## \_\_\_\_\_ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ \_\_\_\_\_ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

# ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ БЕРИНГОВА МОРЯ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА ERA5, ОСНОВАННЫХ НА СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

© 2024 г. Г. В. Шевченко<sup>1, 2,</sup> \*, Ж. Р. Цхай<sup>1</sup>, Д. М. Ложкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сахалинский филиал ФГБНУ "ВНИРО" ("СахНИРО"), Южно-Сахалинск, Россия <sup>2</sup>Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Южно-Сахалинск, Россия \*E-mail: shevchenko\_zhora@mail.ru Поступила в редакцию 15.03.2023 г.

Особенности пространственно-временной изменчивости температуры поверхности Берингова моря изучены путем построения средних многолетних распределений для различных месяцев года и с применением метода естественных ортогональных функций по данным реанализа ERA5, основанных преимущественно на спутниковой информации, за период 1998–2020 гг. (пространственное разрешение данных – четверть градуса, временной интервал – один месяц). Также в каждой пространственной ячейке для каждого месяца были рассчитаны амплитуды и фазы годовой и полугодовой гармоник, отражающие сезонные изменения термических условий на изучаемой акватории. Определены коэффициенты линейного тренда, которые показали устойчивую тенденцию к потеплению поверхностного слоя вод моря, наиболее выраженную летом. Рассмотрены экстремальные отклонения от средних многолетних значений (аномалии) температуры поверхности Берингова моря.

*Ключевые слова:* температура поверхности моря, реанализ, термический режим, линейный тренд, гармонический анализ, метод естественных ортогональных функций, Берингово море

DOI: 10.31857/S0205961424010059, EDN: GMSLES

### введение

Западная часть Берингова моря является важным районом для российского рыболовства. В частности, у российского побережья добывается значительный объем тихоокеанских лососей, сельди, мойвы и других видов рыб. Это определяет интерес к изучению особенностей термического режима в данном бассейне, к происходящим в нем процессам на фоне глобального потепления и их влиянию на основные объекты рыбного промысла (Кровнин и др., 2021) и экосистему арктической части Тихого океана (Baker et al., 2020). Ряд работ указывает на наличие тенденции к повышению температуры поверхностного слоя воды Берингова моря (Overland, 2004; Хен и др., 2008, 2022; Ростов и др., 2018). В (Хен и др., 2022) было выбрано три крупных квадрата в западной, северной и восточной частях его акватории, в которых были построены усредненные по пространству и по сезонам графики хода температуры поверхности моря (ТПМ). Было установлено, что тенденция к потеплению характерна для разных частей рассматриваемого бассейна во все сезоны года.

В то же время многие важные вопросы, касаюшиеся особенностей сезонных и межгодовых вариаций ТПМ на различных участках моря, значительно отличающихся по своим физико-географическим характеристикам (наиболее сушественными являются различия батиметрических условий в более глубоководной юго-западной и мелководной северо-восточной его частях), до настоящего времени недостаточно изучены. В последние годы появились информационные ресурсы, позволяющие провести всесторонний пространственно-временной статистический анализ широкого набора гидрометеорологических параметров, в том числе температуры поверхности моря. Одним из них является сайт свободного доступа https://cds.climate. copernicus.eu, на котором представлены данные реанализа ERA5. Такая работа была выполнена для северо-западной части Тихого океана (до меридиана 180° в.д.) и дальневосточных морей, включая западную часть Берингова моря (Цхай и др., 2022).

Основной целью данной работы было выявление основных особенностей пространственно-временной изменчивости термических условий в поверхностном слое всей акватории Берингова моря

на основе системного статистического анализа данных реанализа за 1998-2020 гг. и сравнение полученных результатов с основанными на судовых измерениях (Гидрометеорология..., 1999: Лучин, 2019). Особое внимание уделялось вариациям, которые можно было бы оценить как реакцию данного бассейна на глобальное потепление. Имеющиеся материалы позволяли вычислить линейные тренды в каждой пространственной ячейке изучаемой области и определить участки акватории, где однонаправленные изменения проявляются в наибольшей степени. Наличие массива данных во всей области с постоянной дискретностью позволило применить метод естественных ортогональных функций (ЕОФ). предназначенный для изучения особенностей сезонных и межгодовых вариаций гидрометеорологических параметров (Багров, 1959).

При анализе термических условий в различных бассейнах существенное внимание традиционно уделяется ситуациям, когда температура воды была существенно выше или ниже средних многолетних значений (норм). В таких случаях нормальное функционирование экосистемы водоема нарушается, что может негативно сказаться на состоянии популяций морских организмов, в том числе имеющих промысловое значение. В данной работе рассмотрены наиболее значительные нарушения термического режима, когда аномалии имели не только большую величину, но и наблюдались на существенной части акватории Берингова моря.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование базировалось на данных реанализа ERA5 по температуре поверхности Берингова моря за 1998-2020 гг., взятых с сайта https://cds.climate. copernicus.eu. Эти материалы основаны на широком спектре наблюдений за температурой воды в поверхностном слое океана. включая контактные судовые измерения. всплывающие буи ARGOS, дрифтеры и т.д. Однако главной основой данных ТПМ являлись спутниковые наблюдения за морской поверхностью, важным преимуществом которых являлся полный охват акватории Мирового океана, а также информация о состоянии атмосферы, используемая при моделировании процессов в системе океан-атмосфера. Пространственное разрешение данных составляло четверть градуса, временное - один месяц. Область исследования была ограничена координатами 51.5°-66° с.ш. и 161° в.д. - 157° з.д. и полностью включала акваторию изучаемого бассейна, а также два участка северо-западной и северо-восточной части Тихого океана, примыкающих к Алеутской островной гряде (рис. 1).

