

## Пространственно-временная изменчивость результатирующего длинноволнового излучения на поверхности северо-западной части Тихого океана по данным реанализа ERA5

Г. В. Шевченко<sup>1, 2, ✉</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 ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

✉ Shevchenko\_zhora@mail.ru

Поступила в редакцию 22.09.2022; одобрена после рецензирования 23.10.2022;  
принята к публикации 09.03.2023.

### Аннотация

**Цель работы.** Изучена пространственно-временная изменчивость результирующего длинноволнового излучения, отражающего потери тепла океаном, на поверхности северо-западной части Тихого океана и дальневосточных морей на основе данных реанализа ERA5 за 1998–2021 гг.

**Методы и результаты.** Материалом для данной работы послужили данные реанализа ERA5 по результирующему длинноволновому излучению в области, ограниченной координатами 42°–60° с. ш. и 135°–180° в. д., включающей дальневосточные моря и северо-западную часть Тихого океана. Массив среднемесячных значений с разрешением по пространству четверть градуса анализировался с применением стандартных статистических методов. Были построены средние многолетние распределения длинноволнового излучения для каждого месяца и по сезонам, в каждой пространственной ячейке рассчитаны амплитуды и фазы годовой и полугодовой гармоник, коэффициенты линейного тренда, выполнено разложение по естественным ортогональным функциям. Наибольшие значения длинноволнового излучения наблюдаются зимой, прежде всего в Японском море и в области к востоку от о. Хонсю. Значительных величин достигает поток тепла из океана в атмосферу в этих же областях и осенью, а также в прибрежной полосе вдоль всего материкового берега. Наиболее вероятной причиной таких особенностей распределения длинноволнового излучения является атмосферная циркуляция, а именно характерный для холодного сезона устойчивый ветер северо-западного румба (зимний муссон). В открытом океане потери тепла меньше, особенно летом, чему способствует плотная облачность. Аналогичные результаты получены и методом естественных ортогональных функций: значения пространственного распределения первой моды убывают с запада на восток (по абсолютной величине).

**Выводы:** Выявлено, что потери тепла в изучаемой акватории происходят главным образом осенью и зимой в западной ее части – в Японском море, к востоку от о. Хонсю и особенно в узкой полосе вдоль всего материкового побережья, но зимой в районах севернее 48° с. ш. (Татарский пролив, Охотское море) они демпфируются ледяным покровом. Однонаправленные тенденции в изменениях длинноволнового излучения выражены сравнительно слабо и различаются на одних и тех же участках акватории в различные сезоны года.

**Ключевые слова:** длинноволновое излучение, реанализ, северо-западная часть Тихого океана, дальневосточные моря

**Благодарности:** работа выполнена в рамках госзадания ФГБНУ «ВНИРО» по теме «Изучение влияния изменчивости климато-океанологических условий на основные объекты российского рыболовства».

Для цитирования: Шевченко Г. В., Ложкин Д. М. Пространственно-временная изменчивость результирующего длинноволнового излучения 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

Original article

## Spatio-Temporal Variability of the Resulting Long-Wave Radiation on the Surface of the Northwestern Pacific Ocean Based on the ERA5 Reanalysis Data

G. V. Shevchenko<sup>1, 2, ✉</sup>, D. M. Lozhkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sakhalin Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

<sup>2</sup> Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia  
✉ Shevchenko\_zhora@mail.ru

### Abstract

**Purpose.** The work is purposed at studying spatio-temporal variability of the resulting long-wave radiation reflecting the ocean heat loss, on the surface of the northwestern Pacific Ocean and the Far Eastern seas based on the ERA5 reanalysis data for 1998–2021.

**Methods and Results.** The ERA5 reanalysis data on the resulting long-wave radiation in the region limited by 42°–60° N and 135°–180° E, and including the Far Eastern seas and the northwestern part of the Pacific Ocean constituted the material for the study. The array of monthly averages with a quarter degree spatial resolution was analyzed using the standard statistical methods. Average long-term distributions of long-wave radiation were constructed for each month and by seasons; the amplitudes and phases of the annual and semi-annual harmonics, and the linear trend coefficients were calculated in each spatial cell, also the empirical orthogonal functions decomposition was performed. The highest values of long-wave radiation were observed in winter, primarily in the Sea of Japan and in the area east of the island Honshu. The heat flux from the ocean to the atmosphere reached its significant values in the same areas in autumn, as well as in the coastal strip along the entire continental coast. The most probable reason for such features in the distribution of long-wave radiation is the atmospheric circulation, namely, the steady northwesterly wind (winter monsoon) characteristic of a cold season. In the open ocean, heat loss is less, especially in summer, which is facilitated by dense clouds. Similar results were obtained by the method of empirical orthogonal functions: the values of the first mode spatial distribution decrease from west to east (in absolute value).

