

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### ТРЕНДЫ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОХОТСКОГО МОРЯ И ПРИЛЕГАЮЩИХ АКВАТОРИЙ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ 1998–2017 гг.

© 2019 г. Д. М. Ложкин<sup>1\*</sup>, Г. В. Шевченко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Сахалинский НИИ рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск

<sup>2</sup>Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск

\*E-mail: dima-lm@rambler.ru

Поступила в редакцию 05.09.2018 г.

Для Охотского моря и прилегающих к нему акваторий сформированы ряды среднемесячных значений температуры поверхности моря по спутниковым измерениям продолжительностью в 20 лет (1998–2017 гг.). В каждой пространственной ячейке размером около  $2 \times 2$  км методом наименьших квадратов определены коэффициенты линейного тренда. Такие коэффициенты были рассчитаны для каждого месяца отдельно, для среднегодовых значений, а также для средних значений температуры за сезон. Проанализирована связь этих коэффициентов с наблюдаемым в последние двадцать лет снижением ледовитости на акватории Охотского моря. Показано, что температура поверхностного слоя в данном бассейне снижается, наиболее существенно — в его северной и западной частях. Особенно ярко эта тенденция проявляется весной, что может быть обусловлено более существенным выхолаживанием вод вследствие зимней конвекции при уменьшении площади ледяного покрова.

**Ключевые слова:** температура поверхности моря, тренд, спутниковые данные, глобальное потепление, ледовитость

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019155-61>

#### ВВЕДЕНИЕ

Глобальное потепление, наблюдающееся на Земле в последние десятилетия, наиболее ярко выражается в повышении зимних температур атмосферного воздуха в северных районах, в частности, в Сибири, на Аляске, северо-западной Канаде (Blenden et al., 2018). Следствием этого процесса является существенное снижение ледовитости (площади акватории, покрытой льдом) Северного Ледовитого океана (Jeffries et al., 2013). Снижение ледовитости наблюдается с 1995 г. и на акватории Охотского моря (Пищальник и др., 2016). Это снижение обусловлено тем же процессом повышения зимних температур в Арктике, так как именно влияние холодных воздушных масс, приносимых на его акваторию характерными для зимнего муссона ветрами северного и северо-западного румбов, определяет условия льдообразования в данном бассейне. Ранее было высказано предположение, что во втором десятилетии XXI в. процесс льдообразования усилится (Хен и др., 2004), однако по данным JMA ([www.data.jma.go.jp](http://www.data.jma.go.jp) (дата обращения 29 августа 2018 г.)) тенденция на снижение ледовитости сохраняется до сих пор.

Существует распространенное мнение, что снижение ледовитости Охотского моря обусловлено глобальным потеплением, выраженным в повышении температуры его вод. Однако изменение площади акватории, покрытой льдом, может быть вызвано иными причинами, в частности упомянутым выше потеплением зим в Сибири и снижением интенсивности зимнего муссона (Глебова и др., 2009), и повлечь весьма сложные последствия, которые могут оказывать существенное влияние на условия обитания промысловых рыб (в частности, тихоокеанских лососей) и иных гидробионтов. При уменьшении площади ледяного покрова в море в большей степени может развиваться зимняя конвекция, следовательно, зимнее охлаждение будет охватывать большую, чем при его наличии, толщу воды. Начиная с 1980-х годов, зафиксировано снижение зимней и весенней температуры поверхности Охотского моря (Хен и др., 2008), что согласуется с этой гипотезой. Изменение температуры поверхности океана, отражающей теплосодержание квазиоднородного поверхностного слоя моря (в большинстве районов Охотского моря его толщина составляет от 12 до 20 м (Гидрометеорология..., 1998)), способно оказать

значимое влияние на вариации климата всего Дальневосточного региона. Данное обстоятельство побуждает детально исследовать влияние данного фактора, имеющего существенное значение для рыбохозяйственной науки.