Анализ выбранного материала проведен по следующей схеме. В каждой пространственной ячейке для каждого месяца и посезонно рассчитаны средние многолетние значения ТПМ и определены параметры линейного тренда методом наименьших квадратов (МНК). Средние многолетние распределения в различные месяцы или сезоны



Рис. 1. Карта района исследований (https://earth.google.com/).

года характеризовали изменения термических vcловий в течение года. Помимо этого, проанализирована динамика среднемесячных величин ТПМ по всей акватории. Лля опрелеления количественных характеристик сезонных вариаций температуры с помощью МНК вычислены амплитуды и фазы годовой и полугодовой гармоники. Последовательность временных слоев ТПМ изучена с использованием метода разложения по ЕОФ (Багров, 1959). Межгодовая изменчивость температуры поверхности моря и других параметров выражена, главным образом, в модуляции годовой гармоники (отражающей изменчивость летних максимумов и зимних минимумов). Во временных функциях главных мод разложения ТПМ также выявлены подобные колебания, поэтому для них выполнен аналогичный анализ с расчетом гармоник.

Для идентификации значительных отклонений термических условий от обычных применялась методика, разработанная в (Цхай, Шевченко, 2013). В каждой пространственной ячейке изучаемой области для каждого месяца были рассчитаны не только средние многолетние значения (нормы), но и среднеквадратические отклонения. Выбирались случаи, когда аномалия превышала удвоенную величину среднеквадратического отклонения, что указывало на экстремальные термические условия, и подсчитывалась число таких ячеек. В анализируемую выборку отбирались те моменты времени (месяц и год), когда такие условия наблюдались не менее чем на 5% площади Берингова моря.

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАРИАЦИЙ ТПМ

На рис. 2 приведены средние многолетние распределения температуры поверхности моря для различных сезонов года – зимы (февраль), весны (май), лета (август) и осени (ноябрь).

Подробное описание пространственных распределений температуры воды, построенных помесячно на основе судовых измерений, было приведено в работе (Гидрометеорология, 1999), что позволяет сравнить их с результатами, полученными по данным реанализа. В этой работе отмечалось две важных особенности гидрологического режима Берингова моря, проявляющихся в сезонных вариациях температуры поверхностного слоя воды. Первая из них связана с тем, что на его акватории выделяются два периода, различающихся крупномасштабными особенностями распределения ТПМ. На протяжении большей части года. в холодный период и весной (с ноября по июнь) главным отепляющим фактором является поступление более теплой океанской воды через проливы Алеутской островной гряды, поэтому наиболее высокие значения температуры отмечены в южной части моря. Летом же (июль-сентябрь) наиболее важным является прогрев мелководных районов на северо-востоке и на западе, в Карагинском и Анадырском заливах, а вдоль островной гряды температура существенно ниже, чем на остальной части бассейна. Поле температуры в октябре является переходным.

Вторая особенность связана с формированием выраженного термического фронта между мелководной северо-восточной и более глубоководной юго-западной частями изучаемого бассейна, существующего с января по июнь. К аналогичным выводам пришел и В.А. Лучин (Лучин, 2019) при анализе сезонной динамики термического состояния верхнего квазиоднородного слоя в Беринговом море.

Обратимся теперь к пространственным распределениям ТПМ по данным реанализа. Зимой эти распределения в Беринговом море (они идентичны представленному на рис. 2 в период с января по апрель) характеризуется понижением значений от Алеутской островной дуги в направлении берега Азии, что, очевидно, отражает влияние затока более теплой океанской воды через проливы. На акватории моря значения ТПМ плавно уменьшается от 3.5° до 0°С вблизи Карагинского залива и участка побережья между мысами Наварин и Олюторский. Здесь выделяется узкая полоса с отрицательными значениями температуры, формируется припай. Более обширная зона с водой с отрицательными значениями (от -1.3° до -1.7°С) выделяется в северной части моря. Здесь также обычно наблюдаются обширные ледяные поля, но в данных реанализа в замерзающих районах чаще всего указывается температура замерзания морской воды. Четко выделяется термический фронт над свалом глубин. В прилегающей к островам северо-западной части Тихого океана (СЗТО) температура колеблется в достаточно узких пределах - от 3.7° до 4.1°С, и уменьшается до 1.5°С в районе Командорских островов. В целом, пространственные распределения ТПМ по спутниковым и судовым данным идентичны, за исключением некоторых несущественных деталей.

Весной структура пространственного распределения ТПМ сходна с наблюдавшейся в зимний период, но происходит несколько существенных изменений, помимо того, что значения температуры воды повсеместно возрастают. Главное отличие (не отмеченное по судовым наблюдениям) заключается в том, что в мае начинает разрушаться гидрологический фронт, разделявший мелководную и глубоководную части акватории. Этот процесс имеет место у берега Северной Америки, где ТПМ возрастет до  $0.5^{\circ}$ С, в значительной мере он определяется действием летнего муссона с характерными для него ветрами южного и юго-западного румбов. Нулевая изотерма смещается на запад, в централь-



**Рис. 2.** Пространственное распределение ТПМ (°С) на акватории Берингова моря зимой (февраль), весной (май), летом (август) и осенью (ноябрь).

ной части мелководного района температура ниже нуля и колеблется от  $-0.5^{\circ}$  до  $-1^{\circ}$ С, а наиболее низкие значения выявлены в Анадырском заливе (до  $-1.4^{\circ}$ С). В прилегающей части СЗТО температура воды колеблется от 5° до 5.7°С на восточной границе области, вблизи Алеутских островов уменьшается до  $4.5^{\circ}$ С и далее плавно снижается до  $0.8^{\circ}$ С вблизи берега Камчатки.

