Сезонная и межгодовая изменчивость потока солнечной радиации на поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий

Д. М. Ложкин¹, Г. В. Шевченко^{1,2}

¹ Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск, 693023, Россия E-mails: dima-lm@rambler.ru, shevchenko_zhora@mail.ru ² Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН Южно-Сахалинск, 693022, Россия

Рассмотрены среднемесячные значения потока коротковолновой солнечной радиации (SWR, 1998–2020) в Охотском море и прилегающих акваториях по данным реанализа ERA5. В сезонной изменчивости данного параметра ярко прослеживается годовая гармоника с максимумом в июне – июле и минимумом в декабре – январе. Амплитуда годовой гармоники увеличивается с юго-востока на северо-запад, фаза возрастает в том же направлении примерно на один месяц. Вклад остальных сезонных гармоник невелик. В зимне-весенний период изолинии SWR отклоняются от зональных в областях, прилегающих к среднему положению ледяного покрова. Зимой и весной над исследуемой акваторией доминируют положительные тренды SWR, зарождающиеся в феврале в южной, центральной и восточной частях Охотского моря. Летом наблюдается противоположная картина: преобладают отрицательные тренды, причём наиболее сильно они выражены в июне, постепенно уменьшаясь к осени. В осенний период (с октября по декабрь) тренды практически отсутствуют. В огибающей по максимумам SWR (июль) выделены циклические компоненты с периодами 3, 5, 7 и 11 лет. Для первых трёх не выявлено связи с аналогичными составляющими в вариациях температуры поверхности моря, в целом корреляция между этими параметрами достаточно низкая. Исключение составляет северная часть Охотского моря, характеризующаяся наиболее низкой облачностью — здесь инсоляция становится причиной более раннего прогрева поверхностного слоя воды (наряду с влиянием летнего муссона) и циклических вариаций с периодом 11 лет.

Ключевые слова: коротковолновая солнечная радиация, реанализ, гармоника, сезонные вариации, межгодовая изменчивость, тренд, цикличность, ледовитость

Одобрена к печати: 11.03.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-253-264

Введение

Солнечная радиация выступает основным источником тепла в океане, она оказывает определяющее влияние на формирование термических условий в поверхностном слое его вод (Amaya et al., 2020). Помимо широтного изменения её потока, важную роль в этих процессах может играть наличие облачности, а также диффузное отражение радиации от поверхности океана. Поэтому изучение её пространственно-временной изменчивости, выявление особенностей, присущих отдельным акваториям, представляет собой важную научную задачу, имеющую выраженное прикладное значение для ихтиологии и гидробиологии.

Основные закономерности пространственного распределения солнечной радиации по сезонам известны, и возможности их использования для изучения вариаций климата достаточно давно рассматриваются как в глобальном масштабе (см., например, работу (Reed, 1977)), так и в отдельных районах, в частности прилегающих к побережью о. Хонсю (Kawamura et al., 1998). Тем не менее вариации данного параметра над океанами продолжают привлекать внимание специалистов (Александрова и др., 2017). Для уточнения представлений о процессах, происходящих на границе между атмосферой и гидросферой, развиваются методы параметризации (Александрова и др., 2007), производится сравнение с данными натурных экспериментов (Синицын, Гулев, 2017), уточняются базы данных (Синицын, Гулев, 2018). При этом особенности пространственно-временных вариаций солнечной радиации в отдельных бассейнах, таких как Охотское море, остаются обычно в тени, им уделяется мало внимания.

Следует отметить, что в известном справочном издании (Гидрометеорология..., 1998) достаточно подробно рассмотрен вопрос формирования радиационного баланса на акватории данного бассейна, приведены карты его пространственного распределения в различные сезоны года. Основной частью этого баланса представляется поглощённая солнечная радиация, которая рассчитывалась с учётом даты, широты места, температуры атмосферного воздуха, альбедо морской поверхности и балла общей облачности. В отличие от радиационного баланса, для поглощённой солнечной радиации пространственные распределения в указанной работе, к сожалению, не приведены.