В Сахалинском НИИ рыбного хозяйства и океанографии в 1997 г. была установлена приемная спутниковая антенна, предназначенная для получения данных по термическим условиям и ледовой обстановке Охотского моря и прилегающих акваторий (северной части Японского моря и северо-западной части Тихого океана). К настоящему времени накоплен 20-летний ряд наблюдений, что позволяет исследовать характерные изменения термического режима (температурные тренды) как в целом по всему году, так и в отдельные сезоны, в бассейне, имеющем важное рыбохозяйственное значение.

### ИНФОРМАЦИОННАЯ БАЗА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Уверенный прием спутниковой информации о температуре поверхностного слоя моря, получаемой с помощью приемной спутниковой станции TeraScan (<http://www.seaspace.com>), обеспечен для района с 42° по 60° северной широты и с 135° по 160° восточной долготы. В базе спутниковых данных института накапливаются значения температуры поверхности моря, полученные со спутников серии *NOAA*, *METOP*, *AQUA* и *TERRA* (данные принимаются в видимом и инфракрасном диапазоне, после чего с помощью ПО TeraScan вычленяются отдельные продукты — ТПО, облачность, ледовитость и др.) в квадратах с пространственным разрешением около 2 км, хотя максимальное разрешение спутников *AQUA* и *TERRA* на отдельных каналах достигает 250 м (более подробное описание приведено в (Новиненко, Шевченко, 2007)). Далее они осредняются посуточно (в сутки обычно около 10 пролетов различных спутников), после чего рассчитываются среднедекадные и среднемесячные значения.

Для каждого квадрата строился ряд средних месячных значений, для существенной части акватории имелись пропуски в зимний период из-за влияния ледяного покрова. По 20-летнему ряду данных для каждого месяца по-отдельности, для всего ряда в целом, а также для средних значений температуры за сезон для каждой пространственной ячейки (матрицы 1000 × 1022) методом наименьших квадратов рассчитывались параметры линейного тренда. Близкая методика была применена для расчета трендов температуры по месяцам

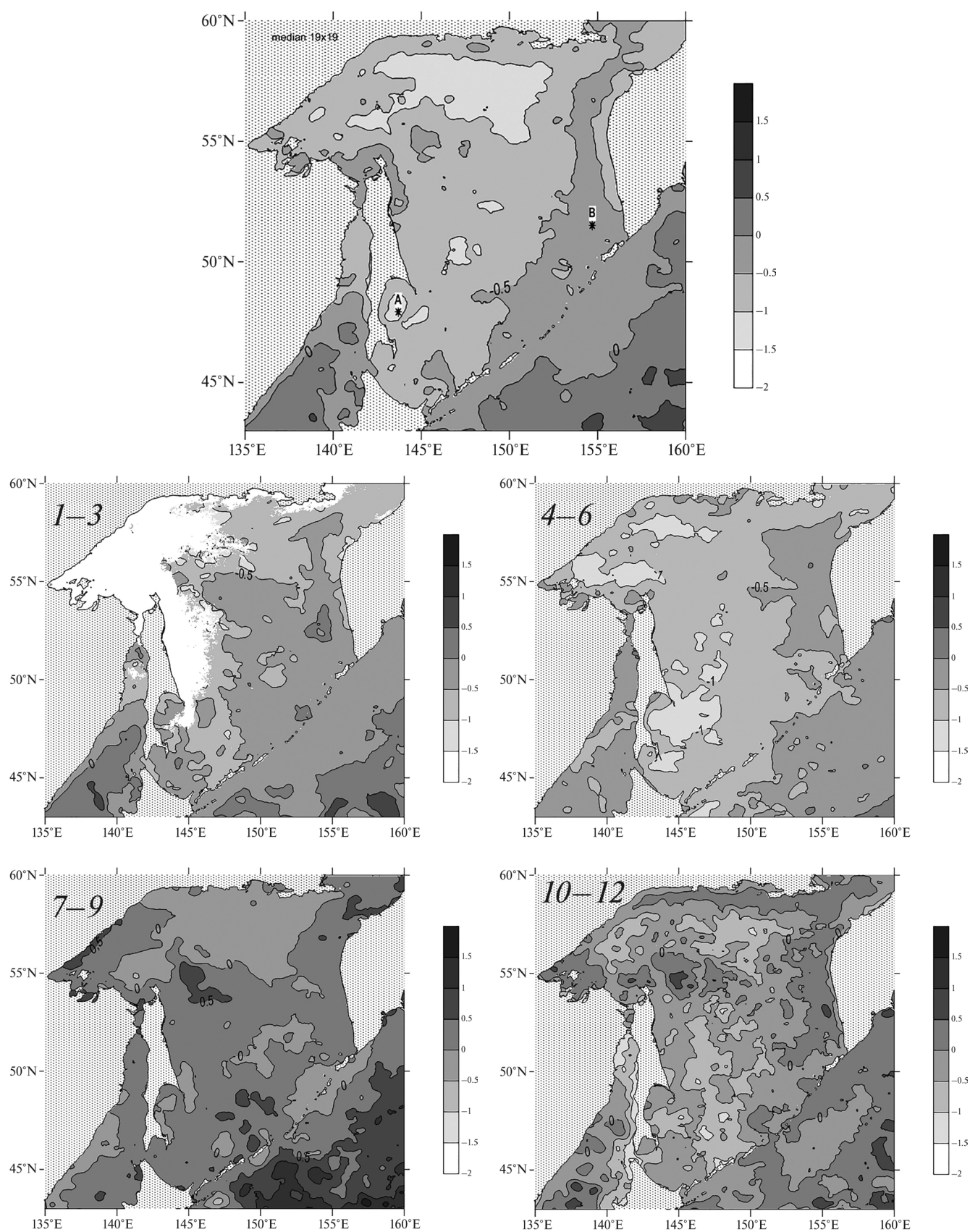
в нескольких одноградусных областях Японского моря, одной в Охотском и двух в районе Курильской гряды на основе массива спутниковых данных Рейнольдса-Смита за период 1982–2007 гг. (Шатилина и др., 2012).