Июнь, так же, как и октябрь, можно охарактеризовать как переходный период от одного типа распределения ТПМ к другому. В районе Алеутской дуги температура воды мало отличается от прилегающих акваторий, только в восточной ее части еще ощущается отепляющее влияние тихоокеанской воды. Гидрологический фронт выражен слабо, на акватории Берингова моря отмечены значительные различия ТПМ. Так, у побережья Америки формируется полоса сравнительно теплой воды (в заливе Нортон Саунд до 6.5°С), в то время как в прибрежных районах Анадырского залива и вблизи берега Чукотки вода более холодная (2°-2.5°С). Существенные различия в значениях ТПМ в прибрежных акваториях в восточной и западной частях моря обусловлены как разными глубинами, так и влиянием летнего муссона.

ного слоя в изучаемом бассейне в августе характер пространственного распределения иной, чем зимой и весной. Наиболее теплая вода (12°-13°С) отмечена на западе и на востоке рассматриваемой области, самые высокие значения (около 13.5°С) в юго-западной части Карагинского залива и в заливе Нортон-Саунд на Аляске. Самая холодная вода с температурой 5°-7°С обнаружена на северном участке акватории моря, у восточного берега Чукотки от Анадырского пролива (между полуостровом и островом Святого Лаврентия) до Берингова пролива. Образование этой зоны холодной воды связано с проявлением апвеллинга, природа которого довольно сложна и была выявлена сравнительно недавно (подъем воды возникает из-за формирующегося под действием донного трения в проливе и полусуточных приливов придонного потока, ориентированного на запад (Kawaguchi et al., 2020)). При этом в восточной западной части Берингова пролива наблюдается движение холодной воды с низкой соленостью в Северный ледовитый океан. Вообще говоря, в летний период наиболее важным фактором считается транспорт более теплой и соленой, богатой биогенными элементами беринговоморской воды в восточной его части в Чукотское

В период максимального прогрева поверхност-

море и море Бофорта, чему посвящено существенно больше работ (Woodgate et al., 2005; 2010; Danielsen et al., 2014).

Только в сентябре-октябре, после перестройки поля ветра от летнего муссона с характерными для теплого периода года южными ветрами к зимнему с сильными и устойчивыми ветрами северо-запалного румба в Беринговом проливе формируется поток на юг (Жук, Кубряков, 2021) с относительно небольшими скоростями. В этой работе также отмечено, что даже в летний период в западной части пролива, вдоль берега полуострова Чукотка может поступать более холодная вода из Чукотского моря, при способствующих этому метеорологических условиях (в работе (Захарчук, Тихонова, 2006) отмечалась значительная изменчивость течений в проливе в синоптическом диапазоне частот по данным инструментальных измерений). Однако такие эпизодические затоки вряд ли отражаются на осредненных распределениях ТПМ у восточного берега Чукотки в теплый период года.

Сравнительно холодная вода (8°—9°С) отмечена также вдоль Алеутской островной дуги, что согласуется с результатами работы (Гидрометеорология..., 1999), в которой причина ее формирования связывалась с приливным перемешиванием вблизи проливов, а также более позднего исследования динамики верхнего квазиоднородного слоя (Лучин, 2019).

Образование области с низкими значениями температуры у восточного побережья Чукотки и в Анадырском заливе в осенний период в большей мере может быть связано с проявлением ветрового апвеллинга, обусловленного действием зимнего муссона. Ветра северо-западного румба являются причиной масштабного потока тепла из океана в атмосферу вдоль всего восточного побережья Азии (Шевченко, Ложкин, 2023). Сезонный апвеллинг четко проявляется на распределениях ТПМ вдоль западного побережья Берингова моря от Беринго-



**Рис. 3.** График усредненных по акватории Берингова моря значений ТПМ за 1998—2021 гг. Красными точками показана линия тренда, рассчитанного методом наименьших квадратов.

ва пролива до м. Олюторский в сентябре и октябре, и уже несколько в меньшей степени в ноябре, из-за общего выхолаживания поверхностного слоя воды в северной части изучаемого бассейна. Отметим, что в летнее время в западной части Берингова моря между мысами Наварин и Олюторский также наблюдается апвеллинг, однако он проявляется эпизодически при определенных синоптических условиях (Жабин и др., 2022), поэтому вряд ли может так значимо проявляться на осредненных за многолетний период распределениях ТПМ.

В масштабах всего моря в ноябре пространственное распределение температуры вновь принимает характер, выявленный выше для зимы и весны. Вблизи Алеутских островов температура воды более 6°С (на восточном фланге гряды – около 7°С), в прибрежной полосе вблизи побережья Азии колеблется от 1° до 2.5°С, в западной части Анадырского залива уже принимает отрицательные значения – около -0.4°С, как и в заливе Нортон-Саунд на Аляске.

В целом по данным реанализа подтверждается сделанный в работах (Гидрометеорология, 1999; Лучин, 2019) вывод, что такой тип пространственного распределения ТПМ обусловлен влиянием адвекции более теплой воды из СЗТО и характерен для Берингова моря в период с ноября по май, когда роль солнечной радиации не является определяющей. В июле–сентябре характер пространственного распределения ТПМ иной, а в июне и октябре происходит перестройка от одного типа к другому. В ноябре температура поверхности моря выше, чем в мае.

На рис. 3 представлен ход ТПМ, усредненных для каждого месяца по всей площади Берингова моря. В колебаниях явно доминирует годовая гармоника со средней амплитудой  $4.5^{\circ}$ С и фазой 221°, это отвечает максимальным значениям в августе и минимальным в феврале (табл. 1), хотя чаще наблюдается минимум в марте, а иногда и в апреле. Вклад полугодовой составляющей существенно меньше, ее амплитуда составляет  $1.2^{\circ}$ С, а фаза равна  $63^{\circ}$ , что означает наличие максимумов этой составляющей в феврале и августе.