**Conclusions.** It was revealed that heat losses in the studied area occur mainly in autumn and winter in its western part – in the Sea of Japan, east of the island Honshu, and especially in a narrow strip along the entire mainland coast; but in winter in the areas north of 48° N (the Tatar Strait, the Sea of Okhotsk), they are damped by the ice cover. Unidirectional trends in the changes of long-wave radiation are pronounced relatively weakly, and differ in the same water areas in different seasons of a year.

**Keywords:** long-wave radiation, reanalysis, northwestern part of the Pacific Ocean, Far Eastern seas

**Acknowledgments:** The study was carried out within the framework of the state assignment of the FSBSI “ARIFO” on theme “Study of the impact of variability of climate and oceanological conditions upon the basic objects of Russian fisheries”.

**For citation:** Shevchenko, G.V. and Lozhkin, D.M., 2023. 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*, 30(3), pp. 331-342. doi:10.29039/1573-160X-2023-3-331-342

## Введение

Изменения теплосодержания поверхностного слоя океана в условиях глобальных климатических изменений, проявляющиеся наиболее наглядно в вариациях температуры его поверхности (ТПО), представляют большой научный интерес, так как они отражают сложные процессы взаимодействия атмосферы и океана, а также адвективные и конвективные движения водных масс внутри него. В отношении акваторий северо-западной части Тихого океана (СЗТО) и дальневосточных морей они имеют также важное прикладное значение с точки зрения характеристики изменчивости условий обитания пелагических рыб, прежде всего такого важного для экономики Дальневосточного региона вида, как тихоокеанские лососи [1]. Для изучения термических условий в Охотском море и прилегающих акваториях в Сахалинском филиале ФГБНУ ВНИРО (СахНИРО) в 1997 г. была установлена приемная спутниковая станция *TeraScan*, с 1998 г. формируется база данных ТПО, которая является главной составляющей информационной основы этих исследований [2]. В последнее время предпринимаются попытки комплексного исследования вариаций теплосодержания поверхностного слоя воды в данном регионе в условиях изменяющегося климата. Для этого используются данные реанализа *ERA5* о широком круге возможных влияющих факторов, из которых к настоящему времени изучена пространственно-временная изменчивость коротковолновой солнечной радиации [3].

Вариациям различных составляющих радиационного баланса, в частности излучению тепла из океана в атмосферу, посвящено не так много работ, и касаются они преимущественно тропических областей океана [4–6]. Наиболее важным с точки зрения данного исследования было их изучение в выделенных районах северной части Тихого океана (выше параллели  $20^\circ$ ) в 1948–2009 гг. [7]. Это исследование было основано на данных реанализа *NCEP/NCAR*, рассматривались затраты тепла на испарение, турбулентный поток тепла, потоки коротковолновой (*short wave radiation*, сокр. *SWR*) и длинноволновой (*long wave radiation*, сокр. *LWR*) радиации. В частности, отмечено снижение потока тепла, излучаемого океаном в атмосферу в тропических районах, а также во внетропических – восточнее  $180^\circ$  в. д., что, по мнению авторов, явилось причиной возрастания результирующего потока во внутренние слои океана в указанных акваториях.

Более детально, без усреднения по районам, пространственно-временная изменчивость *SWR* исследовалась в работе авторов [3] на основе данных реанализа *ERA5* за 1998–2021 гг. в СЗТО (севернее 42-й параллели и западнее 180-го меридиана). Выбор временного интервала для анализа данных в работе [3], как и в настоящем исследовании, был обусловлен имеющейся в СахНИРО базой данных ТПО. Для оценки сезонных и межгодовых вариаций рассматривались осредненные распределения по сезонам года, рассчитывались амплитуды и фазы годовой и полугодовой гармоник, коэффициенты линейного тренда и т. д. Поскольку для понимания изменчивости теплосодержания поверхностного слоя океана также важна и интересна информация о потерях тепла океаном, выделение наиболее важных в этом отношении зон, аналогичный подход применен в данной работе к массиву данных *LWR*.

Целью настоящей работы было изучить пространственно-временную изменчивость потока результирующего длинноволнового излучения на поверхности СЗТО и дальневосточных морей на основе данных реанализа за 1998–2021 гг.

