variability of states of temperature regimes of water areas and atmospheric circulation. An increase in extreme positive monthly average values of surface water temperature has been revealed for the past two decades. The cause-and-effect relationships between the anomalous changes in atmospheric field structure, their impact upon water areas and the formation of abnormal thermal conditions are shown.

Conclusions. Formation of the abnormal water thermal conditions in the Kamchatka Peninsula coastal regions and in the adjacent northern area of the Kuril ridge is related to the intensity variability in development of such centers of atmospheric impact as the Okhotsk and Hawaiian Highs, the changes in their positions (including the spread of the North Pacific branch of the Hawaiian maximum to the northwest), and the local impact.

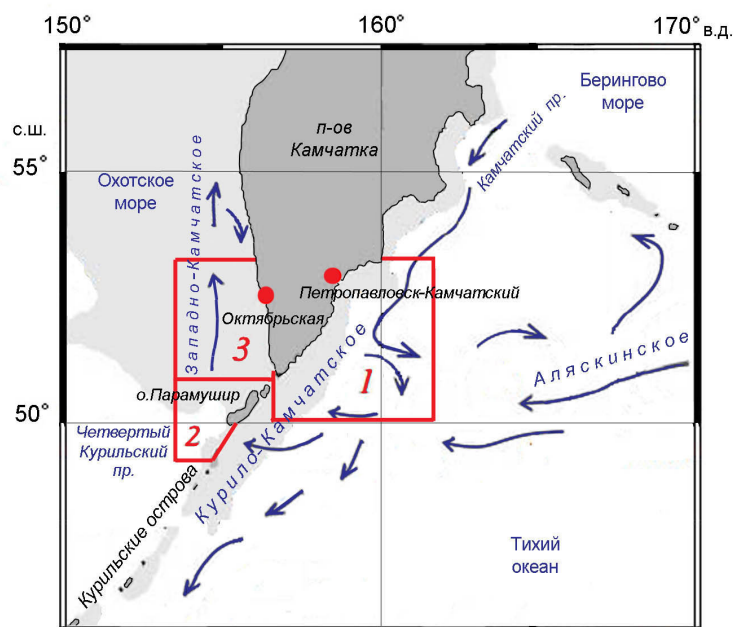
Keywords: Kamchatka Peninsula, northern Kuril Straits, hydrological conditions, temperature anomalies, atmospheric circulation

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of state assignment of POI FEB, RAS on theme No. 124022100079-4, within the framework of Comprehensive Interdepartmental Program “Ecological Safety of Kamchatka: Study and Monitoring of Hazardous Natural Phenomena and Human Impacts” (NIOKTR 122012700198-9). The authors are thankful to the software developers for the opportunity of using the data posted on the websites of Global Meteorological Network, JMA and NOAA, as well as to the reviewer for his useful remarks.

For citation: Moroz, V.V., Shatilina, T.A. and Rudykh, N.I., 2025. Features of Forming the Water Abnormal Thermal Regimes in the Kuril-Kamchatka Region. *Physical Oceanography*, 32(4), pp. 464-478.

Введение

Исследуемый район, включающий прилегающие к юго-восточному и юго-западному побережьям п-ова Камчатка акватории, а также северную зону Курильской островной гряды (рис. 1), является одной из важных экономически значимых зон на востоке России.



Р и с. 1. Район исследований: 1 – восточное побережье Камчатки; 2 – Северо-Курильский район; 3 – западное побережье Камчатки (кружки – гидрометеорологические станции)

Fig. 1. Region under study: 1 – Kamchatka eastern coast, 2 – northern Kuril, 3 – Kamchatka western coast (points denote hydrometeorological stations)

При продолжающемся в последние десятилетия глобальном потеплении и увеличении повторяемости аномальных гидрометеорологических явлений [1–4] неизбежно возникают вопросы о влиянии изменений температурных условий среды на состояние биологических ресурсов и сырьевой базы рыболовства в российских дальневосточных водах. Поиск гидробионтами температурного оптимума и кормовой базы ведет к росту миграционной активности промысловых объектов и, соответственно, смещению районов их лова, что вызывает сложности прогнозирования промысла [5]. В связи с этим особое значение приобретает изучение факторов и причин, определяющих изменчивость термических условий среды и, особенно, формирование аномальных термических условий, влияющих (как позитивно, так и негативно) на продуктивность и функционирование экосистем.

Как установлено в настоящее время, особенности гидрологических условий исследуемого района обусловлены комплексом факторов, в том числе наличием вод различного происхождения (тихоокеанских Курило-Камчатского течения, трансформированных в северных проливах Курильской гряды, охотоморских), изменчивостью водообмена через проливы гряды, взаимодействием вод и их перераспределением приостровными и прибрежными течениями [6, 7]. К числу значимых факторов, определяющих изменчивость термических условий района в целом и отдельных его акваторий, относятся также изменчивость синоптико-климатических условий и муссонный характер атмосферных процессов с сезонным ходом направления ветров.

Согласно исследованиям последних лет, в ряде районов дальневосточных морей выявлена взаимосвязь между изменчивостью термических режимов и изменениями выраженности (изменениями давления) и положения региональных центров действия атмосферы (ЦДА), а также изменениями их локального воздействия на акватории [8, 9]. Показаны различия формирования барических полей в аномальные по термическому режиму годы, предложены методы распознавания и выделения предшествующих барических структур, которые определяют экстремальные термические режимы вод, влияющие на условия промысла [10]. Вместе с тем исследование тенденций климатических изменений термических условий в прибрежных акваториях показало неоднозначность ответа подстилающей поверхности на воздействия атмосферной циркуляции [11]. Как отмечалось ранее, решение проблемы промыслового прогнозирования для конкретных акваторий остается актуальным и связано с региональными особенностями формирования аномальных термических условий [5, 8, 9].