Амплитуда годовой гармоники максимальна на западном и восточном участках акватории, где летом наблюдается максимальный прогрев (рис. 4). Минимальные значения отмечены вблизи Берингова пролива и в районе Алеутских островов. Колебания амплитуды в разные годы сравнительно невелики, минимальное значение ( $3.8^{\circ}$ C) отмечено в 2001 г., а максимальное ( $5^{\circ}$ C) – в 2014 г. Это неожиданный результат, так как изменчивость летних максимумов существенна, она превышает  $3^{\circ}$ C (в их вариациях просматривается цикличность с периодом около 12 лет, на которую накладываются

Месяц	Среднее	σ	Минимум	Максимум
Январь	1.6	0.4	0.7	2.5
Февраль	1.2	0.4	0.4	2.1
Март	1.0	0.4	0.2	1.9
Апрель	1.2	0.5	0.4	2.2
Май	2.5	0.6	1.5	3.7
Июнь	5.3	0.8	4.1	6.9
Июль	8.4	0.7	7.1	9.7
Август	10.2	0.7	8.5	11.5
Сентябрь	9.4	0.8	8.1	10.7
Октябрь	6.8	0.6	5.7	8.4
Ноябрь	4.3	0.6	3.4	5.6
Декабрь	2.6	0.5	1.6	3.4

**Таблица 1.** Средние многолетние значения ТПМ, среднеквадратическое отклонение о и экстремальные значения ТПМ по месяцам (°C)

более слабые вариации с периодом около трех лет). Проявляются эти составляющие главным образом в восточной части Берингова моря. Наиболее теплые условия в летний период в масштабах моря наблюдались в 2004 и 2014 гг., самым холодным было лето 1999 г. Вариации амплитуды полугодовой гармоники незначительны.

Вариации зимних минимумов также достаточно велики, они изменялись, в целом, аналогично (в них также заметна роль 12-летнего цикла) — то есть, когда лето более теплое, то и зима тоже. Минимальные значения зимой во всех случаях были положительными, наиболее суровые зимние условия отмечены в марте 2012 и 2013 гг. ( $0.2^{\circ}$  и  $0.3^{\circ}$ C), самые мягкие зимы наблюдались в 2003–2005 гг. (около  $1.4^{\circ}$ C) и особенно в 2018–2019 гг. (около  $1.9^{\circ}$ C). В графике хода средних для всего моря значений ТПМ явно прослеживается положительный линейный тренд с коэффициентом 0.0052°С/мес., или примерно 0.6°С за 10 лет, что является высоким показателем. Глобальное потепление явно выражено в повышении температуры поверхностного слоя воды в Беринговом море, что согласуется с результатами предыдущих исследований (Overland, 2004; Хен и др., 2008, 2022; Ростов и др., 2018). Для выяснения характера этого влияния в различных районах моря в разные сезоны года коэффициенты линейного тренда были рассчитаны МНК в каждой пространственной ячейке для каждого месяца отдельно и посезонно (рис. 5).

Зимой на большей части Берингова моря коэффициенты линейного тренда положительные, но



**Рис. 4.** Пространственное распределение амплитуды (°С) и фазы (°) годовой гармоники ТПМ на акватории Берингова моря.

сравнительно невелики – от 0.05° до 0.2°С/10 лет в северной части бассейна и от 0.2° до 0.4°С/10 лет в южной. На этом фоне резко выделяется область к югу от м. Наварин, где рост ТПМ значителен – до 1.2°С/10 лет. Область с высокими скоростями роста вытянута от этого района в направлении п-ова Аляска. Также отметим две небольших области с коэффициентами выше 0.5 у Командорских островов и в районе Карагинского залива.

Весной тенденция к потеплению поверхностного слоя воды в Беринговом море выражена более явно. Область с высокими значениями коэффициента линейного тренда вблизи побережья Азии существенно расширилась в направлении открытого моря. Зона со значениями скорости роста выше 1°С/10 лет протянулась от м. Наварин на юг до м. Олюторский. Также расширилась область на юго-востоке изучаемого района — от п-ова Аляска до острова Нунивак. Появляется и новая зона с тенденцией к потеплению, охватывающая крупный залив Нортон-Саунд и прилегающие к нему акватории, причем в кутовой части залива значения коэффициента линейного тренда достигают 2.5°С/10 лет.

Летом влияние глобального потепления достигает в Беринговом море своего максимума. Примерно на 75% его акватории значения коэффициента линейного тренда выше 0.5°C/10 лет, а в западной части Анадырского залива и в вершине залива Нортон-Саунд достигают максимальных 3°C/10 лет.

Осенью картина пространственного распределения коэффициента линейного тренда не отличается существенно от наблюдавшейся летом, но его значения повсеместно уменьшаются.

### РАЗЛОЖЕНИЯ ПОЛЯ ТПМ ПО ЕОФ

Особенности сезонной и межгодовой изменчивости поля ТПМ были исследованы также методом разложения последовательности временных слоев по ЕОФ. На рис. 6 представлены временные функции и соответствующие им пространственные распределения двух основных мод (на первую моду приходится 92.6% дисперсии изучаемого параметра, на вторую – 5.3%, вклад более высоких мод несущественен).



**Рис. 5.** Пространственное распределение коэффициента линейного тренда ТПМ (в °C за 10 лет) на акватории Берингова моря зимой, весной, летом и осенью.