### Материалы и методика

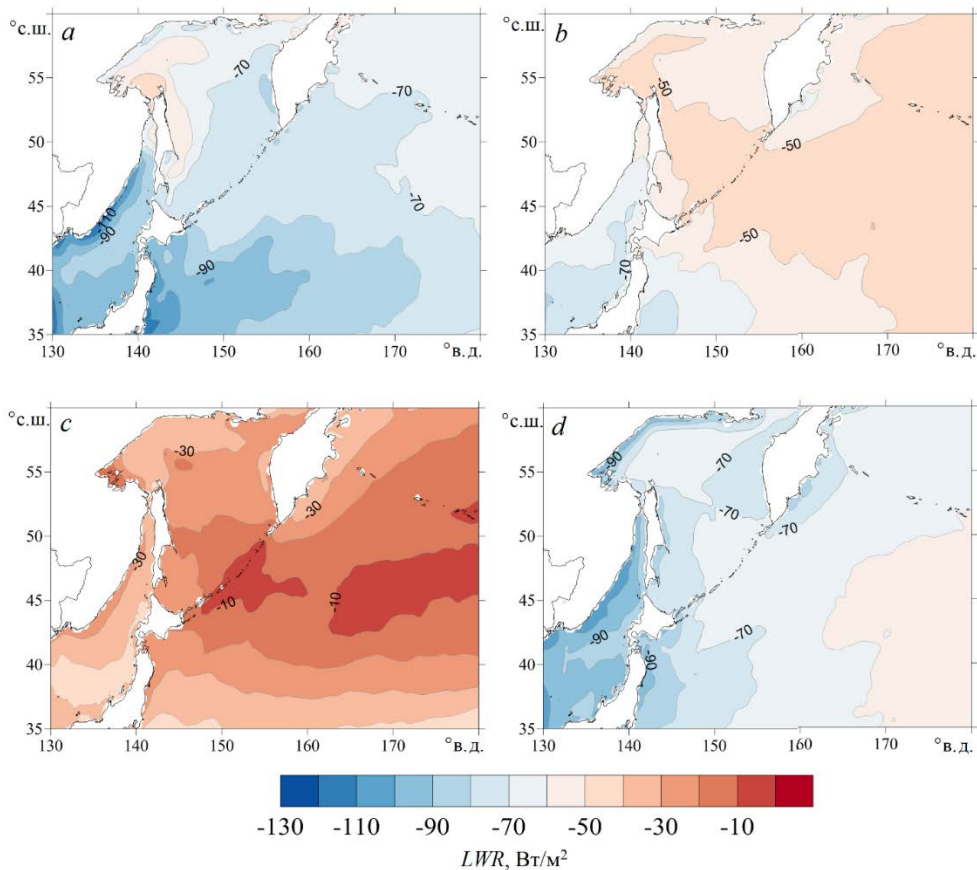
Материалами для проведения исследований явились данные реанализа ERA5 по результирующему длинноволновому излучению  $LWR$  с учетом влияния облачности в области, ограниченной координатами  $35^{\circ}$ – $70^{\circ}$  с. ш.,  $130^{\circ}$ – $180^{\circ}$  в. д. Эта область охватывает акваторию дальневосточных морей (по Берингову морю только его западную часть, прилегающую к побережью России) и СЗТО. Пространственное разрешение данных составляло четверть градуса, дискретность по времени – 1 мес. Все значения  $LWR$  отрицательные, что означает потерю энергии поверхностным слоем океана вследствие излучения тепла в атмосферу.

Целью работы было изучить особенности пространственно-временной изменчивости  $LWR$  (сезонных и межгодовых вариаций на различных участках акватории) как важной составляющей радиационного баланса. Для ее реализации в каждой пространственной ячейке для каждого месяца рассчитаны средние многолетние значения данного параметра, отражающие сезонные изменения потока результирующего длинноволнового излучения. Для определения количественных характеристик сезонных вариаций потока  $LWR$  рассчитывались амплитуды и фазы годовой и полугодовой гармоник. В каждой ячейке были найдены параметры линейного тренда (для каждого месяца и каждого сезона). Последовательность полей (временных слоев)  $LWR$  исследовалась также с применением метода разложения по естественным ортогональным функциям (ЕОФ). Этот вид статистического анализа позволяет одновременно изучать основные особенности и сезонных, и межгодовых вариаций [8]. Межгодовая изменчивость температуры поверхности моря, а также коротковолновой солнечной радиации по результатам такого разложения выражена главным образом в модуляции годовой гармоник (прежде всего в изменчивости летних максимумов) [2, 3]. Аналогичных проявлений можно было ожидать и в вариациях временных функций главных мод разложения  $LWR$  по ЕОФ. Для оценки характера этой модуляции были сформированы выборки за декабрь и за июль (периоды максимального и минимального результирующего длинноволнового излучения), циклические вариации с периодами от 3 до 11 лет определялись по этим выборкам.

### Результаты и обсуждение

*Осредненные распределения  $LWR$  по сезонам.* На рис. 1 представлены осредненные за весь рассматриваемый период времени (1998–2021 гг.) для центральных месяцев различных сезонов года пространственные распределения  $LWR$  в дальневосточных морях и СЗТО. Наибольших (по абсолютной величине) значений данный параметр достигает зимой, в январе. Максимальные величины результирующего длинноволнового излучения выявлены у побережья Приморья (к югу от  $48^{\circ}$  с. ш.), а также в зоне влияния теплого течения Куроисио у восточного побережья Японии и его ветви – Цусимского течения –

у западного. Наименьшие значения потока тепла в атмосферу наблюдаются в западной части Охотского моря и на севере Татарского пролива – областях, традиционно покрытых льдом. Очевидно, ледяной покров препятствует потере тепла океаном зимой.