Цель настоящего исследования – определить причинно-следственные связи в механизмах формирования аномальных термических условий в конкретных зонах Курило-Камчатского района под воздействием атмосферных процессов.

В рамках работы решались следующие задачи:

- исследование межгодовой изменчивости термического режима вод на гидрометеорологических станциях (ГМС) и прилегающих акваториях, оценка тенденций изменчивости, выделение лет с аномальными термическими условиями в июне – сентябре в каждом районе;

- исследование межгодовой изменчивости выраженности (изменчивости давления) и положения сезонных ЦДА;

- оценка роли сезонных ЦДА в механизмах формирования аномальных термических режимов акватории с учетом особенностей гидрологических условий в каждом районе.

Данные и методы

Многолетняя изменчивость термических условий в прибрежных акваториях Камчатки исследовалась с использованием данных наблюдений за температурой воды, полученных из «Единой системы информации об обстановке в Мировом океане» (ЕСИМО) (URL: <http://portal.esimo.ru/portal/>), от Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) (URL: <http://meteo.ru>) на ГМС Росгидромета за 1980–2022 гг.

Для анализа термических условий прилегающих акваторий были привлечены данные о температуре воды на поверхности моря за 1980–2022 гг. в узлах регулярной сетки $0,25 \times 0,25^\circ$, приведенные на сайте <https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap/> интернет-ресурса *ERDDAP NOAA*. Для обработки и представления данных применялась программа *ODV*¹.

При оценке изменчивости термических условий использовались аномалии (отклонения среднемесячных значений температуры воды от среденно-

¹ Schlitzer R. Ocean Data View. URL: <https://odv.awi.de> (date of access: 17.06.2025).
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 41 № 4 2025

голетних). Годы с экстремальными термическими режимами выделялись с применением кластерного анализа.

Анализировалась атмосферная циркуляция над вторым естественным синоптическим районом (2-й е. с. р.) с использованием архивов реанализа (NCEP/NCAR Reanalysis Monthly Means and Other Derived Variables²) приземного атмосферного давления P_0 и геопотенциала H_{500} в узлах регулярной сетки $2,5 \times 2,5^\circ$ за 1980–2022 гг. При анализе интенсивности развития Охотского антициклона (ОА) использовались данные, размещенные на сайте Тихоокеанского филиала Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ТИНРО) (URL: <https://tinro.vniro.ru>). Для оценки изменчивости интенсивности развития ЦДА использовались аномалии (отклонения среднемесячных значений давления от средних многолетних). При анализе барических полей привлекались карты приземного давления P_0 и геопотенциала H_{500} за 2000–2022 гг., составляемые Японским метеорологическим агентством (англ. *Japan Meteorological Agency*, сокращ. *JMA*). Для оценки связей изменчивости термических условий и развития ЦДА применен корреляционный анализ.

Среднемесячные аномалии всех используемых в работе параметров были рассчитаны относительно климатической нормы периода 1991–2020 гг.

Результаты и обсуждение

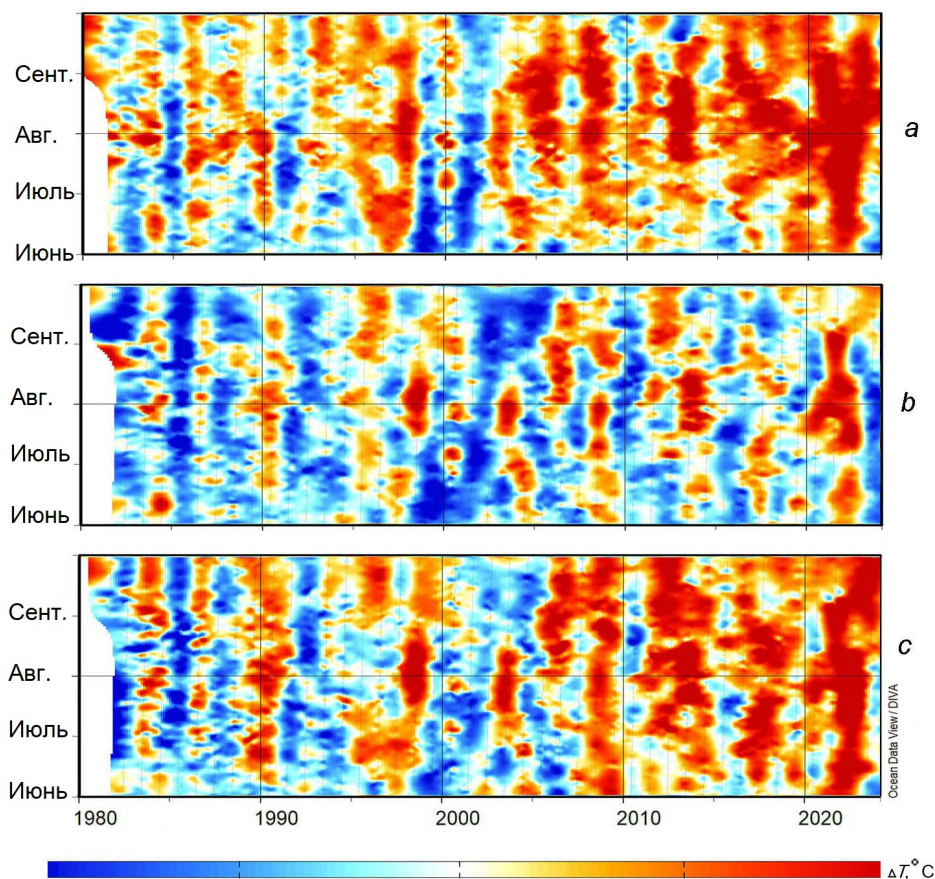
Формирование и изменчивость термического режима вод

Район 1 – Восточное тихоокеанское побережье Камчатки (рис. 1). Формирование температурных характеристик вод в этом районе определяется влиянием вод различного происхождения. С севера, со стороны Берингова моря, через Камчатский пролив с Камчатским течением на юг поступают холодные беринговоморские воды, с востока оказывает влияние ветвь более теплого Аляскинского течения. Для Камчатского и Аляскинского течений в теплый период года характерно формирование вихрей преимущественно антициклональной ориентации. Вихри имеют свои термохалинные характеристики и вносят соответствующий вклад в формирование термического режима акватории [7, 12]. Термические условия района весьма изменчивы, о чем свидетельствует их межгодовой ход (рис. 2, а).