Максимальные значения пространственной функции первой моды (7–8) выявлены в СЗТО в районе, примыкающем к полуострову Аляска и островам восточного фланга Алеутской островной дуги. В акватории вблизи этих участков суши, но со стороны Берингова моря, значения моды немного ниже – от 6.0 до 6.3. Такие же величины отмечены на юго-востоке изучаемого района, как со стороны моря, так и в океане. Наиболее низкие значения пространственной функции выявлены на северном участке моря, вблизи Берингова пролива, а также в западной части Анадырского залива (от 2 до 3). На основной части Берингова моря эта функция меняется незначительно – в пределах от 5 до 6.

Вариации временной функции первой моды идентичны ходу усредненных значений ТПМ (коэффициент корреляции r = 0.999) и хорошо описываются комбинацией годовой и полугодовой гармоники с амплитудами  $0.8^{\circ}$  и  $0.2^{\circ}$ С соответственно. Все ее значения положительные, значимые величины более 1°С наблюдаются с июля по октябрь, максимальные значения августе и сентябре ( $1.78^{\circ}$  и  $1.66^{\circ}$ С), минимальные – в феврале–апреле (около  $0.25^{\circ}$ С).

Временной ход одинаков во всех пространственных ячейках изучаемой области, различия в интенсивности прогрева характеризуются пространственной функцией. Характер временной функции показывает, что первая мода отражает главным образом особенности ТПМ летом и при переходе к осени. К ним относятся прежде всего отсутствие гидрологического фронта, высокие значения температуры в центральной. юго-восточной и юго-запалной частях моря, а также относительно низкие значения параметра в центральной части Алеутской гряды. Небольшие значения пространственной функции в северо-западной части бассейна, у побережья Чукотки и в Анадырском заливе отражают поступление холодной воды из Северного Ледовитого океана и осенний ветровой апвеллинг.

Вторая мода является поправкой к основной, описывающей несинфазные процессы в вариациях термических условий. Ее пространственная функция имеет узловую линию, которая разделяет море на две примерно равные части. Одну из них можно условно назвать прибрежной, она охватывает сравнительно мелководные районы в северной



**Рис. 6.** Графики временных функций (°С) и пространственное распределение (безразмерная величина) первых двух мод разложения ТПМ по ЕОФ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА № 1 2024

Дата	Доля площади, %	Знак аномалии
Август 1999 г.	29.25	Отрицательные
Январь 2000 г.	23.89	Отрицательные
Июль 2001 г.	22.59	Отрицательные
Февраль 2018 г.	30.39	Положительные
Октябрь 2018 г.	39.94	Положительные

Таблица 2. Информация о наиболее значительных аномалиях ТПО в Беринговом море

части Берингова моря. Максимальные положительные значения отмечены у побережья штата Аляска, в частности в заливе Нортон-Саунд (до 3), в Анадырском лимане и в западной части Карагинского залива. Область с отрицательными значениями охватывает центральную часть моря и акваторию, прилегающую к Алеутским островам. Именно вблизи них отмечены наибольшие по величине отрицательные значения моды — до -1.8. Из этого следует, что вторая мода ответственна за процесс формирования гидрологического фронта над свалом глубин, о котором говорилось выше. Он не нашел своего отражения в основной моде, что несколько необычно учитывая его роль в термических условиях Берингова моря.

Временная функция второй моды также меняет знак. Она имеет положительные значения только в июле-сентябре (максимум в августе составил 0,88). Отрицательные значения отмечены с октября по июнь, минимум –в январе (–1,31), но близкие значения с декабря по апрель. Это означает, что вторая мода обеспечивает летом положительную поправку в прибрежных районах моря и отрицательную вблизи Алеутских островов. В другие месяцы ее вклад имеет противоположный характер. Из этого также следует вывод о важном вкладе второй моды в формирование в летний период высоких значений ТПМ у побережья США и в заливах у российского побережья. Зимой в этих районах вклад моды отрицательный, что согласуется с более значительным выхолаживанием поверхностного слоя в прибрежных акваториях.

#### ЗНАЧИТЕЛЬНЫЕ АНОМАЛИИ ТПМ В БЕРИНГОВОМ МОРЕ

Особый интерес представляют экстремальные аномалии температуры поверхностного слоя воды в изучаемом бассейне. Для их идентификации использовалась описанная выше методика, предложенная в (Цхай, Шевченко, 2013). Было выявлено восемь ситуаций, когда аномалия, превышавшая 20, была отмечена более чем на 10% площади Берингова моря (по четыре положительных и отрицательных), в пяти из них она превышала 20% его акватории, они представлены в табл. 2.

Некоторые специалисты рассматривают подобные условия как термические катастрофы (Ustinova, 2021), имеющие тяжелые последствия для состояния популяций пелагических рыб. Рассмотрим более подробно некоторые из таких ситуаций, которые были выявлены в августе 1999 г., январе 2000 г., феврале и октябре 2018 г. (рис. 7).

В августе 1998 г. на всей акватории Берингова моря наблюдались отрицательные аномалии ТПМ, наиболее существенные (от  $-2.2^{\circ}$  до  $-2.8^{\circ}$ С) в северо-восточной части моря, в широкой полосе, протянувшейся от п-ова Чукотка до побережья Аляски. Близкие значения отмечены в акватории, прилегающей к северо-восточному побережью Камчатки, на остальной части моря отклонения от средних многолетних значений чуть меньше – от  $-1,2^{\circ}$  до  $-1.9^{\circ}$ С. Площадь акватории, на которой аномалия превысила 2 $\sigma$ , составила больше 29% от площади всего бассейна.