Пример такого расчета приведен на рис. 2 для точек А и В, отмеченных звездочкой на рис. 1. В зимний период (на отрицательной фазе сезонного хода) наблюдаются пропуски данных, которые, скорее всего, на расчете характеристик тренда сказываются незначительно. Показатель статистической значимости тренда (отражающий вклад тренда в общую дисперсию изучаемого параметра) рассчитывался для различных районов по среднегодовым значениям, его значения колебались в пределах от 0.2 до 0.8 (в среднем по Охотскому морю — в интервале 0.4–0.5).

С целью автоматизации вычислительного процесса, была разработана специальная программа, которая считывает значения из исходных файлов, производит вычисления коэффициентов и выводит данные в файл, а также на экран. Так как даже в рядах среднемесячных значений существуют пропуски данных (это связано, в основном, с влиянием ледяного покрова в зимние месяцы), было решено установить пороговое значение в 7 точек. Если количество значений в данной пространственной ячейке было ниже порогового значения, расчет тренда не производился.

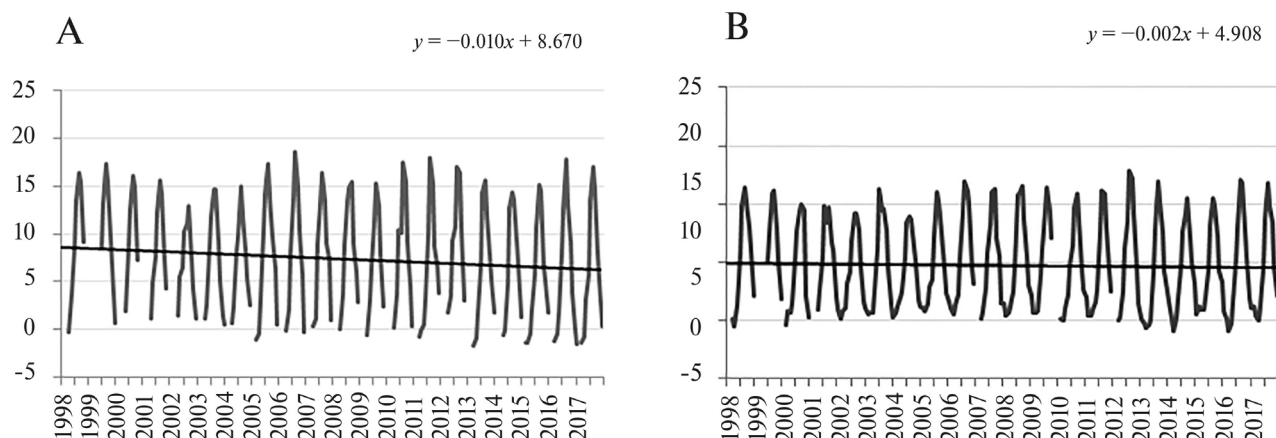
Величина скорости изменения температуры (умноженная на 10 и характеризующая, соответственно, прирост температуры за 10 лет) в каждой пространственной ячейке использовались для построения карты, характеризующей динамику термического режима в поверхностном слое в последнее двадцатилетие. Карта строилась в виде изолиний коэффициента линейного тренда, его знак и величина характеризовались цветом закрашки соответствующей области. Перед нанесением изолиний, пространственные распределения были обработаны медианным фильтром 19 × 19.