В Сахалинском филиале Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО) накоплен продолжительный ряд спутниковых наблюдений за температурой поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий, включая северную часть Японского моря и северо-западную часть Тихого океана (СЗТО). Различные аспекты сезонной и межгодовой изменчивости термических условий в поверхностном слое этого района рассматривались в работах (Ложкин, Шевченко, 2019, 2020; Новиненко, Шевченко, 2007). Причины некоторых выявленных особенностей пространственно-временной изменчивости температуры поверхности моря остаются невыясненными, что побудило нас рассмотреть вариации потока солнечной радиации как один из возможных влияющих факторов.

В настоящее время в хранилище климатических данных (*англ*. Climate Data Store) Европейского центра среднесрочного прогноза погоды (*англ*. European Centre for Medium-Range Wether Forecasts — ECMWF) (https://cds.climate.copernicus.eu) предоставлены данные по широкому кругу гидрометеорологических параметров, включая коротковолновую солнечную радиацию (*англ*. short wave radiation — SWR) с пространственным разрешением четверть градуса. Поскольку база данных Сахалинского филиала ВНИРО по температуре поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий насчитывает 23 года (1998–2020), имело смысл проанализировать данные SWR в том же районе за аналогичный промежуток времени с целью в дальнейшем определить характер их взаимосвязи. Влияние радиационного баланса на температуру поверхности океана (ТПО) и особенности его пространственно-временной изменчивости предполагается изучить на последующих этапах проводимого исследования.

Материалы и методы анализа

Для Охотского моря и прилегающих к нему акваторий сформированы ряды среднемесячных значений проникающего коротковолнового излучения по данным реанализа ERA5 продолжительностью в 23 года (1998–2020). Область исследования представляла собой прямоугольник с координатами 42–60° с. ш. и 135–160° в. д. В каждой пространственной ячейке этой области размером 0,25×0,25° были вычислены коэффициенты корреляции между рядами SWR и температурой поверхности моря из базы данных Сахалинского филиала BHИPO. В случае пропуска данных в рядах ТПО из-за наличия ледяного покрова значения SWR из ряда также исключались; таким образом, в замерзающих акваториях расчёт проводился по сериям, длина которых составляла около 80 % от максимально возможных 276 значений.

В каждой пространственной ячейке для каждого месяца рассчитаны средние многолетние значения и отклонения от средних многолетних (аномалии). Для определения характера сезонных вариаций потока SWR в изучаемом регионе использовался гармонический анализ: амплитуды и фазы годовой гармоники и кратных ей составляющих (полугодовой, третьи четвертьгодовой) определялись в каждой четвертьградусной ячейке методом наименьших квадратов.

Для рядов средних месячных значений в этих ячейках методом наименьших квадратов были найдены параметры линейного тренда. Расчёты проводились для каждого месяца отдельно, для различных сезонов и для полного года. Межгодовая изменчивость температуры поверхности моря выражена главным образом в модуляции годовой гармоники (прежде всего в изменчивости летних максимумов), в которой просматриваются более низкочастотные циклические вариации. Поэтому её можно исследовать по выборке максимумов или на основе осреднения значений за три летних месяца (Ложкин, Шевченко, 2020). Наблюдаются также модуляции зимних минимумов и фазы, но они выглядят менее значимыми и в указанной работе рассмотрены не были. Аналогичный подход можно применить и к анализу межгодовой изменчивости SWR. Для этой цели была выполнена выборка значений за июль, когда поток SWR в изучаемом районе достигает своего максимума. Поскольку имеющийся ряд слишком короткий для применения стандартных методов спектрального анализа, в данной работе для поиска амплитуд и фаз циклических составляющих был использован метод гармонического анализа. Амплитуды и фазы были определены методом наименьших квадратов для циклических компонент с периодом от 3 до 11 лет, кратным году.

Последовательность полей SWR также была исследована с применением метода разложения по естественным ортогональным функциям (Багров, 1959). Этот подход позволяет определить составляющие (моды), дающие наибольший вклад в дисперсию изучаемого параметра. Каждая составляющая характеризуется пространственным распределением и соответствующей ей временной функцией. Пространственные распределения считались безразмерными, временные функции выражены в Вт·м⁻².