**Р и с. 1.** Средние многолетние пространственные распределения  $LWR$ , Вт/м<sup>2</sup>, в январе (а), апреле (b), июле (c) и октябре (d)

**F i g. 1.** Average long-term spatial distributions of  $LWR$ , W/m<sup>2</sup>, in January (a), April (b), July (c) and October (d)

Весной пространственное распределение  $LWR$  более однородно, пространственные различия параметра невелики. На большей части изучаемой акватории значения параметра составляют около  $-50$  Вт/м<sup>2</sup>, несколько выше по абсолютной величине (около  $-70$  Вт/м<sup>2</sup>) они на акватории Японского моря и вблизи восточного побережья о. Хонсю.

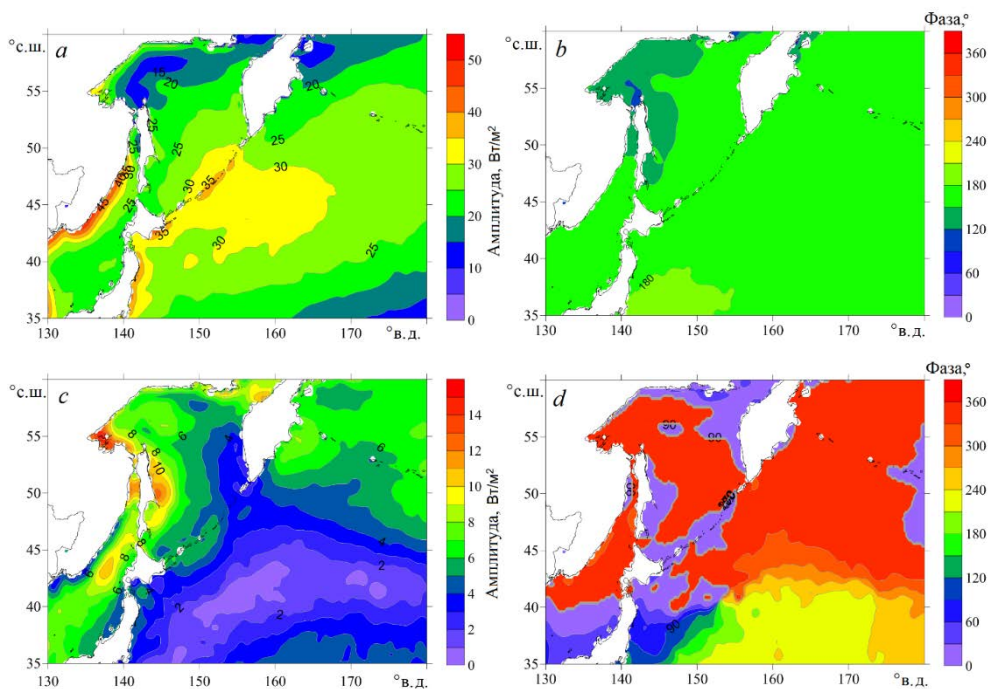
Летом поток результирующего длинноволнового излучения существенно ослабевает, значения  $LWR$  на большей части региона составляют  $-20 \dots -30$  Вт/м<sup>2</sup>, область с самыми низкими значениями (около  $-10$  Вт/м<sup>2</sup>) вытянута от центральной части Курильской гряды на восток примерно вдоль параллели  $45^\circ$  с. ш. В этой области традиционно наблюдается высокая облачность, которая препятствует излучению тепла в атмосферу. Наиболее значимый поток

длинноволнового излучения отмечен на северо-западе Охотского моря, у берегов Камчатки и, что несколько неожиданно, вдоль южной границы изучаемого района. Возможно, эта особенность обусловлена характером формирования облачности, которая здесь менее плотная по сравнению с зоной вблизи 45-й параллели.

Осенью поток длинноволнового излучения достигает величин, близких к наблюдаемым в зимний период. Наибольшие значения ( $-90 \dots -100$  Вт/м<sup>2</sup>) обнаружены в сравнительно узкой полосе вдоль всего материкового побережья от залива Петра Великого на юге до пролива Невельского на севере Японского моря, а также вдоль западного и северного участков побережья Охотского моря. Эта особенность обусловлена действием характерного для этого периода времени сильного и устойчивого ветра северо-западного румба (зимний муссон), несущего холодный воздух с материка, сгоняющего и выхолаживающего поверхностный слой воды вдоль всего материкового побережья рассматриваемого региона. Это хорошо согласуется с результатами работы [2], в которой было выявлено более раннее охлаждение воды в поверхностном слое в северо-западной части Охотского моря по сравнению с основной его акваторией, что наиболее явно показывает существенное влияние излучения тепла в атмосферу на формирование пространственно-временной изменчивости ТПО. Вероятно, с точки зрения рассматриваемых процессов эту область можно отнести к энергоактивным зонам океана по аналогии с районом к востоку от о. Хонсю [9]. Обращает внимание также уменьшение потока  $LWR$  в направлении с запада на восток, минимальные по абсолютной величине значения (около  $-50$  Вт/м<sup>2</sup>) обнаружены на юго-востоке рассматриваемой области, в Тихом океане.