Еще один пример значимых отрицательных аномалий имел место в январе 2000 г. Значения ниже нормы также наблюдались практически на всей акватории Берингова моря. Вблизи берегов п-ова Аляска и на восточном фланге Алеутской островной гряды отрицательные аномалии колебались от  $-3^{\circ}$  до  $-3.5^{\circ}$ С, что является исключительно большой величиной, в особенности для холодного периода, когда вариации температуры незначительны (больше 3 ). В широкой полосе, протянувшейся до м. Наварин, отклонение от нормы превышало 1.5°С, что также является существенной величиной. Это указывает на экстраординарность термических условий в северо-восточной части моря, в области, вытянутой вдоль свала глубин, в которой обычно проявляется влияние затока теплой воды из Тихого океана. Это позволяет предположить, что в данном случае этот заток был ослаблен.

Случай положительных аномалий в холодный период года имел место в феврале 2018 г. На всей акватории моря они превышали 0.4°С, вблизи побережья России – 1.2°С, а в полосе от м. Нава-

рин в направлении восточного сектора Алеутских островов – 3°С. Последнее значение также очень велико для зимних условий, в этой полосе аномалия превышала 3σ (на площади около 8% от всей изучаемой акватории). Неслучайно зимние условия этого года характеризовались низкими значениями ледовитости – ледяной покров сформировался на существенно меньшей площади, чем обычно (Басюк, Зуенко, 2019).

Наиболее существенные аномалии (пороговое значение 20 было превышено на 40% его площади) были выявлены в октябре 2018 г. Положительные отклонения от средних многолетних значений наблюдались в северо-восточной части бассейна, достигали величины 5°С в заливе Нортон-Саунд, в районе о. Святого Лаврентия и плавно уменьшались вблизи Командорских островов. На основной части моря преобладал повышенный фон температур, вдоль всей Алеутской островной дуги ТПМ не превышала норму. Это согласуется с результатами работы (Басюк, Зуенко, 2019), в которой термические условия в Беринговом море в 2018 г. характеризовались как аномально теплые.

Приведенные примеры показывают, что значительные аномалии ТПМ время от времени формируются на акватории Берингова моря и могут занимать значительные площади, сопоставимые с площадью всего изучаемого бассейна. Количество положительных и отрицательных аномалий примерно одинаково, они формируются в различные сезоны года. Резкие отклонения термических условий от обычных могут представлять существенную угрозу для условий обитания пелагических рыб.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ средних многолетних распределений показал, что с ноября по июнь изменения ТПМ в Беринговом море носят преимущественно зональный характер. Температура воды в поверхностном слое снижается от островов Алеутской гряды в северном направлении и достигает наименьших значений в Анадырском заливе и в акватории, прилегающей к Берингову проливу. В теплый период характер изменений термических условий иной – наиболее теплая вода обнаруживается на западе (у побережья Камчатки, в частности в Карагинском заливе) и востоке (у берегов Аляски, прежде всего в заливе Нортон-Саунд) изучаемой акватории. В центральной части моря, на севере вблизи Берингова пролива



Рис. 7. Пространственное распределение аномалий ТПМ в Беринговом море.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА № 1 2024

и на южном участке в центральной части Алеутской гряды выявлены более холодные воды.

Пространственное распределение первой моды разложения поля ТПМ по ЕОФ в целом сходно со средним многолетним в теплый период года (отсутствие гидрологического фронта, низкие значения в центральной части Алеутской островной гряды), но имеет также существенные отличия. Наиболее существенные из них следующие: во-первых, низкие значения пространственной функции у северо-западного побережья, от Берингова пролива до м. Олютоский, связаны с проявлением сезонного апвеллинга в начале осени, а во-вторых, первая мода не отражает прогрев прибрежных акваторий ни в восточной, ни в западной частях моря, то есть не полностью характеризует летнее распределение ТПМ.

Вторая мода также содержательна, ее пространственная функция положительна в мелководных районах Берингова моря и отрицательна в глубоководной части, прилегающей к Алеутским островам, что отражает различие в термическом режиме этих акваторий. Следовательно, она отражает формирование гидрологического фронта вдоль свала глубин, существующего в Беринговом море на протяжении большей части года. Также вторая мода ответственна за высокую степень прогрева прибрежных акваторий (заливы Нортон Сацунд, Карагинский, Анадырский) летом и выхолаживания зимой.

Годовой ход ТПМ, усредненных для каждого месяца по всей площади Берингова моря, характеризуется максимумом в августе (около  $10^{\circ}$ С) и минимумом в марте (1°С). В его колебаниях явно доминирует годовая гармоника со средней амплитудой 4.5°С и фазой 221°, вклад полугодовой составляющей существенно меньше – ее амплитуда составляет 1.2°С, а фаза равна 63°.

Температура поверхности Берингова море имеет выраженную тенденцию к повышению, что можно рассматривать как результат влияния глобального потепления, в то время как в Охотском море и северной части Японского реакция на эти процессы иная и преобладает снижение ТПМ (Ложкин, Шевченко, 2019). Особенно она проявляется в летний период, когда примерно на 75% его акватории значения коэффициента линейного тренда выше  $0,5^{\circ}$ C/10 лет, а в западной части Анадырского залива и в вершине залива Нортон-Саунд достигают максимальных 3°C/10 лет. Слабее всего тенденция к повышению температуры поверхностного слоя воды выражена зимой.

Показано, что значительные аномалии ТПМ формируются на акватории Берингова моря, и могут занимать значительные площади, сопоставимые с площадью всего бассейна. Количество положительных и отрицательных аномалий примерно одинаково, они формируются в различные сезоны года. Резкие отклонения термических условий от обычных могут представлять существенную угрозу для условий обитания пелагических рыб.

Полученные результаты могут использоваться для изучения влияния термических условий на состояние популяций пелагических рыб и совершенствования прогнозов сроков и условий нагульных и нерестовых миграций тихоокеанских лососей в Беринговом море.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность рецензенту за внимательное отношение к нашей статье и ряд полезных замечаний, способствовавших повышению ее качества.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках Госзадания ФГБНУ "ВНИРО" по теме "Изучение влияния изменчивости климато-океанологических условий на основные объекты российского рыболовства".