Район 2 – Северо-Курильский. Проливы между северными Курильскими о-вами узкие и мелководные. Вместе с тем происходит активный водообмен море – океан через относительно широкий и глубокий (глубиной более 500 м) Четвертый Курильский пролив. В проливе имеет место двусторонняя схема течений [7]. Со стороны Тихого океана пролив подвержен влиянию вод распространяющегося с севера Курило-Камчатского течения. Поступление вод из Тихого океана в северную зону пролива подтверждается океанографическими наблюдениями за буями Argo. Некоторые буи из Тихого океана входят через пролив в Охотское море [12, 13]. В южную часть пролива поступают холодные охотоморские воды. Динамика вод в проливе и прилегающей акватории определяет формирование термических условий. Как и в предыдущем

² URL: https://apdrc.soest.hawaii.edu/datadoc/ncep_mon.php (date of access: 17.06.2025).

районе, термические условия здесь имеют значительную межгодовую изменчивость (рис. 2, *b*).



Р и с. 2. Межгодовая изменчивость аномалий температуры воды в июне – сентябре в районе 1, восточное побережье Камчатки (*a*), районе 2, Северо-Курильском (*b*), и районе 3, западное побережье Камчатки (*c*)

Fig. 2. Interannual variability of water temperature anomalies in June – September in the areas: 1 – Kamchatka eastern coast (*a*), 2 – northern Kuril (*b*), and 3 – Kamchatka western coast (*c*)

Район 3 – Западное охотоморское побережье Камчатки. Согласно циркуляции вод в данном районе, поступающие через северные проливы тихоокеанские воды распространяются на север с Западно-Камчатским течением вдоль юго-западного побережья п-ова Камчатка [14]. Таким образом, термические условия акватории юго-западного побережья (в том числе ГМС Октябрьская) также формируются под влиянием вод различного происхождения: частично Курило-Камчатского течения, собственно охотоморских и трансформированных в проливе приливным перемешиванием (рис. 2, *c*).

Изменчивость развития составляющих системы течений в значительной степени обуславливает перераспределение поступающего тепла и холода, определяя многолетнюю изменчивость температурного фона каждого района.

Ход многолетних изменений термического режима вод (рис. 2) свидетельствует о тенденции к потеплению в исследуемом районе в целом в течение последних четырех десятилетий, что подтверждают исследования предыдущих лет [1]. Согласно проведенным оценкам изменчивости температурных условий, в каждом районе для периода 1980–2022 гг. обнаружены положительные тренды. При этом на восточной и западной акваториях (район 1 и 3) в июле и августе тренды значимые (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Table 1

Коэффициенты линейного тренда для временных рядов температуры воды в июне – сентябре 1980–2000, 2001–2022 и 1980–2022 гг.

Linear trend coefficients for water temperature time series for June – September in 1980–2000, 2001–2022 and 1980–2022

Период / Period	Район 1 / Area 1	ГМС Петропавловск / Station Petropavlovsk	Район 2 / Area 2	Район 3 / Area 3	ГМС Октябрьская / Station Oktyabrskaya
<i>Июнь / June</i>					
1980–2022	0,02	0,02	0,01	0,03	0
1980–2000	0,01	–0,03	–0,02	0,02	0,03
2001–2022	0,06	–0,06	0,06	0,09	–0,01
<i>Июль / July</i>					
1980–2022	0,04	0,05	0,03	0,04	0,02
1980–2000	–0,01	–0,03	0,02	–0,03	0,08
2001–2022	0,11	0,05	0,08	0,09	0,03
<i>Август / August</i>					
1980–2022	0,05	0,06	0,02	0,05	0,02
1980–2000	0,05	–0,04	0,04	0,09	0,08
2001–2022	0,07	0,03	0,04	0,07	0,02
<i>Сентябрь / September</i>					
1980–2022	0,03	0,04	0,03	0,03	0
1980–2000	0,05	0,08	0,01	0,05	0,03
2001–2022	0,05	0,04	0,04	0,05	–0,01

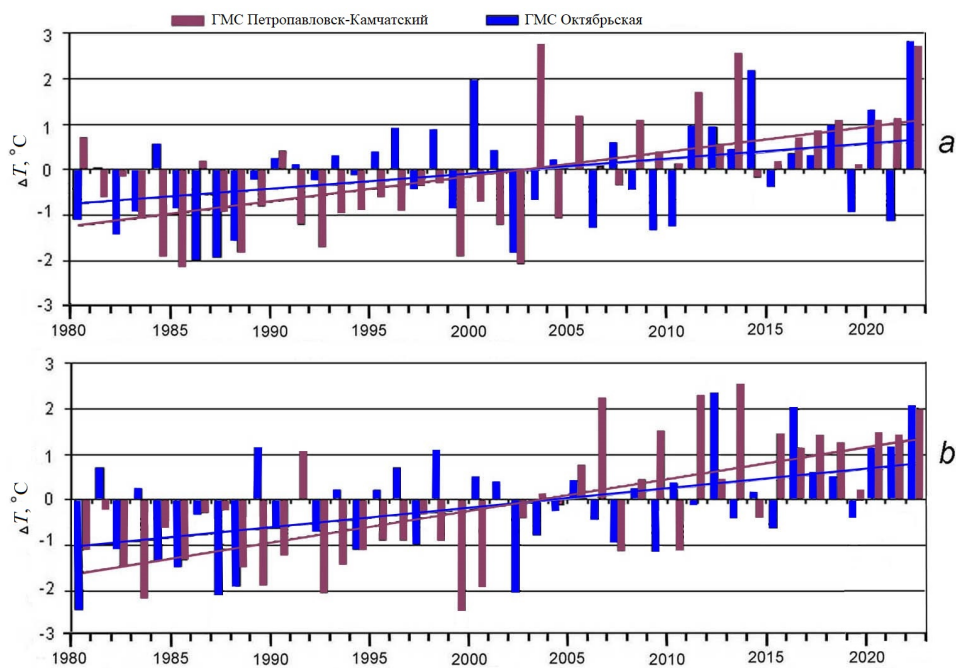
П р и м е ч а н и е. Полу жирным шрифтом выделены статистически значимые (95 %) оценки.