Результаты и обсуждение

Корреляция между температурой поверхности океана и SWR

Результаты расчёта коэффициентов корреляции между рядами ТПО и SWR представлены на *рис. 1.* Наиболее высокие значения 0,3–0,6 (это статистически значимая связь с учётом длины сравниваемых серий по 276 значений) получены по периферии Охотского моря, в Японском море и Татарском проливе, а также у юго-восточного побережья Камчатки. Более низкие значения (0,2 и меньше) — в районе глубоководной впадины Дерюгина к востоку от о. Сахалин, вблизи Курильской островной гряды и в северо-западной части Тихого океана, где коэффициент корреляции близок к нулю. Понятно, что на формирование термических условий в поверхностном слое помимо солнечной радиации оказывает влияние много факторов: конвективные и адвективные движения вод, льдообразование и т.д. Также логично, что влияние инсоляции в большей мере сказывается в сравнительно мелководных районах, однако низкая корреляция между ТПО и SWR во многом связана с влиянием облачности.



Рис. 1. Пространственное распределение коэффициента корреляции между рядами среднемесячных значений ТПО и SWR за 1998–2020 гг. в четвертьградусных квадратах

Как показано в справочном издании (Гидрометеорология..., 1998), в изучаемом районе общая облачность достигает наибольшего значения в июле под действием летнего муссона, характеризующегося переносом влажного воздуха со стороны океана. Максимальная балльность облачности (8–9) наблюдается в районе Курильской островной гряды, немного уменьшается в центральной части Охотского моря и более существенно, до 5 баллов, — над его северным шельфом. Весной и осенью влияние облачности снижается. Уменьшается оно и в августе по сравнению с июлем, что может быть одной из причин запаздывания максимума SWR в южной части изучаемого района по сравнению с северным.

С учётом этого запаздывания расчёт коэффициента корреляции был выполнен с временными сдвигами 1, 2 и 3 мес. При смещении на месяц характер распределения коэффициента корреляции изменился мало, но его значения возросли. Максимальная корреляция наблюдается при временном сдвиге 2 мес, на основной части акватории Охотского моря значения составляют 0,8–0,9, хотя физически объяснить такое запаздывание в прогреве поверхностного слоя затруднительно.

Отметим, что наиболее существенная связь между ТПО и SWR при более естественных значениях задержки (коэффициент корреляции более 0,5 при нулевом сдвиге и 0,7–0,8 при смещении на 1 мес) отмечена именно в северо-западной и северной частях моря, которые характеризуются не только относительной мелководностью, но и меньшим влиянием облачности. Это обстоятельство, наряду с воздействием ветров южного румба, выступает вероятной причиной более раннего прогрева в северо-западной части моря по сравнению с его основной акваторией (Новиненко, Шевченко, 2007).

В то же время такой сложный характер взаимосвязи между ТПО и SWR оказался неожиданным. Это побудило провести детальный анализ пространственно-временной изменчивости SWR по той же схеме, которая применялась при изучении вариаций ТПО в рассматриваемом районе (Ложкин, Шевченко, 2019; 2020; Новиненко, Шевченко, 2007).