Аналогичным образом рассчитывались скорости изменения температуры для каждого месяца отдельно и для различных сезонов года. При расчете среднего значения изучаемого параметра за сезон учитывалось то обстоятельство, что гидрологические сезоны в Охотском море сдвинуты по отношению к календарным на месяц — так, март в гораздо большей степени зимний месяц (на него приходится максимум ледовитости), чем декабрь (Гидрометеорология..., 1998). Таким образом, средняя зимняя температура рассчитывалась по периоду январь–март, весенняя — апрель–июнь, летняя — июль–сентябрь, осенняя — октябрь–декабрь.



**Рис. 1.** Распределение коэффициентов линейного тренда по ряду среднегодовых (сверху) и среднесезонных значений: (1–3 – зима; 4–6 – весна; 7–9 – лето и 10–12 – осень). Шкала соответствует °C за 10 лет.





**Рис. 2.** Пример графиков хода среднемесячной температуры, а также линейных трендов в точках А и В. В правом верхнем углу — уравнение тренда, коэффициент при  $x$  соответствует изменению температуры в  $^{\circ}\text{C}$  за один месяц.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Коэффициенты линейного тренда, рассчитанные по полным годовым рядам, в изучаемом регионе имеют в основном отрицательный знак, а на акватории Охотского моря нет областей с положительными значениями (рис. 1). Значимое охлаждение поверхностного слоя (около  $1.5^{\circ}\text{C}$  за 10 лет) отмечено в северной и западной частях моря, наиболее ярко этот процесс проявляется в северной части моря, на некотором удалении от берега. Менее выраженное снижение (скорость около  $0.5^{\circ}\text{C}$  за 10 лет) наблюдается в районе Курильских островов и в полосе вдоль западного берега Камчатки за пределами зоны шельфа, а также в зоне влияния стока реки Амур (Амурский лиман, Сахалинский залив, северная часть северо-восточного шельфа о. Сахалин).

Значимое снижение (более  $0.5^{\circ}\text{C}$  за 10 лет) обнаружено в северной части Татарского пролива, далее на юг скорость охлаждения поверхностных вод уменьшается, а южнее  $45^{\circ}$  с.ш. зафиксировано слабое повышение температуры поверхностных вод Японского моря. Более ярко процесс потепления проявляется в северо-западной части Тихого океана, в юго-восточной части изучаемого региона.

Рассмотрим теперь результаты расчета параметров линейного тренда по различным сезонам. Зимой в северо-западной части моря («охо-томорском холодильнике»), а также на северном шельфе моря и северо-восточном шельфе о. Сахалин данных недостаточно для надежного расчета. На многих участках акватории, в которых существенно влияние ледяного покрова, расчет недостаточно надежен, тем не менее, некоторое

представление о тенденциях в термическом режиме в холодный период можно получить.

На всей акватории Охотского моря, в особенности в северной и западной его частях, а также в Татарском проливе Японского моря и в прилегающих к Курильским островам районах Тихого океана отмечена тенденция к снижению температуры поверхностного слоя вод. Противоположные знаки тренда зафиксированы только на юго-востоке изучаемого района, в Тихом океане, в северной части Японского моря и на самом юге Татарского пролива, к югу от  $47^{\circ}$  с.ш.