Note. Statistically significant (95 %) estimates are highlighted in bold.

Вместе с тем указанные оценки свидетельствуют о различиях изменчивости температурных условий в течение двух двадцатилетних фаз исследуемого

периода. Для фазы 1980–2000 гг. на акваториях всех трех районов в июне – июле тренды незначимы и преимущественно отрицательные, что отражает высокую частоту формирования холодных термических режимов в этот период и свидетельствует о достаточно хорошем развитии первой стадии летнего дальневосточного муссона и влиянии ОА [8, 9]. В то же время для периода второго десятилетия (2001–2022 гг.) значимые положительные тренды свидетельствуют об ослаблении первой холодной стадии муссона и преимущественно раннем формировании теплых термических режимов, что характерно для второй стадии муссона в июле – августе, иногда сентябре, при влиянии Гавайского антициклона (ГА). Однако следует отметить отсутствие значимых положительных трендов в августе – сентябре в Северо-Курильской зоне (район 2). Видимо, вертикальное приливное перемешивание в проливах гряды [7] «маскирует» поступление более теплых вод с ветвью Курило-Камчатского течения.

Динамика аномалий на ГМС достаточно хорошо отражает многолетнюю изменчивость термических условий восточной и западной прикамчатских акваторий. На тихоокеанской акватории восточного побережья Камчатки в Авачинском заливе (ГМС Петропавловск-Камчатский) и охотоморской акватории западного побережья (ГМС Октябрьская) изменчивость термических условий также различна на протяжении двух двадцатилетних фаз исследуемого периода. В 1980–2000 гг. преобладают отрицательные экстремумы термического режима, в следующие два десятилетия – положительные (рис. 3).



Р и с. 3. Межгодовая изменчивость аномалий температуры воды в июле (a) и августе (b) и соответствующие линейные тренды

F i g. 3. Interannual variability of water temperature anomalies in July (a) and August (b), and corresponding linear trends

Анализ многолетней изменчивости термических условий районов восточного (ГМС Петропавловск-Камчатский) и западного (ГМС Октябрьская) побережий Камчатки показывает значительные флуктуации аномалий температуры воды. В соответствии с оценкой межгодовой изменчивости термических режимов на ГМС западного и восточного побережий Камчатки в июне – сентябре за весь исследуемый период (1980–2022 гг.), проведенной с применением кластерного анализа методом К-средних, выделены годы с экстремальными термическими режимами. Определены однородные по термическому режиму группы лет: близкие к норме – с аномалиями по абсолютной величине менее 1,0 °С, с холодным и теплым режимами – с аномалиями 1,0–1,5 °С и с экстремально холодными и теплыми термическими режимами – с аномалиями по абсолютной величине более 1,5 °С (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Table 2

Годы с экстремальными термическими режимами на ГМС за 1980–2022 гг.
Years known for abnormal thermal regimes at hydrometeorological stations during 1980–2022

ГМС / Station	Термический режим / Thermal regime	
	холодный / cold	теплый / warm
<i>Июнь / June</i>		
Петропавловск / Petropavlovsk	1985, 1994, 1999, 2000, 2001, 2018	2003, 2009, 2013, 2014
Октябрьская / Oktyabrskaya	1980, 1985, 2017	–
<i>Июль / July</i>		
Петропавловск / Petropavlovsk	1984, 1985, 1988, 1992, 1999, 2002	2003, 2011, 2013, 2022
Октябрьская / Oktyabrskaya	1986, 1987, 1988, 2002	2000, 2014, 2022
<i>Август / August</i>		
Петропавловск / Petropavlovsk	1983, 1988, 1989, 1992, 1999, 2000	2006, 2009, 2011, 2013, 2022
Октябрьская / Oktyabrskaya	1980, 1985, 1987, 1988, 2002	2012, 2016, 2022
<i>Сентябрь / September</i>		
Петропавловск / Petropavlovsk	1999, 2001, 2012	2008, 2014, 2015, 2020, 2021
Октябрьская / Oktyabrskaya	1983, 2002	2006, 2020, 2022

Согласно табл. 2, на акваториях, прилегающих как к западному, так и к восточному побережью Камчатки, для периода 1980–1999 гг. характерно формирование аномально холодных термических режимов. В 2000–2022 гг. отмечен переход к появлению лет с аномально теплым термическим режимом, наиболее явно проявляющийся в июле – сентябре последнего пятилетия.