Среднее многолетнее распределение SWR по сезонам



Гидрологические сезоны в Охотском море смещены по отношению к календарным на месяц, к зиме относятся январь – март (в марте, к примеру, льда гораздо больше, чем в декабре (Гидрометеорология..., 1998)), аналогичное разбиение использовалось и в настоящей работе. Зимой (на рис. 2 (см. с. 256) представлено распределение параметра в феврале) наблюдается хорошо выраженное уменьшение SWR с широтой: от 90 до 30 Вт·м⁻². Этому способствует не только широтное изменение инсоляции, но и влияние ледяного покрова, обладающего более высоким альбедо по сравнению с открытой водой. Самые низкие значения SWR (около 20 Вт·м⁻²) отмечены в Сахалинском зал., где ледяной покров наиболее устойчивый. Весной (май) самые высокие значения SWR выявлены в Японском море (включая Татарский пролив) и у тихоокеанского побережья о. Хоккайдо, а также в северо-восточной части Охотского моря. Значения параметра убывают в направлении на северо-запад, где в Сахалинском зал., вблизи Шантарских о-вов и у северо-восточного побережья о. Сахалин сохраняются остатки ледяного покрова. Более удивительны низкие значения SWR на юго-востоке изучаемой области, что может быть обусловлено влиянием облачности. Летом самые низкие значения потока выявлены на юго-востоке, высокие — на западе изучаемой акватории (северная часть Японского моря, включая Татарский пролив; Сахалинский зал., районы вдоль восточного побережья о. Сахалин), а также на входе в зал. Шелихова и на юго-восточном шельфе Камчатки. Осенью в распределении SWR преобладает широтная зональность, характер пространственного распределения схож в целом с зимним, но значения параметра выше (от 100 $BT \cdot M^{-2}$ на юго-западе до 30 $BT \cdot M^{-2}$ на северо-востоке акватории).

Анализ сезонных вариаций

В сезонной изменчивости потока коротковолновой радиации значимо выделяется годовая гармоника с максимумом в июне – июле и минимальными значениями в декабре – январе. Амплитуда годовой гармоники увеличивается с юго-востока (от 60–70 Вт·м⁻² в СЗТО) на северо-запад (более 100 Вт·м⁻² на севере Охотского моря, *рис. 3*), а фаза возрастает в том же направлении, что и амплитуда, приблизительно в пределах 30° (что соответствует сдвигу на один месяц).



Рис. 3. Пространственное распределение амплитуд (Вт·м⁻²) и фаз (град) годовой и полугодовой гармоник SWR

Это означает, что максимум потока SWR на севере Охотского моря и в Татарском проливе наступает примерно на месяц позже, чем в открытом океане (выше уже отмечалось, что для ТПО была выявлена обратная картина (Новиненко Шевченко, 2007)). Высокие значения амплитуды в северо-западной части изучаемого бассейна обусловлены, прежде всего, низкими значениями SWR в зимний период, вызванными влиянием ледяного покрова, различия в летний период существенно меньше. Вклад остальных сезонных гармоник невелик: к примеру, амплитуда полугодовой гармоники не превышает 30 Вт·м⁻² во всей акватории, роль более короткопериодных составляющих ещё меньше. Максимальные амплитуды полугодовой гармоники отмечены в северо-западной части Охотского моря, в Сахалинском зал. и к северу от него, а также на входе в зал. Шелихова вдоль материкового побережья. Фаза этой составляющей, напротив, меняется значительно, в пределах около 240° (сдвиг до четырёх месяцев), её значения возрастают в направлении с юго-востока на северо-запад.

Линейные тренды

Рассмотрим результаты расчёта (в виде коэффициента тренда, приведённого к 10-летнему промежутку времени) как для каждого месяца отдельно, так и для усреднённых по гидрологическим сезонам значений изучаемого параметра.

Зимой и весной над исследуемой акваторией доминируют положительные тренды SWR, тенденция к возрастанию потока коротковолновой радиации начинает проявляться в феврале в южной, центральной и восточной частях Охотского моря (*puc. 4*). В марте – апреле его зона расширяется до полного охвата всей области (максимальная величина положительного тренда превышает 30 Вт·м⁻² за 10 лет), в мае концентрируется в северо-западной части Охотского моря, в юго-восточной же части моря и к востоку от Курильской гряды тренд меняется на отрицательный. Летом наблюдается противоположная картина: преобладают отрицательные тренды (с величиной до 25 Вт·м⁻² за 10 лет), причём наиболее сильно они выражены в июне, постепенно уменьшаясь к осени. В осенний период (с октября по декабрь) однонаправленные тенденции в вариациях SWR практически отсутствуют.



Рис. 4. Пространственное распределение коэффициента линейного тренда SWR (Вт·м⁻² за 10 лет) в различные сезоны года

Циклические составляющие

В результате гармонического анализа ряда значений за июль, когда на большей части изучаемого района наблюдается максимум SWR, получены карты распределения амплитуд циклических компонент. Наибольший интерес представляли те компоненты, которые имели значимые амплитуды на существенных по площади участках. Результаты расчёта для периодов 3, 5, 7 и 11 лет представлены на *рис. 5*.