Наиболее выражено снижение температуры поверхностного слоя вод в весенний период. Оно охватывает весь рассматриваемый регион, включая северо-западную часть Тихого океана, но особенно значимо в северной и западной частях Охотского моря (скорости снижения от 1 до  $1.5^{\circ}\text{C}$  за 10 лет, на некоторых участках даже более высокие). Охлаждение поверхностного слоя весной является наиболее логичным следствием снижения ледовитости, так как при отсутствии ледяного покрова процессы выхолаживания охватывают слой вод больше толщины, чем при его наличии. Несомненно, это оказывает значительное влияние на климат региона, и прежде всего на погодные условия о. Сахалин, который испытывает воздействие данного процесса в наибольшей степени.

При расчете трендов температуры поверхности моря по отдельным месяцам было получено, что наиболее интенсивное охлаждение наблюдается в мае, и прежде всего в северо-западной части Охотского моря и вдоль всего восточного побережья о. Сахалин от м. Елизаветы на севере до м. Анива на юге. Исключение составляют западная часть Амурского лимана, на которую

приходится основная часть вод Амурского полноводья и акватория, прилегающая к Тауйской губе. Очевидно, что гидрологический режим прибрежных районов, испытывающих влияние речного стока, отличается от характерного для Охотского моря в целом.

Летом в регионе преобладает тенденция к росту температуры поверхности моря, наиболее выражена она в северо-западной части Тихого океана. В Охотском море она отмечена в северо-западной его части, в районе Шантарских островов, в Сахалинском заливе и Амурском лимане, к востоку от северной оконечности о. Сахалин, у северо-западного берега полуострова Камчатка и в районе островов Уруп и Симушир.

В северной части моря, вблизи Курильских островов, у юго-восточного берега о. Сахалин и вдоль побережья Приморья в Японском море сохраняется тренд на понижение температуры, хотя и в более умеренной форме, чем весной.

Причем в июле в изучаемом районе еще преобладает тенденция к снижению температуры поверхности моря, тенденция изменяется только в северо-западной части Тихого океана. В августе в этих районах скорость потепления достигает наибольших значений (около 1.5 °C за 10 лет), рост температуры отмечен в центральной части Охотского моря, вдоль западного побережья Камчатки и у юго-восточного побережья Сахалина, в Татарском проливе и Амурском лимане. В северной части моря, на северо-восточном шельфе Сахалина и в прикурильском районе сохраняется тренд на понижение температуры морской воды.

В сентябре, наоборот, интенсивность потепления в Тихом океане снижается, наибольшая скорость потепления отмечена в северной и северо-западной части моря (особенно выделяется зона шельфа на участке между населенными пунктами Аян и Охотск).

Несколько размытая картина наблюдается осенью. На большей части Охотского моря преобладают сравнительно небольшие по величине отрицательные тренды, положительные (также незначительные) отмечены в восточной части моря на западном шельфе Камчатки и сравнительно узкой полосой вдоль северного побережья. Меньшие по величине области отмечены также в районе Шантарских островов и банки Кашеварова, в юго-западной части анализируемой акватории Японского моря.

Наиболее высокие скорости понижения температуры поверхностного слоя отмечены в Татарском проливе, в его северной части и вдоль западного побережья Сахалина. В Охотском

море — в северной его части, за пределами шельфа, у юго-восточного берега о. Сахалин, а также в полосе между 145 и 150 меридианами от островов Уруп и Итуруп до банки Кашеварова.

При расчете по отдельным месяцам выявлено, что в октябре в изучаемом регионе в целом преобладали положительные тренды, картина сменялась на противоположную в ноябре и декабре.