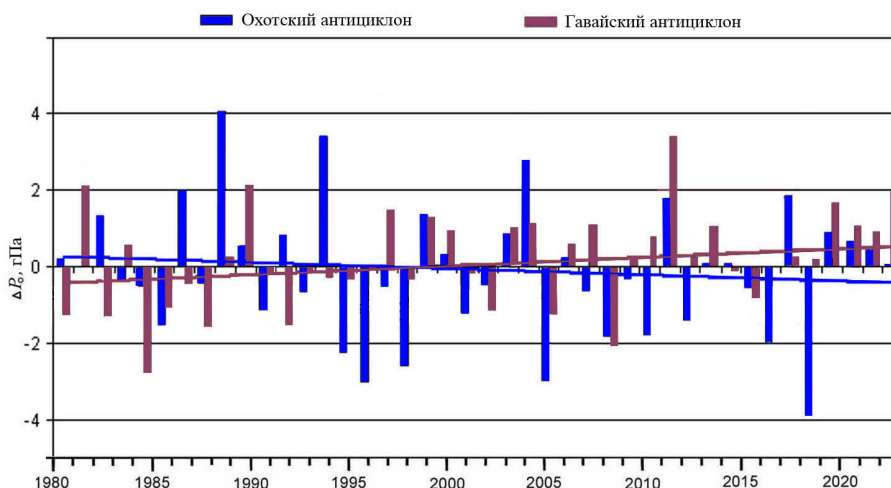
Максимальные значения аномалий (до 3 °С) отмечались на ГМС и прилегающих акваториях в июле 2022 г. (рис. 2, 3).

Термическое состояние и гидродинамика морской поверхности в значительной степени определяются приземными ветровыми условиями, направлением и интенсивностью переноса воздушных масс, что, в свою очередь, связано с изменчивостью атмосферной циркуляции, ее локальным воздействием [2, 8, 9].

Для выявления механизмов формирования в отдельные годы на исследуемых акваториях аномальных термических условий проанализирована изменчивость атмосферных процессов региона и их воздействия на подстилающую акваторию.

Роль атмосферной циркуляции в формировании аномальных термических условий акватории

Циркуляцию атмосферы и перенос воздушных масс в районе Камчатки в период летнего дальневосточного муссона с характерными ветрами южных румбов в основном определяют такие ЦДА, как формирующийся над Охотским морем ОА, в высотных полях – тропосферная депрессия (ТД), со стороны Тихого океана – северо-тихоокеанская область высокого давления (ГА). В июне – июле, когда развивается первая стадия летнего дальневосточного муссона, в тыловой части ТД на Охотское море выходят холодные воздушные массы, преимущественно арктического происхождения, наблюдаемые на синоптических картах в виде небольших антициклонов, которые и поддерживают область высокого давления (ОА) над Охотским морем. Установлено, что при развитии ОА холодные воздушные массы формируют пониженный температурный фон подстилающей морской поверхности, при усилении влияния ГА (что характерно для второй стадии муссона) происходит отепляющее воздействие и формирование положительного температурного фона [8, 9].



Р и с. 4. Межгодовая изменчивость аномалий приземного давления (ΔP_0) в июле и соответствующие линейные тренды

F i g. 4. Interannual variability of near-land pressure anomalies (ΔP_0) in July and corresponding linear trends

Следует отметить, что, согласно результатам анализа многолетней изменчивости приземного давления за исследуемый сорокалетний период при устойчивой тенденции к повышению интенсивности развития ГА (рис. 4), для ОА характерны значительные флуктуации. В первую двадцатилетнюю фазу (1980–2000 гг.) преобладают годы с положительными аномалиями давления (интенсивное развитие ОА), а для второй фазы характерно формирование преимущественно отрицательных аномалий. Результирующий отрицательный тренд свидетельствует об ослаблении этого ЦДА.

Т а б л и ц а 3

Table 3

Коэффициенты корреляции между аномалиями температуры воды и аномалиями геопотенциала H_{500} над Охотским морем в июне – сентябре 1980–2022, 1980–2000, 2001–2022 гг.
Correlation coefficients between the anomalies of water temperature and H_{500} geopotential over the Okhotsk Sea for June – September in 1980–2022, 1980–2000 and 2001–2022

ГМС, район / Station, Area	Июнь / June	Июль / July	Август / August	Сентябрь / September
<i>1980–2022</i>				
Район 1 / Area 1	0,23	0,45	0,28	0,26
Петропавловск / Petrpavlovsk	0,54	0,47	0,27	0,13
Район 2 / Area 2	0,25	0,49	0,32	0,23
Район 3 / Area 3	0,16	0,44	0,39	0,28
Октябрьская / Oktyabrskaya	0,32	0,13	0,14	–0,14
<i>1980–2000</i>				
Район 1 / Area 1	0,36	0,29	0,21	0,11
Петропавловск / Petrpavlovsk	0,59	0,13	0,06	0,10
Район 2 / Area 2	0,30	0,50	0,06	0,21
Район 3 / Area 3	0,47	0,43	0,15	0,26
Октябрьская / Oktyabrskaya	0,37	0,12	–0,17	–0,09
<i>2001–2022</i>				
Район 1 / Area 1	0,08	0,48	0,22	0,37
Петропавловск / Petrpavlovsk	0,60	0,53	0,30	0,14
Район 2 / Area 2	0,20	0,48	0,43	0,24
Район 3 / Area 3	–0,06	0,32	0,46	0,28
Октябрьская / Oktyabrskaya	0,27	0,15	0,34	–0,19

П р и м е ч а н и е. Полу жирным шрифтом выделены статистически значимые (95 %) оценки.