Рис. 5. Пространственное распределение амплитуд циклических компонент с периодом 3, 5, 7 и 11 лет (Вт·м⁻²)

Циклическая компонента с периодом три года имеет наибольшие значения амплитуды в северной и северо-восточной частях Охотского моря. Однако ни по пространству (для ТПО амплитуды максимальны в северо-западной части моря), ни по времени проявления трёхлетних вариаций SWR и ТПО не согласуются (Ложкин, Шевченко, 2020).

Сказанное выше в полной мере относится и к компоненте с периодом пять лет. В вариациях SWR она отмечена в акватории между северо-восточным побережьем о. Сахалин и югозападным берегом п-ова Камчатка, в Сахалинском зал. и в Татарском проливе. В то же время в огибающей по максимумам ТПО эта компонента главным образом выражена в юго-западной части Охотского моря.

Семилетняя составляющая в изменчивости SWR проявляется в северо-западной части Охотского моря, в Сахалинском зал. и Амурском лимане, а также у западного и северного берега о. Хоккайдо. Аналогичной составляющей в вариациях ТПО не было отмечено, отклик на неё слабый.

Наибольший интерес представляет циклическая компонента с периодом 11 лет, её амплитуда превышает 20 Вт·м⁻² (см. *рис. 5*). Эта компонента локализована в северной части Охотского моря. Именно здесь обнаружилось проявление аналогичной составляющей в вариациях ТПО, объяснить которую было затруднительно, так как сложно было представить конвективные или адвективные факторы, которые могли быть причиной подобных вариаций (Ложкин, Шевченко, 2020). В данном случае удалось получить удовлетворительное объяснение достаточно интенсивным вариациям температуры поверхности моря на северном шельфе моря, играющем, несомненно, важную роль в формировании термических условий в данном районе.

Разложение последовательности полей SWR по эмпирическим ортогональным функциям EOF (англ. empirical orthogonal functions)

Пространственные распределения первых двух мод (доля этих составляющих в общей дисперсии изучаемого параметра составляет около 96,9 и 2 % соответственно) представлены на *рис. 6*, соответствующие им временные функции — на *рис.* 7.



Рис. 6. Пространственное распределение первых двух мод разложения последовательности полей SWR по EOF (безразмерное)



Значения как временной функции первой моды, так и в пространственных ячейках изучаемой области положительные и убывают в направлении с юго-запада на северо-восток. Максимальные значения (около 170) отмечены в южной части рассматриваемой акватории Японского моря, минимальные (около 100) — в районе Шантарских о-вов. Равномерный характер изменений нарушается наличием двух зон с более высокими показателями по сравнению с окружающими водами на юго-западном и юго-восточном шельфе п-ова Камчатка.

Временная функция первой моды имеет выраженный сезонный характер, годовая гармоника с амплитудой $0,55 \text{ Bt} \cdot \text{m}^{-2}$ описывает 98,7 % её дисперсии (см. *рис.* 7). В её графике можно отметить слабовыраженную модуляцию, которую можно оценить путём оценки изменчивости амплитуды годовой гармоники. Наиболее тёплые условия отмечены летом 2002, 2099, 2012 и 2019 гг., холодные — в 2001, 2013 и 2020 гг. Вариации зимних минимумов выражены меньше, можно отметить наиболее тёплые условия зимой 1998 и 2005 гг. и холодные в 2010 и 2019 гг.

Пространственное распределение второй моды имеет узловую линию, проходящую примерно вдоль 49° с. ш. и разделяющую северную область с положительными значениями (до 40 единиц на севере Охотского моря) и южную с отрицательными, которая занимала около двух третей площади изучаемого района, но отклонения были не такими существенными (до –20 единиц).