*Гармонический анализ сезонных вариаций.* Для количественной характеристики сезонных вариаций  $LWR$  были рассчитаны амплитуды и фазы годовой и полугодовой гармоник (расчет производился методом наименьших квадратов в каждой пространственной ячейке изучаемой акватории). Результаты расчета в виде пространственных распределений этих параметров представлены на рис. 2. Самые высокие значения амплитуды годовой составляющей отмечены в районах, где в зимний период наблюдается наибольший поток результирующего длинноволнового излучения, – прибрежных областях Приморья, восточного побережья Японии и Курильских островов. В северной части Охотского моря (в замерзающих районах) и на юго-востоке изучаемой области она имеет наименьшую величину. Вероятно, в первом случае это связано с уменьшением потерь тепла зимой вследствие влияния ледяного покрова, во втором случае – вследствие влияния облачности.

Вариации фазы годовой гармоник незначительны, можно отметить только ее уменьшение в северо-западной части Охотского моря и в Татарском проливе по сравнению с основной частью изучаемой акватории. Это означает, что максимальные и минимальные значения потока тепла из океана в атмосферу фиксируются примерно в одни и те же сроки, исключение составляют замерзающие районы (в них максимум излучения приходится на ноябрь).

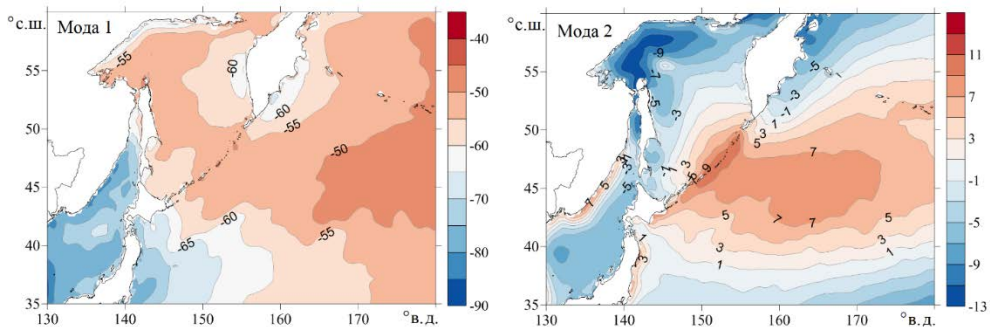


**Р и с. 2.** Пространственное распределение амплитуд (*a, c*) и фаз (*b, d*) годовой (*a, b*) и полугодовой (*c, d*) гармоник

**F i g. 2.** Spatial distribution of amplitudes (*a, c*) and phases (*b, d*) of annual (*a, b*) and semi-annual (*c, d*) harmonics

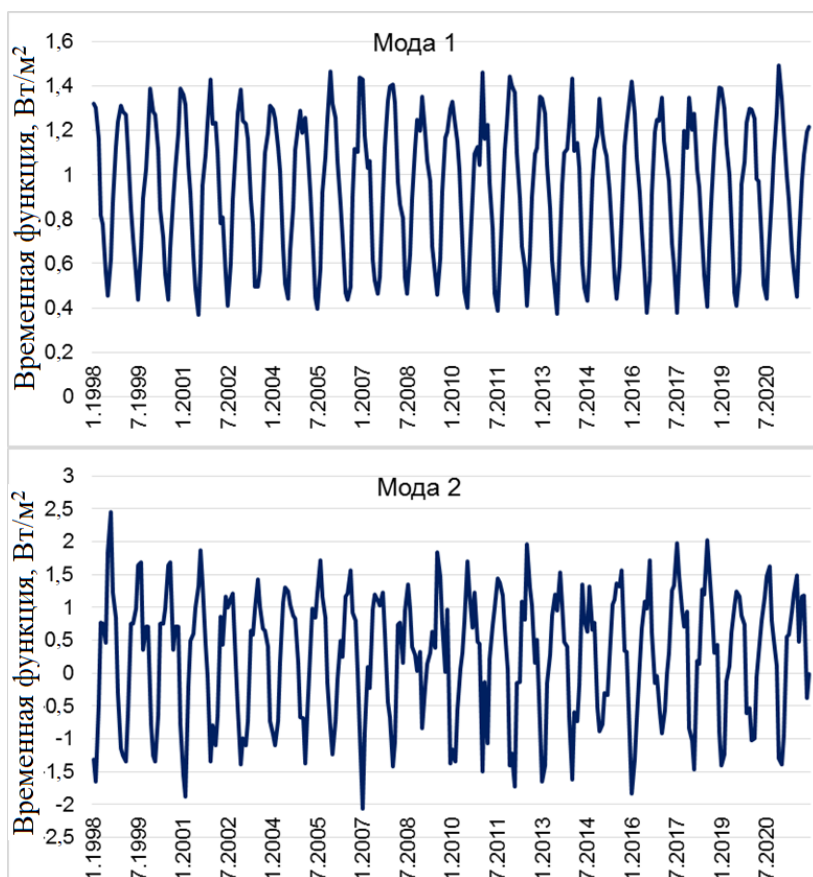
Пространственное распределение амплитуды и фазы полугодовой гармоники имеют более сложный характер. На обширной акватории СЗТО амплитуда невелика, наибольшие ее значения (8–10 Вт/м<sup>2</sup>) отмечены в западной части Охотского моря в традиционно замерзающей акватории, особенно в районе Шантарских островов (до 15 Вт/м<sup>2</sup>). В Японском море, за исключением северной части Татарского пролива, отметим более высокую интенсивность полугодовых вариаций по центру его акватории. Дать физическое объяснение причинам этого явления затруднительно. Наблюдается заметный фазовый сдвиг между акваториями к северу и к югу от параллели 40° с. ш.