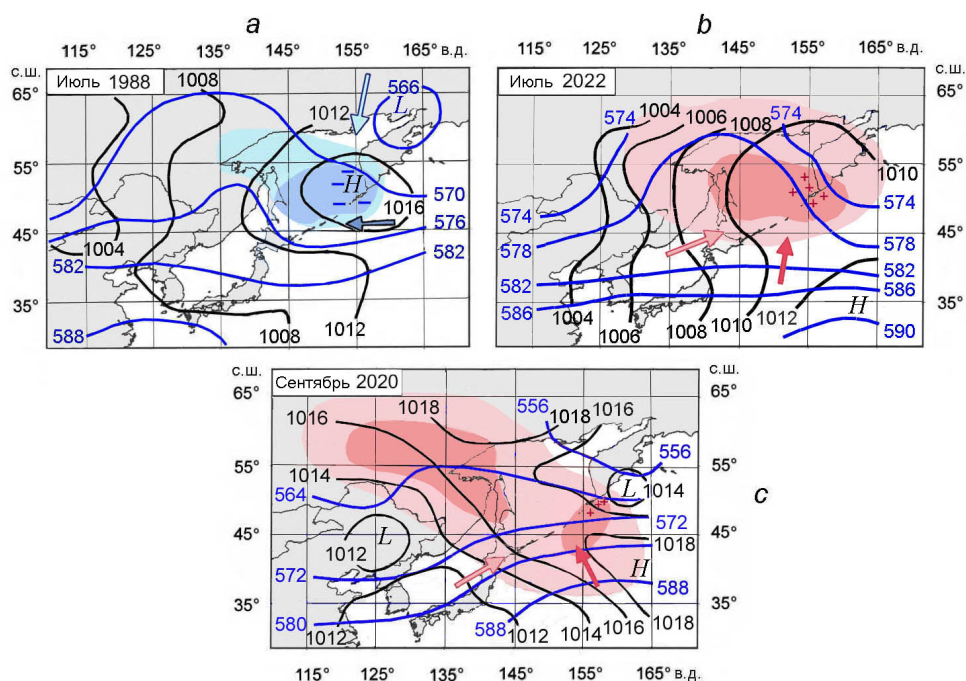
Note. Statistically significant (95 %) estimates are highlighted in bold.

Корреляционный анализ между аномалиями температуры воды и аномалиями давления над Охотским морем показал, что существует значимая корреляционная связь (период июнь – июль) аномалий температуры воды с аномалиями геопотенциала H_{500} , характеризующими развитие ТД (табл. 3). Максимальные значения коэффициентов корреляции ($\sim 0,6$) наблюдаются в июне на ГМС Петропавловск-Камчатский. Высокие значения коэффициентов корреляции ($\sim 0,4\text{--}0,5$) следует отметить и в июле почти на всех исследуемых акваториях.

При этом корреляционный анализ аномалий температуры воды с аномалиями давления в ГА показал низкую корреляцию, отсутствие значимых связей. Однако, как было выявлено ранее, связь формирования термических режимов с изменчивостью давления в региональных ЦДА неоднозначна: наряду с интенсивностью развития важную роль играют изменчивость положения таких атмосферных барических образований и соответствующее локальное воздействие [8, 9]. Это может быть одной из причин низкой корреляции формирования температурных экстремумов на акваториях с интенсивностью развития такого масштабного барического образования, как ГА.

Согласно результатам анализа барических ситуаций в годы аномальных холодных или теплых температурных условий на исследуемых акваториях, подтверждается вывод из предыдущих исследований в ряде районов дальневосточных морей о различиях в эти годы структуры барических полей и положения ЦДА [9], из чего следуют разное воздействие и различия механизмов формирования термического режима вод.

Как отмечалось выше, в первую двадцатилетнюю фазу (1980–2000 гг.) исследуемого периода на прикамчатских акваториях в отдельные годы формируются преимущественно аномальные холодные температурные условия (см. табл. 2). Характерным примером является структура барических полей в июле 1988 г. (рис. 5, а). В поле приземного давления наблюдается развитый ОА, локализованный над северо-восточной акваторией Охотского моря. В средней тропосфере на карте абсолютной топографии 500 мб (AT_{500}) отмечается холодная ложбина, расположенная над Камчатским п-овом и направленная на Курильские о-ва. В дельте ложбины наблюдается очаг экстремального понижения геопотенциала H_{500} , где при нисходящих потоках скапливается холодный воздух у земли, происходит формирование экстремально холодных термических условий. Такая структура атмосферных полей способствует выносу холодных воздушных масс с севера, северо-запада над всем исследуемым районом. Температурный фон подстилающей поверхности понижается. Отрицательные температурные аномалии в июле 1988 г. на восточной и западной прикамчатских акваториях составили $\sim -2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 3). В условиях динамического ветрового воздействия с севера, северо-запада происходит интенсификация Курило-Камчатского течения, усиление притока холодных берингоморских и тихоокеанских вод в северокурильский район [15–17], что в комплексе способствует формированию аномально холодного термического режима на исследуемой акватории.



Р и с. 5. Структуры полей приземного давления P_0 , гПа (черные изобары), и геопотенциала H_{500} , гПа (синие изогипсы) в годы формирования отрицательных (a) и положительных (b, c) аномалий термических режимов. Символом «H» обозначено высокое давление, «L» – низкое давление; «-» и «+» – отрицательные и положительные аномалии температуры воды соответственно; очаги отрицательных и положительных аномалий геопотенциала H_{500} показаны соответственно голубым и розовым цветом; очаги аномально низкой и высокой температуры воздуха – синим и красным цветом; перемещение холодных и теплых воздушных масс – стрелками (соответственно голубыми и розовыми – в средней тропосфере, синими и красными – в приземном слое)

F i g. 5. Structures of the fields of near-surface pressure P_0 , hPa (black isobars) and geopotential H_{500} , hPa (blue isohypses) in the yeas of forming the negative (a) and positive (b, c) anomalies in thermal regimes. H is high pressure, L is low pressure; “-” and “+” are negative and positive water temperature anomalies, respectively; centers of negative and positive anomalies of the H_{500} geopotential are shown in blue and pink, respectively; centers of abnormally low and high air temperature – in blue and red; arrows indicate the movement of cold and warm air masses (blue and pink – in the mid troposphere, blue and red – in the near-land layer, respectively)