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Багров Н.А. Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих // Труды Центрального института прогнозов. 1959. Вып. 74. С. 3–24.

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

Жабин И.А., Дмитриева Е.В., Дубина В.А., Лучин В.А. Изменчивость летнего ветрового апвеллинга у Корякского побережья в северо-западной части Берингова моря по данным спутниковых наблюдений // Исследование Земли из космоса. 2022. № 5. С. 60–73.

Жук В.Р., Кубряков А.А. Влияние Восточно-Сибирского течения на водообмен в Беринговом проливе по спутниковым данным // Океанология. 2021. Т. 61, № 6. С. 856–868.

Захарчук Е.А., Тихонова Н.А. Об интенсивности течений разных временных масштабов в Чукотском море и Беринговом проливе // Метеорология и гидрология. 2006. № 1. С. 76–85.

Кровнин А. С., Кивва К. В., Мурый Г. П., Сумкина А. А. Влияние климатических факторов на межгодовые колебания запасов камчатской горбуши в 2014–2020 гг. // Вопр. рыболовства. 2021. Т. 22. № 4. С. 35–45.

DOI: 10.36038/0234-2774-2021-22-4-35-45.

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

*Лучин В.А.* Средние многолетние параметры верхнего квазиоднородного слоя Берингова моря (нижняя граница, температура, соленость) и их внутригодовая изменчивость // Известия ТИНРО. 2019. Т. 199. С. 214–230. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-199-214-230. Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Воронцов А.А. Тенденции климатических изменений термических условий прибрежных акваториях западной части Берингова моря за последние десятилетия // Изв. ТИНРО. 2018. Т. 193. С. 167–182. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-193-167-182.

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 // Изв. 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: 10.26428/1606-9919-2022-202-187-207.

*Цхай Ж. Р., Шевченко Г. В.* Оценка температурных аномалий поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 2. С. 50–61. DOI: 10.7868/S0205961413020139.

*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. EDN HRSJAX.

Шевченко Г.В., Ложкин Д.М. Пространственно-временная изменчивость потока длинноволновой радиации на поверхности северо-западной части Тихого океана по данным реанализа ERA5 // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39. № 3. С. 359–370. EDN HJUFMZ.

DOI: 10.29039/0233-7584-2023-3-359-370.

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

Danielson S. L., Weingartner T. J., Hedstrom K. S., Aagaard K., Woodgate R.A., Curchitser E., Stabeno P.J. Coupled windforced controls of the Bering-Chukchi shelf circulation and the Bering Strait through flow: Ekman transport, continental shelf waves, and variations of the Pacific-Arctic sea surface height gradient // Progress in Oceanography. 2014. V. 125. P. 40–61. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.04.006.

Kawaguchi Y., Nishioka J., Nishino S., Fujio S., Lee K., Fujiwara A., Yanagimoto D., Mitsudera H. and Yasuda I. Cold water upwelling near the Anadyr Strait: Observations and simulations. Journal of Geophysical Research: Oceans. 2020. V. 125. e2020JC016238. https://doi.org/10.1029/2020JC016238.

*Overland J. E.* Is the climate of Bering Sea warming and affecting the ecosystem? // EOS. 2004. V. 8. No. 33. P. 309–316.

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

*Woodgate R.A., Aagaard K., Weingartner T.* Monthly temperature, salinity, and transport variability of the Bering Strait through flow // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. Issue 4. https://doi.org/10.1029/2004GL021880.

*Woodgate, R.A., T. Weingartner, and R. Lindsay* (2010), The 2007 Bering Strait oceanic heat flux and anomalous Arctic sea-ice retreat // Geophys. Res. Lett., 2010. V. 37. L01602. DOI: 10.1029/2009GL041621.

## The Spatio-Temporal Variability of Sea Surface Temperature of Bering Sea from ERA5 Reanalysis Data Based on Satellite Information

## G. V. Shevchenko<sup>1, 2</sup>, Zh. R. Tshay<sup>1</sup>, D. M. Lozhkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sakhalin Branch of "VNIRO" ("SakhNIRO"), Yuzhno-Sakhalinsk, Russia <sup>2</sup>Institute of Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Features of spatio-temporal variability of the Bering Sea surface temperature were studied by constructing longterm average distributions for different months and using the method of empirical orthogonal functions based on ERA5 reanalysis data based mainly on satellite information, for the period 1998–2020 (spatial resolution of the data is a quarter of a degree, the time interval is one month). In each spatial cell, for each month, the average long-term values of this parameter were calculated, which showed seasonal changes in thermal conditions in the studied water area. Linear trend coefficients have been determined, which showed a stable tendency to warming of the surface layer of sea waters, most pronounced in summer. Extreme deviations from the average long-term values (anomalies) of the surface temperature of the Bering Sea are considered.

*Keywords:* sea surface temperature, reanalysis, thermal regime, linear trend, harmonic analysis, method of empirical orthogonal functions, Bering Sea

#### REFERENCES

*Bagrov N.A.* Analiticheskoe predstavlenie posledovatel'nosti meteorologicheskikh polei posredstvom estestvennykh ortogonal'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). *Baker M. R., Kivva K. K., Pisareva M. N., Watson J. T., Selivanova Ju.* Shifts in the physical environment in the Pacific Arctic and implications for ecological timing and conditions // Deep-Sea Res. II. 2020. V. 177. 104802. DOI: 10.1016/j.dsr2.2020.104802.