*Разложение LWR по ЕОФ.* В значительной мере характер сезонных вариаций отражают также результаты разложения последовательности полей *LWR* по ЕОФ, так как методика ориентирована на минимизацию остаточной дисперсии, а годовой ход у изучаемого параметра является основным. Пространственные распределения первых двух главных мод разложения (объясняют 97,4 и 0,8 % общей дисперсии параметра соответственно) представлены на рис. 3, а графики соответствующих им временных функций – на рис. 4.



**Р и с. 3.** Пространственное распределение первых двух мод разложения последовательности полей  $LWR$  по EOF (безразмерное)

**F i g. 3.** Spatial distribution of the first two modes of decomposition of the  $LWR$  fields sequence in EOF (dimensionless)



**Р и с. 4.** Вариации временных функций первой (*сверху*) и второй (*снизу*) мод разложения  $LWR$  по EOF

**F i g. 4.** Variations in the time functions of the first (*top*) and second (*bottom*) modes of the  $LWR$  decomposition in EOF



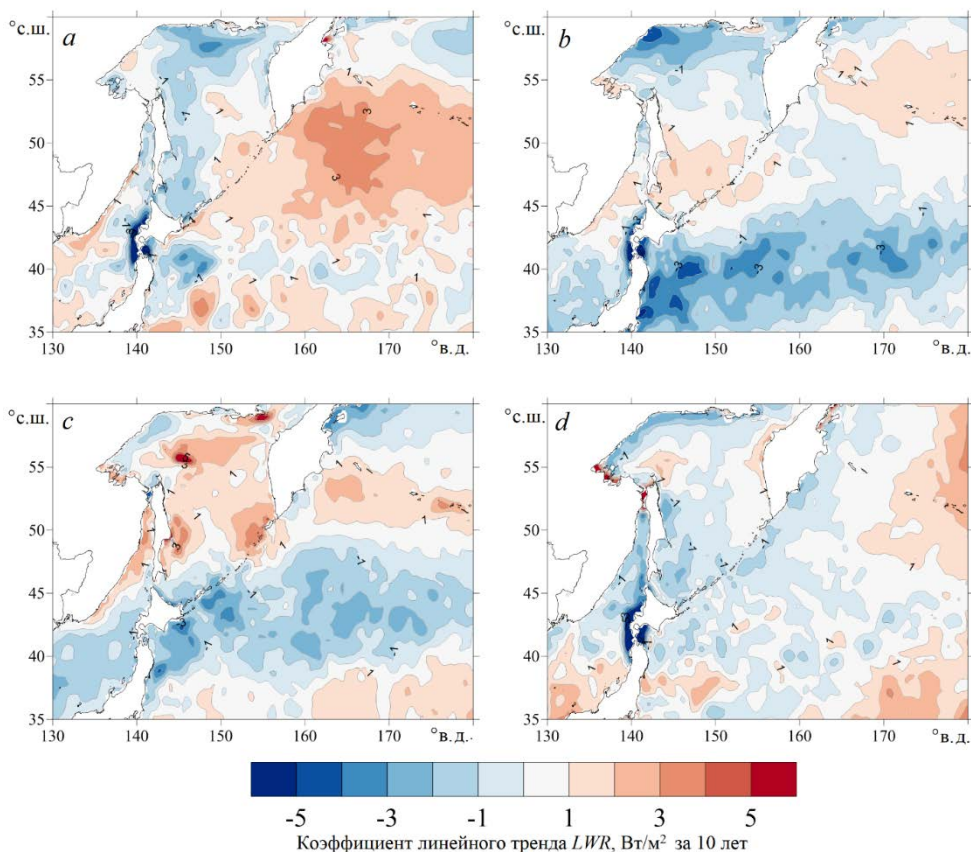
Значения пространственного распределения первой моды, которая принималась безразмерной, во всех точках акватории отрицательные (временной функции – положительные). Максимальные по абсолютной величине значения пространственной функции выявлены на акватории Японского моря (за исключением северной части Татарского пролива) и у восточного берега о. Хонсю ( $-70 \dots -90 \text{ Вт/м}^2$ ). Это говорит, в частности, о значительных потерях тепла в этих акваториях в зимний период, что не удивительно – его запасы, очевидно, существенно больше, чем в Охотском море, и ледяной покров в исследуемой области, кроме упомянутой вершины Татарского пролива, почти отсутствует. Самые низкие показатели обнаружены в удаленной части Тихого океана и центральной Берингова моря. Это указывает на важную роль материка, в частности идущих с него воздушных потоков, в процессах теплообмена между атмосферой и океаном.