Временная функция второй моды также имеет выраженный сезонный характер, она хорошо описывается комбинацией годовой (амплитуда 1,22 Вт·м⁻², доля в общей дисперсии 81,7%) и полугодовой (0,57 Вт·м⁻², доля в дисперсии 17,6%) гармоник. Её значения положительны в тёплый период года (май – сентябрь, хотя в ряде случаев в мае были отрицательные значения), отрицательны — в холодный. Практически всегда максимум наблюдался в июле, наибольшее значение (2,21 Вт·м⁻²) — в июле 2009 г. Отрицательные отклонения в большинстве случаев были в марте, однако наибольшее по абсолютной величине (-2,17 Вт·м⁻²) наблюдалось в апреле 2001 г. В вариациях амплитуды годовой гармоники не обнаруживаются регулярные квазипериодические колебания, только короткопериодные всплески в начале и в конце периода наблюдений.

Важным обстоятельством представляется противоречие между высокими значениями амплитуды годовой гармоники в северо-западной части Охотского моря и низкими значениями пространственного распределения первой моды, временная функция которой имеет выраженный годовой ход. Это обусловлено фазовыми различиями годового хода в этом районе и на большей части изучаемого района (первая мода отражает именно их). В данном случае велика роль второй моды, имеющей большую амплитуду временной функции (её годовая составляющая сдвинута примерно на месяц по сравнению с первой модой) и высокие значения пространственной компоненты на северо-западе рассматриваемой акватории.

Заключение

На основе анализа полей среднемесячных значений коротковолновой солнечной радиации (данные реанализа ERA5 за 1998–2020 гг.) в Охотском море и прилегающих акваториях (область в координатах 42–60° с. ш. и 135–160° в. д., что соответствует базе данных ТПО Сахалинского филиала ВНИРО) получены следующие основные результаты.

- В холодный период года (октябрь март) преобладает ожидаемая широтная зональность в распределении SWR, низкие значения параметра в северо-западной части моря в ледовый период обусловлены также более высоким альбедо льда по сравнению с открытой водой. Весной значения SWR убывают в направлении с юго-запада на северовосток, низкие значения в северо-западной части Охотского моря обусловлены наличием остатков ледяного покрова. Летом более высокие значения отмечены на западе изучаемой акватории, самые низкие на юго-востоке, в Тихом океане, что, вероятно, обусловлено влиянием облачности.
- 2. В сезонной изменчивости данного параметра ярко выделяется годовая гармоника с пиком в июне – июле и минимальным значением в декабре – январе. Амплитуда этой составляющей увеличивается с юго-востока на северо-запад, а фаза меняется в пределах 30°, что соответствует сдвигу приблизительно на месяц. Вклад остальных сезонных гармоник невелик.

- 3. Зимой и весной над исследуемой акваторией доминируют положительные тренды SWR, формирующиеся изначально в феврале в южной, центральной и восточной частях Охотского моря. Летом наблюдается противоположная картина: преобладают отрицательные тренды, причём наиболее сильно они выражены в июне, постепенно уменьшаясь к осени. В осенний период (с октября по декабрь) однонаправленные тенденции практически отсутствуют.
- 4. По выборке данных за июль при оценке огибающей параметра по максимальным значениям выделяются циклические компоненты с периодами от 3 до 11 лет. Только самая низкочастотная из них имеет значимый отклик в вариациях температуры поверхности моря на северном шельфе Охотского моря, составляющие с периодами 3, 5 и 7 лет аналогичных вариаций ТПО не вызывают (Ложкин, Шевченко, 2020).
- 5. Пространственное распределение первой моды разложения последовательности полей SWR по EOF, описывающей около 97 % дисперсии изучаемого параметра, характеризует общие закономерности потока солнечной радиации. В её временной функции доминирует годовая гармоника с амплитудой 0,55 Вт⋅м⁻² и максимумом в мае июне. Вторая мода выступает региональной поправкой, она компенсирует относительно малый вклад первой моды в сезонные вариации SWR в северо-западной части Охотского моря, что согласуется с высокими значениями амплитуды годовой гармоники и их уменьшением в южной части изучаемого района.