Механизм формирования аномально теплых термических режимов на всей акватории (что характерно для 2001–2022 гг. – второй фазы исследуемого периода) обусловлен отсутствием холодных депрессий над Охотским морем и Камчаткой. В качестве примера можно выделить экстремально теплый по термическому режиму 2022 г. (см. рис. 2, 3). Следует отметить различия структуры барических полей в 1988 и 2022 гг. В 2022 г. проявляется зональность изогипс в поле H_{500} , что отражает западный перенос воздушных масс (рис. 5, b). Гребень ГА, в вершине которого наблюдается зона повышения геопотенциала H_{500} , распространен на весь исследуемый район. При вытянутой на северо-запад северотихоокеанской ветви ГА в приземном поле над районом формируется очаг экстремальных положительных аномалий темпе-

ратуры воздуха, на акваториях регистрируются экстремальные положительные значения температуры воды. Такая структура атмосферных полей со значительным распространением на северо-запад (на охотоморскую акваторию) северо-тихоокеанской ветви Гавайского максимума, переносом по его западной периферии теплых воздушных масс и формированием аномально теплых термических режимов на прикамчатских акваториях характерна для последнего пятилетия. Восточные, юго-восточные ветры, ослабляя Курило-Камчатское течение, способствуют развитию притока на запад более теплых вод с вихрями продолжения Аляскинского течения, что также влияет на термический режим вод в этом районе [12, 13].

Как отмечалось выше, формирование аномальных термических режимов вод, влияющих (как позитивно, так и негативно) на продуктивность экосистем, весьма важно для функционирования последних. С аномально теплыми термическими режимами может быть связано формирование аномальных гидрологических условий, негативно отражающихся на экосистемах и гидробионтах, как это наблюдалось в сентябре и октябре 2020 г. [18]. Структуры атмосферных полей в сентябре 2020 г. показаны на рис. 5, с. На фоне сформировавшегося аномально теплого термического режима вод (увеличение положительных аномалий температуры до 1,5 °C) у юго-восточного побережья Камчатки прошли циклоны, что вызвало изменение структуры поля приземного давления. Такие изменения повлекли локальную смену направления ветров у побережья с юго-восточного на северо-восточное, северное. Прохождение циклонов, видимо, способствовало формированию апвеллинга и, как отмечалось в литературе [19], поступлению биогенных элементов из более глубоких слоев, что вызвало «цветение» при благоприятных аномально теплых температурных условиях в поверхностном фотическом слое токсичных микроводорослей. Распространение их вдоль побережья согласно циркуляции вод и далее к северным Курильским проливам вызвало негативные последствия для экосистемы значительной части акватории.

Таким образом, проведенные исследования показывают важность учета изменчивости структуры барических полей, положения ЦДА и соответствующего локального воздействия при анализе механизмов формирования аномальных термических условий.

В результате анализа изменчивости атмосферных процессов региона и их воздействия на подстилающую акваторию выявлены причинно-следственные связи. Механизмы формирования аномальных термических условий связаны с региональными особенностями атмосферной циркуляции: с аномальными изменениями развития и положения сезонных ЦДА, изменениями их локального воздействия.

Заключение

Согласно оценкам многолетней изменчивости температурных условий на исследуемых акваториях в июне – сентябре за период 1980–2022 гг., выявлены положительные тренды, значимые в июле и августе.

Установлены различия изменчивости температурных условий в течение двух двадцатилетних фаз исследуемого периода. С 1980 по 2000 г. на акваториях всего района в июне – июле тренды преимущественно отрицательные. Это отражает высокую частоту формирования холодных термических режимов в течение данной фазы и свидетельствует о достаточно хорошем развитии первой стадии летнего дальневосточного муссона, влиянии ОА. В течение данного периода на акваториях западного и восточного побережий Камчатки аномально теплые режимы не наблюдались. Для второй фазы исследуемого периода, с 2001 по 2022 г., выявлены значимые положительные тренды, свидетельствующие об ослаблении первой холодной стадии муссона и преимущественно раннем формировании теплых термических режимов. В данной фазе отмечается переход к появлению лет с аномально теплыми термическими режимами, наиболее явно проявляющийся в июле – сентябре последнего пятилетия.

Выявлена значимая корреляционная связь аномалий температуры воды с аномалиями геопотенциала H_{500} , характеризующими интенсивность развития ТД, которая, в свою очередь, поддерживает развитие ОА. Для первой двадцатилетней фазы изменчивости давления в области ОА характерно формирование положительных аномалий (интенсивное развитие), но для второй фазы характерно формирование преимущественно отрицательных аномалий, свидетельствующих об ослаблении этого ЦДА.

Корреляционный анализ межгодовой изменчивости аномалий температуры воды и аномалий давления в области ГА показал отсутствие значимых связей. Формирование температурных экстремумов на акваториях имеет локальный характер, что может быть одной из причин низкой корреляции с интенсивностью развития такого масштабного барического образования, как ГА, при достаточно хорошей корреляции с региональным центром действия ОА. Показано, что наряду с интенсивностью развития данных центров действия атмосферы важную роль в формировании термического режима играет положение этих барических образований. Установлено, что ГА имеет устойчивую тенденцию к повышению интенсивности развития. В условиях ослабления ОА при распространении на северо-запад северотихоокеанской ветви ГА возрастает термическое и динамическое воздействие этого максимума на исследуемые акватории, что способствует формированию термического режима вод с положительными аномалиями.

Показано, что механизмы формирования аномальных термических условий связаны с региональными особенностями атмосферной циркуляции: аномальными изменениями развития и положения сезонных ЦДА, изменениями их локального воздействия.