В вариациях временной функции явно доминирует годовой ход с амплитудой  $0,4 \text{ Вт/м}^2$ : на нее приходится  $96,8 \%$  дисперсии. Фаза составляет  $348^\circ$ , что отвечает максимальному значению в декабре. Однонаправленная тенденция в изменениях временной функции выражена слабо, межгодовые вариации заключаются в низкочастотной модуляции сигнала, более заметных в максимумах. По выборке декабрьских максимумов выяснилось, что не наблюдалось одной ярко выраженной периодичности. В наибольшей степени проявлялась трехлетняя составляющая, зона влияния которой охватывала значительную часть Охотского моря с максимальными амплитудами на северном шельфе. По июльским минимумам наиболее интересным выявленным фактом была явная связь с циклическими составляющими коротковолновой радиации и ТПО. В частности, было отмечено проявление 11-летнего цикла в обоих параметрах на северном шельфе Охотского моря [3].

Пространственное распределение второй моды характеризуется областью с положительными значениями в центре изучаемого района (а также в узких полосах у побережья Приморья и у западного берега Хонсю) и отрицательными – по его периферии. Наибольшие положительные значения пространственной функции отмечены в центральной части Курильской островной гряды (10–11), отрицательные – в северо-западной части Охотского моря ( $-11 \dots -12$ ). Вариации временной функции также имеют выраженный годовой ход с амплитудой  $1,2 \text{ Вт/м}^2$  и фазой  $188^\circ$ , соответствующей положительному максимуму в июле (иногда он наблюдается в августе) и минимуму в январе (иногда в феврале). Роль второй моды относительно невелика, она является некоторой поправкой к распределению  $LWR$ , определяемому первой модой, поэтому модуляция ее временной функции не рассматривалась.

*Коэффициенты линейного тренда.* На рис. 5 представлены карты пространственного распределения коэффициентов линейного тренда  $LWR$ , рассчитанного посезонно (показатели приведены к 10-летним интервалам). Зимой на акватории большей части изучаемого района наблюдались положительные тенденции с относительно небольшими скоростями ( $1-3 \text{ Вт/м}^2$  за 10 лет), наибольшие величины отмечены в СЗТО к востоку от п-ова Камчатка. Слабо выраженные отрицательные тренды (около  $-1 \dots -2 \text{ Вт/м}^2$  за 10 лет) обнаружены в северной и западной частях Охотского моря (возможно, в этих районах

они связаны с уменьшением ледовитости в данном бассейне), а также у западного и южного берегов Хоккайдо.



**Р и с. 5.** Пространственные распределения коэффициентов линейного тренда  $LWR$  ( $Вт/м^2$  за 10 лет) зимой (*a*), весной (*b*), летом (*c*) и осенью (*d*)

**Fig. 5.** Spatial distributions of the  $LWR$  linear trend coefficients (in  $W/m^2$  over 10 years) in winter (*a*), spring (*b*), summer (*c*) and autumn (*d*)

Весной положительные тренды ( $1-3 \text{ Вт/м}^2$  за 10 лет) обнаружены в южной части Охотского моря и в районе Алеутской островной дуги – в большей степени в южной части Берингова моря и несколько в меньшей – в примыкающей к ним части СЗТО. Отрицательные тренды ( $-1 \dots -4 \text{ Вт/м}^2$  за 10 лет) выявлены в северной части Охотского моря и в районе субполярного фронта, вдоль параллели  $40^\circ$  с. ш.

Летом положительные тенденции (при приблизительно таких же значениях коэффициента линейного тренда) наблюдаются на большей части Охотского моря, в северной части Японского и на небольшом участке СЗТО вблизи Алеутских островов. В южной части Японского моря и на большей части акватории СЗТО тренды имеют отрицательный знак.

Осенью однонаправленные тенденции в изменениях потока результирующего длинноволнового излучения не выражены, величина коэффициентов линейного тренда на основной части изучаемого района невелика.

В целом однонаправленные тенденции в вариациях  $LWR$  в изучаемом районе не существенны, и значения коэффициента линейного тренда на одних и тех же участках акватории изменяются в различные сезоны года. Это согласуется с результатами работы [7], в которой тенденция к снижению излучения тепла в атмосферу была обнаружена в районах, расположенных или южнее, или восточнее рассматриваемой нами акватории.