В целом можно утверждать, что поток коротковолновой солнечной радиации на акватории Охотского моря и прилегающих акваториях характеризуется весьма сложными пространственно-временными вариациями: изменчивостью сезонного хода, наличием в разных районах в различные сезоны однонаправленных трендов и циклических вариаций с периодами от 3 до 11 лет. При этом можно констатировать неожиданно слабую её связь с вариациями температуры поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий. Исключение составляет северная часть Охотского моря, характеризующаяся наиболее низкой облачностью: здесь инсоляция становится причиной более раннего прогрева поверхностного слоя воды (наряду с влиянием летнего муссона) и циклических вариаций с периодом 11 лет.

Литература

- 1. *Александрова М. П., Гулев С. К., Синицын А. В.* Уточнение параметризации коротковолновой радиации на поверхности океана на основе прямых измерений в Атлантическом океане // Метеорология и гидрология. 2007. № 4. С. 45–54.
- 2. *Александрова М. П., Синицын А. В., Гулев С. К.* Климатические закономерности коротковолновой солнечной радиации над океанами, на основе новой параметризации // Океанология. 2017. Т. 57. № 2. С. 253–256. DOI: 10.7868/S0030157417020010.
- 3. *Багров Н.А.* Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих // Тр. Центрального ин-та прогнозов. 1959. Вып. 74. С. 3–24.
- 4. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 9. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / ред. Глуховский Б.Х., Гоптарев Н. П., Терзиев Ф. С. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. 342 с.
- 5. Ложкин Д. М., Шевченко Г. В. Тренды температуры поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным 1998–2017 гг. // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 1. С. 55–61. DOI: 10.31857/S0205-96142019155-61.
- 6. Ложкин Д. М., Шевченко Г. В. Циклические вариации температуры поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным в 1998–2018 гг. // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 1. С. 44–51. DOI: 10.31857/S0205961420010066.
- 7. *Новиненко Е. Г., Шевченко Г. В.* Пространственно-временная изменчивость температуры поверхности Охотского моря по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 5. С. 50–60.
- 8. *Синицын А. В., Гулев С. К.* Сравнение натурных и спутниковых данных о приходящих потоках солнечной радиации для Атлантического океана в период 2004–2014 гг. // Океанология. 2017. Т. 57. № 2. С. 268–274. DOI: 10.7868/S0030157417020198.

- 9. *Синицын А. В., Тулев С. К.* Сравнительный анализ спутниковых баз данных приходящих коротковолновых потоков на поверхность Мирового океана // Океанология. 2018. Т. 58. № 5. С. 289–695. DOI: 10.1134/S0030157418050167.
- Amaya D. J., Miller A. J., Xie S. P., Kosaka Y. Physical drivers of the summer 2019 North Pacific marine heatwave // Nature Communications. 2020. V. 11. Art. No. 1903. https://doi.org/10.1038/ s41467-020-15820-w.
- 11. *Kawamura H., Tanahashi S., Takahashi T.* Estimation of insolation over the Pacific Ocean off the Sanriku coast // J. Oceanography. 1998. V. 54. P. 457–464.
- 12. *Reed R. K.* On Estimating Insolation over the Ocean // J. Physical Oceanography. 1977. V. 7. No. 3. P. 482–485.

Seasonal and interannual variability of solar radiation flux at the surface of the Okhotsk Sea and adjacent waters

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

¹ Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Sakhalin Branch, Yuzhno-Sakhalinsk 693023, Russia E-mails: dima-lm@rambler.ru, shevchenko_zhora@mail.ru
² Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS Yuzhno-Sakhalinsk 693022, Russia