В работе (Шатилина и др., 2012) для области в Охотском море и в районе Курильской гряды для весенних месяцев также были отмечены отрицательные тренды, наибольшие положительные были зафиксированы в октябре. Определенное сходство результатов весьма интересно, если учитывать различия в исследуемых периодах времени и пространственных характеристиках областей, для которых рассчитывались тренды. В Японском море отрицательных трендов в указанной работе выявлено не было.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного анализа данных о температуре поверхности Охотского моря за двадцатилетний период (1998–2017 гг.) выявлено, что результатом глобального изменения климата в данном бассейне, помимо уменьшения ледовитости, является снижение температуры верхнего слоя вод в зимне-весенний период. Особенно велики отрицательные тренды температуры весной в северной и западной частях изучаемого региона, а также в Татарском проливе Японского моря (от 0.5 до 1.5 °C за 10 лет). Именно такое влияние уменьшение площади ледяного покрова, как по времени, так и по пространству выглядит наиболее логично и может быть объяснено увеличением глубины зимней конвекции. Преобладание снижения температуры поверхности моря, хотя и менее выраженное, отмечено также зимой и осенью, и в целом по всему году.

Летом в регионе преобладает тенденция к росту температуры поверхности моря, наиболее выражена она в северо-западной части Тихого океана. В Охотском море она отмечена в северо-западной его части, к востоку от северной оконечности о. Сахалин, у северо-западного берега полуострова Камчатка и в некоторых других районах. Причем в июле главную роль играют еще процессы охлаждения поверхностного слоя, изменение тенденции происходит в августе и проявляется в сентябре–октябре.

Выявленные процессы играют существенную роль в вариациях климата охотоморского региона, в особенности понижение температуры

морской воды заметно в прибрежных водах о. Сахалин. Помимо погодных условий, полученные результаты важны для изучения условий обитания промысловых видов рыб и беспозвоночных в бассейне, имеющем большое рыбохозяйственное значение.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. IX. Охотское море. СПб.: Гидрометеоздат, 1998. Вып. 1: Гидрометеорологические условия. 342 с.

Глебова С.Ю., Устинова Е.И., Сорокин Ю.Д. Долгопериодные тенденции в ходе атмосферных процессов и термического режима дальневосточных морей за последний 30-летний период // Известия ТИНРО. 2009. Т. 159. С. 285–298.

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.

Пищальник В.М., Романюк В.А., Минервин И.Г., Батухтина А.С. Анализ динамики аномалий ледовитости Охотского моря в период с 1988 по 2015 гг. // Известия ТИНРО. 2016. Т. 185. С. 1–12.

Хен Г.В. и др. Гидрологические условия северо-западной части Тихого океана и дальневосточных морей в начале XXI века и ожидаемые тенденции // Вопросы промысловой океанологии. 2004. Вып. 1. С. 40–58.

Хен Г.В. и др. Термические условия на поверхности Берингова и Охотского морей в начале 21-го века на фоне полувековой изменчивости // Известия ТИНРО. 2008. Т. 153. С. 254–263.

Шатилина Т.А., Цициашвили Г.Ш., Радченкова Т.В. Оценка статистической значимости изменчивости температуры воды в Японском море и северо-западной части Тихого океана в 1982–2007 гг. // Ресурсы колючего краба, перспективы использования и условия обитания в Охотском море: Труды Сахалинского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. Южно-Сахалинск: СахНИРО, 2011. Т. 12. С. 180–190.

Blunden J., Arndt D.S., Hartfield G. State of the Climate in 2017 // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2018. V. 99. № 8. Si–S332. doi:10.1175/2018BAMSStateoftheClimate.1

Jeffries M.O., Overland J.E., Perovich D.K. The Arctic shifts to a new normal // Physics today. 2013. V. 66. № 10. P. 35–40. doi:10.1063/PT.3.2147

[https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/english/seaice\\_okhotsk/series\\_okhotsk\\_e.html](https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/english/seaice_okhotsk/series_okhotsk_e.html)

## Trends in Sea Surface Temperature of the Sea of Okhotsk and Adjacent Water Areas by Satellite Data in 1998–2017

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

<sup>1</sup> Sakhalin Scientific Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk

<sup>2</sup> Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk

\*E-mail: dima-lm@rambler.ru

For the Sea of Okhotsk and the adjacent water areas, a series of mean monthly sea surface temperature values were computed from satellite measurements of 20 years (1998–2017). In each space cell, the coefficients of the linear trend are determined by the method of least squares. Such coefficients were calculated for each month separately, for the whole series as a whole, and also for average values of the temperature for the season. The relationship of these coefficients to the observed decrease in ice extent in the water area of the Sea of Okhotsk during the last twenty years has been analyzed. It is shown that the heat content of the surface layer in this basin decreases, most significantly in its northern and western parts. This trend is especially pronounced in the spring, which may be due to a decrease in ice cover and a more significant cooling of the waters due to winter convection.