### Заключение

В результате выполненных исследований выявлено, что наибольших значений поток результирующего длинноволнового излучения, выражающий потерю тепла океаном, достигает зимой и осенью на акватории Японского моря, в западной части Охотского и в примыкающей к восточному побережью о. Хонсю части СЗТО. Особенно выделяется узкая полоса вдоль всего континентального побережья в осенний период. Очевидно, этот эффект обусловлен влиянием сгонных ветров северо-западного румба, характерного для зимнего муссона. С точки зрения рассматриваемого процесса эту область можно считать энергоактивной зоной атмосферы и океана в рассматриваемой акватории (наряду с выделенной ранее областью к востоку от о. Хонсю). Зимой в районах севернее широты  $48^\circ$  это явление выражено в меньшей степени из-за влияния ледяного покрова.

Минимальные по абсолютной величине значения  $LWR$  наблюдаются в июле, иногда в августе, в области, вытянутой от центральной части Курильской гряды на восток. Наиболее вероятная причина низкого потока  $LWR$  – влияние облачности.

Пространственно-временная изменчивость данного параметра хорошо описывается первой модой разложения по ЕОФ, значения пространственной функции которой возрастают по абсолютной величине с востока на запад. В вариациях ее временной функции доминирует годовой ход с амплитудой  $0,4 \text{ Вт/м}^2$ , межгодовые вариации выражены в его низкочастотной модуляции. В вариациях зимних максимумов наиболее значительна роль трехлетней составляющей, проявляющейся в восточной части Охотского моря. В колебаниях летних минимумов наиболее интересен 11-летний цикл, зона влияния которого сосредоточена на северном шельфе Охотского моря и совпадает с областью проявления аналогичной составляющей потока коротковолновой солнечной радиации.

Однонаправленные тенденции в изменениях  $LWR$  выражены слабо, коэффициенты линейного тренда колеблются в пределах  $1\text{--}4 \text{ Вт/м}^2$  за 10 лет по абсолютной величине и существенно изменяются на одних и тех же участках акватории в разные сезоны года.

Подводя итоги проведенного исследования, можно констатировать, что на поток тепла из океана в атмосферу оказывают влияние такие факторы, как атмосферная циркуляция (в особенности зимний муссон), ледяной покров и облачность. Полученные результаты важны для понимания особенностей формирования теплосодержания в поверхностном слое воды в изучаемом регионе,

так как вместе с рассмотренной нами в более ранних работах коротковолновой радиацией она формирует радиационный баланс и определяет результирующий поток тепла в поверхностном слое океана.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Цхай Ж. Р., Шевченко Г. В., Ложкин Д. М.* Анализ термических условий в северо-западной части Тихого океана по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2022. № 1. С. 30–37. EDN HRSJAX. doi:10.31857/S0205961422010079
2. *Шевченко Г. В., Ложкин Д. М.* Сезонные вариации температуры поверхности Охотского моря и прилегающих районов по данным спутниковых наблюдений и реанализа ERA5 // Океанологические исследования. 2022. Т. 50, № 1. С. 25–37. doi:10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(1).3
3. *Ложкин Д. М., Шевченко Г. В.* Сезонная и межгодовая изменчивость потока солнечной радиации на поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19, № 1. С. 253–264. doi:10.21046/2070-7401-2022-19-1-253-264
4. *Siegel D. A., Dickey T. D.* Variability of net longwave radiation over the eastern North Pacific Ocean // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1986. Vol. 91, iss. C6. P. 7657–7666. <https://doi.org/10.1029/JC091iC06p07657>
5. ENSO surface longwave radiation forcing over the tropical Pacific / K. G. Pavlakis [et al.] // Atmospheric Chemistry and Physics. 2007. Vol. 7, iss. 8. P. 2013–2026. <https://doi.org/10.5194/acp-7-2013-2007>
6. *Thandlam V., Rahaman H.* Evaluation of surface shortwave and longwave downwelling radiations over the global tropical oceans // SN Applied Sciences. 2019. Vol. 1, iss. 10. 1171. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1172-2>
7. *Пономарев В. И., Петрова В. А., Дмитриева Е. В.* Климатическая изменчивость составляющих теплового баланса поверхности северной части Тихого океана // Известия ТИНРО. 2012. Т. 169. С. 67–76.
8. *Багров Н. А.* Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих // Труды Центрального института прогнозов. 1959. Вып. 74. С. 3–24.
9. *Власова Г. А., Полякова А. М.* Энергоактивная зона океана и атмосферы в северо-западной Пацифике // Известия Российского государственного педагогического университета имени А. И. Герцена. 2013. № 163. С. 128–140.

*Об авторах*

**Шевченко Георгий Владимирович**, зав. лабораторией океанографии, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО) (693023, Россия, Южно-Сахалинск, ул. Комсомольская, 196), ведущий научный сотрудник лаборатории цунами, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (693023, Россия, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-0785-4618**, [shevchenko\\_zhora@mail.ru](mailto:shevchenko_zhora@mail.ru)

**Ложкин Дмитрий Михайлович**, специалист лаборатории океанографии, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО) (693023, Россия, Южно-Сахалинск, ул. Комсомольская, 196), **ORCID ID: 0000-0002-7073-681X**