*Basyuk E.O., Zuenko Yu.I.* Beringovo more 2018 – ekstremal'no maloledovityi i teplyi god [Bering sea: 2018 as the extreme low-ice and warm year] // Izv. TINRO. 2019. V. 198. P. 119–142. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-198-119-142. (In Russian).

Danielson S. L., Weingartner T.J., Hedstrom K.S., Aagaard K., Woodgate R.A., Curchitser E., Stabeno P.J. Coupled wind-forced controls of the Bering-Chukchi shelf circulation and the Bering Strait through flow: Ekman transport, continental shelf waves, and variations of the Pacific-Arctic sea surface height gradient // Progress in Oceanography. 2014. V. 125. P. 40–61.

https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.04.006.

Kawaguchi Y., Nishioka J., Nishino S., Fujio S., Lee K., Fujiwara A., Yanagimoto D., Mitsudera H. and Yasuda I. Cold water upwelling near the Anadyr Strait: Observations and simulations. Journal of Geophysical Research: Oceans. 2020. V. 125. e2020JC016238. https://doi.org/10.1029/2020JC016238.

*Khen G.V., Basyuk E.O., Sorokin Yu.D., Ustinova E.I., Figurkin A. L.* Termicheskie usloviya na poverkhnosti Beringova i Okhotskogo morei 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).

*Krovnin A.S., Kivva K.V., Muryi G.P., Sumkina A.A.* Vliyanie klimaticheskikh faktorov na mezhgodovye kolebaniya zapasov kamchatskoi gorbushi v 2014–2020 gg. [Influence of climatic factors on interannual variations of kamchatka pink salmon stocks in 2014–2020] // Vopr. rybolovstva. 2021. V. 22. Iss. 4. P. 35–45. DOI: 10.36038/0234-2774-2021-22-4-35-45.

*Lozhkin D. M., Shevchenko G. V.* Trendy temperatury poverhnosti Ohotskogo morya i prilegayushchih akvatorij po sputnikovym dannym 1998–2017 gg. [Trends in the surface temperature of the Sea of Okhotsk and adjacent water areas according to satellite data in 1998–2017] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2019. Iss. 1. P. 55–61.

*Luchin V.A.* Srednie mnogoletnie parametry verhnego kvaziodnorodnogo sloya Beringova morya (nizhnyaya granica, temperatura, solenost') i ih vnutrigodovaya izmenchivost' [Mean climatic parameters of the upper mixed layer in the Bering Sea (lower boundary, temperature, salinity) and their annual variability] // Izv. TINRO. 2019. V. 199. P. 214–230.

DOI: 10.26428/1606-9919-2019-199-214-230.

*Overland J. E.* Is the climate of Bering Sea warming and affecting the ecosystem? // EOS. 2004. V. 8. Iss. 33. P. 309–316.

Rostov I. D., Dmitrieva E. V., Vorontsov A. A. Tendentsii klimaticheskikh izmenenii termicheskikh uslovii pribrezhnykh akvatoriyakh zapadnoi chasti Beringova morya za poslednie desyatiletiya [Tendencies of climatic changes for thermal conditions in the coastal areas of the Okhotsk Sea in last decades] // Izv. TINRO. 2018. V. 193. P. 167–182. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-193-167-182. (In Russian).

*Shevchenko G. V. and Lozhkin D. M.* Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' potoka dlinnovolnovoj radiacii na poverhnosti severo-zapadnoj chasti Tihogo okeana po dannym reanaliza ERA5 [Spatio-Temporal Variability of the Resulting Long-Wave Radiation on the Surface of the Northwestern Pacific Ocean Based on the ERA5 Reanalysis Data] // Physical Oceanography. 2023. V. 30, Iss. 3. P. 331–342. DOI: 10.29039/1573-160X-2023-3-331-342. (In Russian, English translation).

*Tskhai Zh. R., Shevchenko G. V.* Otsenka temperaturnykh anomalii poverkhnosti Okhotskogo morya i prilegayushchikh akvatorii po sputnikovym dannym [Estimate of Extreme Surface Temperature of the Okhotsk Sea and Adjacent Waters from Satellite Data] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2013. Iss. 2. P. 50–61.

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

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

*Woodgate R.A., Aagaard K., Weingartner T.* Monthly temperature, salinity, and transport variability of the Bering Strait through flow // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. Iss. 4. https://doi.org/10.1029/2004GL021880.

*Woodgate, R. A., T. Weingartner, and R. Lindsay* (2010), The 2007 Bering Strait oceanic heat flux and anomalous Arctic sea-ice retreat // Geophys. Res. Lett., 2010. V. 37. L01602. DOI: 10.1029/2009GL041621.

Zaharchuk E.A., Tihonova N.A. Ob intensivnosti techenij raznyh vremennyh masshtabov v Chukotskom more i Beringovom prolive [Intensity of currents of different time scales in the Chukchi Sea and Bering Strait]// Russian Meteorology and Hydrology. 2006. No. 1. P. 58–66. (In Russian, English translation).

Zhabin I.A., Dmitrieva E. V., Dubina V.A., and Luchin V.A. Izmenchivost' letnego vetrovogo apvellinga u Koryakskogo poberezh'ya v severo-zapadnoj chasti Beringova morya po dannym sputnikovyh nablyudenij [Variability of Wind-Driven Upwelling along Koryak Coast in the North-Western Bering Sea Based on the Satellite Data] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2022. No. 5. P. 60–73. (In Russian).

*Zhuk V.R., Kubryakov A.A.* Vliyanie Vostochno-Sibirskogo techeniya na vodoobmen v Beringovom prolive po sputnikovym dannym [Impact of the Eastern Siberian Current on Water Exchange in the Bering Strait on the Base of Satellite Altimetry Measurements] // Oceanology. 2021. V. 61. Iss. 6. P. 781–802. (In Russian, English translation).