**Keywords:** sea surface temperature, trend, satellite data, global warming, ice cover

## REFERENCES

Blunden J., Arndt D.S., Hartfield G. State of the Climate in 2017 // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2018. V. 99. № 8. Si–S332. doi:10.1175/2018BAMSStateoftheClimate.1

Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey [Hydro-meteorology and hydrochemistry of the seas] T. IX. Okhotskoye more. SPb.: Gidrometeoizdat, 1998. Vyp. 1: Gidrometeorologicheskiye usloviya. 342 s. (In Russian).

Glebova S. Yu., Ustinova Ye.I., Sorokin Yu.D. Dolgo-periodnyye tendentsii v khode atmosferykh protsessov i termicheskogo rezhima dal'nevostochnykh morey za posledniy 30-letniy period [Long-term trends in the course of atmospheric processes and the thermal regime of the Far Eastern seas over the last 30-year period] // Izvestiya TINRO. 2009. T. 159. S. 285–298. (In Russian).

[https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/english/seaice\\_okhotsk/series\\_okhotsk\\_e.html](https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/english/seaice_okhotsk/series_okhotsk_e.html)

- Jeffries M.O., Overland J.E., Perovich D.K.* The Arctic shifts to a new normal // *Physics today*. 2013. V. 66. № 10. P. 35–40. doi:10.1063/PT.3.2147
- Novinenko Ye.G., Shevchenko G.V.* Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' temperatury poverkhnosti Okhotskogo morya po sputnikovym dannym [Spatio-temporal variability of the surface temperature of the Sea of Okhotsk using satellite data] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2007. № 5. S. 50–60. (In Russian).
- Khen G.V. i dr.* Gidrologicheskiye usloviya severo-zapadnoy chasti Tikhogo okeana i dal'nevostochnykh morey v nachale XXI veka i ozhidayemye tendentsii [The hydrological conditions of the north-western part of the Pacific Ocean and the Far Eastern seas at the beginning of the XXI century and the expected trends] // *Voprosy promyslovoy okeanologii*. 2004. Vyp. 1. S. 40–58. (In Russian).
- Khen G.V. i dr.* Termicheskiye usloviya na poverkhnosti Beringova i Okhotskogo morey v nachale 21-go veka na fone poluvekovoy izmenchivosti [Thermal conditions on the surface of the Bering Sea and the Sea of Okhotsk at the beginning of the 21st century against the background of half a century variability] // *Izvestiya TINRO*. 2008. T. 153. S. 254–263. (In Russian).
- Pishchal'nik V.M., Romanyuk V.A., Minervin I.G., Batukhtina A.S.* Analiz dinamiki anomalii ledovitosti Okhotskogo morya v period s 1988 po 2015 gg. [Analysis of the dynamics of the ice cover anomalies of the Sea of Okhotsk in the period from 1988 to 2015] // *Izvestiya TINRO*. 2016. T.185. S. 1–12. (In Russian).
- Shatilina T.A. Tsitsiashvili G.SH., Radchenkova T.V.* Otsenka statisticheskoy znachimosti izmenchivosti temperatury vody v Yaponskom more i severo-zapadnoy chasti Tikhogo okeana v 1982–2007 gg. [An assessment of the statistical significance of water temperature variability in the Sea of Japan and the North-West Pacific in 1982–2007] // *Resursy kolyuchego kraba, perspektivy ispol'zovaniya i usloviya obitaniya v Okhotskom more: Trudy Sakhalinskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta rybnogo khozyaystva i okeanografii. Yuzhno-Sakhalinsk: SakhNIRO*, 2011. T. 12. S. 180–190. (In Russian).