The average monthly values of short-wave solar radiation flux (SWR, 1998–2020) in the Sea of Okhotsk and adjacent water areas are considered according to the ERA5 reanalysis data. In the seasonal variability of this parameter, the annual harmonic is clearly seen with a maximum in June – July and a minimum in December – January. The amplitude of the annual harmonic increases from southeast to northwest, the phase increases in the same direction by about one month. The contribution of other seasonal harmonics is small. In the winter-spring period, the SWR isolines deviate from the zonal ones in areas adjacent to the average position of the ice cover. In winter and spring, positive SWR trends dominate over the study area, originating in February in the southern, central, and eastern parts of the Sea of Okhotsk. In summer, the opposite situation is observed: negative trends prevail; and they are most pronounced in June, gradually decreasing towards autumn. In the autumn period (from October to December) there are practically no trends. In the envelope based on SWR maxima (July), cyclic components with periods of 3, 5, 7, and 11 years are identified. For the first three, no relationships were found with similar components in sea surface temperature variations; in general, the correlation between these parameters is rather low. An exception is the northern part of the Sea of Okhotsk, which is characterized by the lowest cloudiness. Here, insolation is the cause of earlier heating of the surface water layer (along with the influence of the summer monsoon) and cyclic variations with a period of 11 years.

Keywords: shortwave solar radiation, reanalysis, harmonics, seasonal variations, interannual variability, trend, cyclicity, ice coverage

Accepted: 11.03.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-253-264

References

- 1. Aleksandrova M. P., Gulev S. K., Sinitsyn A. V., An improvement of parametrization of short-wave radiation at the sea surface on the basis of direct measurements in the Atlantic, *Meteorologiya i gidrologiya*, 2007, No. 4, pp. 45–54 (in Russian).
- Aleksandrova M. P., Sinitsyn A. V., Gulev S. K., Climate patterns of short-wave solar radiation over oceans based on a new parameterization, *Okeanologiya*, 2017, Vol. 57, No. 2. pp. 253–256 (in Russian), DOI: 10.7868/S0030157417020010.

- 3. Bagrov N.A., Analytical presentation of the sequence of meteorological fields through natural orthogonal components, *Trudy Tsentral'nogo instituta prognozov*, 1959, Vyp. 74, pp. 3–24 (in Russian).
- 4. *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei. Tom 9. Okhotskoe more. Vyp. 1. Gidrometeorologicheskie us-loviya* (Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. Vol. 9. The Sea of Okhotsk. Issue 1. Hydrometeorological conditions), Glukhovskii B. Kh., Goptarev N. P., Terziev F. S. (eds.), Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1998, 342 p. (in Russian).
- 5. Lozhkin D. M., Shevchenko G. V., Trends in sea surface temperature of the sea of Okhotsk and adjacent water areas by satellite data in 1998-2017, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2019, No. 1, pp. 55–61 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205-96142019155-61.
- 6. Lozhkin D. M., Shevchenko G. V., Cyclic sea surface temperature variations in the Sea of Okhotsk and adjacent water areas according to satellite data in 1998–2018, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2020, No. 1. pp. 44–51 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961420010066.
- 7. Novinenko E.G., Shevchenko G.V., Spatial and Temporal Variability of the Okhotsk Sea Surface Temperature from Satellite Data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, No. 5, pp. 50–60 (in Russian).
- 8. Sinitsyn A. V., Gulev S. K., Comparison of in-situ and satellite data of surface incoming short-wavelength radiation for the Atlantic Ocean during 2004–2014, *Okeanologiya*, 2017, Vol. 57, No. 2, pp. 268–274 (in Russian), DOI: 10.7868/S0030157417020198.
- Sinitsyn A. V., Gulev S. K., Comparative Analysis of Satellite Databases of Incoming Short-Wavelength Fluxes to the World Ocean Surface, *Okeanologiya*, 2018, Vol. 58, No. 5, pp. 289–695 (in Russian), DOI: 10.1134/S0030157418050167.
- Amaya D.J., Miller A.J., Xie S.P., Kosaka Y., Physical drivers of the summer 2019 North Pacific marine heatwave, *Nature Communications*, 2020, Vol. 11, Art. No. 1903, https://doi.org/10.1038/ s41467-020-15820-w.
- 11. Kawamura H., Tanahashi S., Takahashi T., Estimation of insolation over the Pacific Ocean off the Sanriku coast, *J. Oceanography*, 1998, Vol. 54, pp. 457–464.
- 12. Reed R.K., On Estimating Insolation over the Ocean, J. Physical Oceanography, 1977, Vol. 7, No. 3, pp. 482–485.