Материалы исследования могут быть применены в промысловой океанографии, использованы в региональных прогностических моделях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климатические изменения термических условий окраинных морей западной части Тихого океана / И. Д. Ростов [и др.] // Метеорология и гидрология. 2020. № 3. С. 44–57. EDN FYBWCF.
2. Роль глобальной атмосферной осцилляции в формировании климатических аномалий дальневосточного региона России / В. И. Бышев [и др.] // Доклады Академии наук. 2014. Т. 458, № 1. С. 92–96. <https://doi.org/10.7868/S0869565214250148>
3. *Johnson G. C., Lyman J. M.*, Warming trends increasingly dominate global ocean // *Nature Climate Change*. 2020. Vol. 10. P. 757–761. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0822-0>
4. Interannual and interdecadal variations of the South Asian and western Pacific Subtropical Highs and their relationships with Asian-Pacific summer climate / X. Jiang [et al.] // *Meteorology and Atmospheric Physics*. 2011. Vol. 113, iss. 3–4. P. 171–180. <https://doi.org/10.1007/s00703-011-0146-8>
5. *Шунтов В. П., Иванов О. А.* Климатические изменения и современное состояние биоты российских вод дальневосточных морей // *Известия ТИНРО*. 2019. Т. 197. С. 83–107. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2019-197-83-107>
6. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. IX : Охотское море. Вып. 1 : Гидрометеорологические условия / Отв. ред. Ф. С. Терзиев. Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 1998. 398 с.
7. *Богданов К. Т., Мороз В. В.* Воды Курило-Камчатского течения и течения Ойясио. Владивосток : Дальнаука, 2004. 141 с. EDN QKEOIR.
8. *Шатилина Т. А., Цициашвили Г. Ш., Радченкова Т. В.* Особенности изменчивости летних центров действия атмосферы над Дальним Востоком и климатические экстремумы в период 1980–2017 гг. // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. Метеорология*. 2019. № 56. С. 61–80. <https://doi.org/10.33933/2074-2762-2019-56-61-80>
9. *Мороз В. В., Шатилина Т. А.* Особенности формирования экстремальных состояний термического режима вод в районе Курильской островной гряды в летний период под воздействием атмосферных процессов // *Морской гидрофизический журнал*. 2022. Т. 38, № 5. С. 451–465.
10. *Шатилина Т. А., Цициашвили Г. Ш., Радченкова Т. В.* Использование метода интервального распознавания для выделения предшествующих барических структур, определяющих экстремальные термические режимы в южнокурильском районе Тихого океана в летний период // *Известия ТИНРО*. 2021. Т. 201, № 22. С. 470–483. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2021-201-470-483>
11. *Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., Воронцов А. А.* Тенденции климатических изменений термических условий в прибрежных акваториях западной части Берингова моря и прилегающих районах за последние десятилетия // *Известия ТИНРО*. 2018. Т. 193, № 2. С. 167–182. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2018-193-167-182>
12. *Рогачев К. А., Шлык Н. В.* Роль алеутских вихрей в изменении характеристик халоклина Камчатского течения // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 1. С. 60–67. EDN YMRYQC.
13. *Андреев А. Г., Жабин И. А.* Влияние продолжения Аляскинского течения на динамику вод восточной части Охотского моря // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. 2015. № 2. С. 87–92. EDN TTYLIN.
14. *Жигалов И. А.* Сезонная и межгодовая изменчивость геострофических течений в районе западной Камчатки // *Известия ТИНРО*. 2012. Т. 169. С. 94–99.
15. *Рогачев К. А., Шлык Н. В.* Многолетние изменения вихря ветра и уровень моря в Камчатском течении // *Океанология*. 2005. Т. 45, № 3. С. 339–348. EDN HRZHNL.
16. Водообмен между Беринговым морем и Тихим океаном через Камчатский пролив / И. А. Жабин [и др.] // *Метеорология и гидрология*. 2010. № 3. С. 84–92. EDN MBBUSH.

17. *Isoguchi O., Kawamura H.* Seasonal to interannual variations of the western boundary current of the subarctic North Pacific by a combination of the altimeter and tide gauge sea levels // *Journal of Geophysical Research*. 2006. Vol. 111, iss. C4. C04013. <https://doi.org/10.1029/2005JC003080>
18. Некоторые особенности океанологических условий осеннего цветения микроводорослей у юго-восточного побережья Камчатки / М. К. Пичугин [и др.] // *Подводные исследования и робототехника*. 2020. № 4. С. 70–73. <https://doi.org/10.37102/24094609.2020.34.4.010>
19. *Цхай Ж. Р., Шевченко Г. В.* Особенности распределения концентрации хлорофилла *a* у восточного побережья Камчатки осенью 2020 года по спутниковым данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19, № 1. С. 226–238. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-226-238>

Об авторах:

Мороз Валентина Васильевна, старший научный сотрудник, лаборатория информатики и мониторинга океана, ФГБУН ТОИ им. В. И. Ильичева ДВО РАН (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат географических наук. **ORCID ID: 0000-0001-5937-4080**, **Scopus Author ID: 7102508049**, **ResearcherID: K-1520-2018**, **SPIN-код: 7024-0055**, moroz@poi.dvo.ru

Шатилина Татьяна Александровна, ведущий научный сотрудник, лаборатория промысловой океанологии, Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, тихоокеанский филиал ФГБНУ ВНИРО (ТИНРО) (690091, Россия, г. Владивосток, тупик Шевченко, 4), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0005-7954-9745**, **Scopus Author ID: 6505548902**, **SPIN-код: 8296-4906**, tatiana.shatilina@tinro.vniro.ru

Рудых Наталья Ивановна, старший научный сотрудник, лаборатория информатики и мониторинга океана, ФГБУН ТОИ им. В. И. Ильичева ДВО РАН (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат географических наук, **ResearcherID: N-5821-2018**, **SPIN-код: 8068-7093**, rudykh@poi.dvo.ru