

Сезонная изменчивость суточного хода температуры поверхностного слоя Черного моря по данным сканера *SEVIRI*

В. А. Рубакина*, А. А. Кубряков, С. В. Станичный

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: valenru93@mail.ru*

Поступила в редакцию 23.07.2018 г., после доработки – 08.10.2018 г.

Введение. Суточные изменения температуры поверхности моря влияют на тепло- и газообмен океана с атмосферой, стратификацию и вертикальное перемешивание в верхнем слое.

Материалы и методы. Используются данные сканера *SEVIRI* за 2015 г. о температуре поверхностного слоя Черного моря с дискретностью 1 ч.

Анализ результатов. Прогрев верхнего слоя наблюдается с 6:00 до максимума температуры в 17:00, а охлаждение – с 19:00 до минимума в 5:00 следующего утра. Наибольшие средние суточные отклонения температуры поверхности моря от среднемесячных значений наблюдались в весенне-летний период ($\pm 0,8^\circ\text{C}$), наименьшие – в осенне-зимний ($\pm 0,1-0,2^\circ\text{C}$). В отдельных областях амплитуда суточного хода температуры поверхности моря превышала 5°C и достигала экстремально высоких значений $7-7,2^\circ\text{C}$. Эти интенсивные события дневного прогрева связаны со штилевыми условиями, которые наиболее часто наблюдаются в мае. Наибольшие амплитуды суточного хода температуры наблюдаются в юго-восточном районе и в прибрежной части юго-западного района Черного моря. Такое пространственное распределение связано с присутствием зоны ветровой тени, которую формируют Кавказские и Понтийские горы.

Обсуждение и заключение. В представленной работе на основе высокочастотных измерений радиометра *SEVIRI* изучены особенности пространственной и сезонной изменчивости суточного хода температуры поверхности Черного моря и ее связь с ветровыми характеристиками в различные сезоны.

Ключевые слова: температура поверхностного слоя моря, *SEVIRI*, амплитуда суточного хода, дневной прогрев.

Благодарности: определение особенностей сезонной изменчивости суточного хода ТПМ выполнено при поддержке гранта РФФИ 17-05-41102 РГО_а. Изучение связи суточного хода ТПМ и ветровых характеристик выполнено при поддержке гранта РФФИ 16-35-60036 мол_а_дк. Анализ и обработка данных выполнены в рамках государственного задания по темам № 0827-2018-0002, 0827-2019-0002.

Для цитирования: Рубакина В. А., Кубряков А. А., Станичный С. В. Сезонная изменчивость суточного хода температуры поверхностного слоя Черного моря по данным сканера *SEVIRI* // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 2. С. 171–184. doi: 10.22449/0233-7584-2019-2-171-184

Seasonal Variability of the Diurnal Cycle of the Black Sea Surface Temperature from the SEVIRI Satellite Measurements

V. A. Rubakina*, A. A. Kubryakov, S. V. Stanichny

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

**e-mail: valenru93@mail.ru*

Introduction. Heat and gas exchange between the ocean and the atmosphere, and stratification and vertical mixing in the sea upper layer are subjected to the diurnal variations of the sea surface temperature.

Data and methods. The data obtained by the scanner SEVIRI in 2015 (time resolution is 1 hour) are used to study seasonal and spatial variability of the sea surface temperature diurnal cycle in the Black Sea.

Results. During a day, the upper layer heats from 6:00 to 17:00 (the highest temperature) and then cools from 19:00 to 5:00 (the next morning) up to its minimum. The largest diurnal deviations of the sea surface temperature from the average seasonal ones are observed in spring-summer ($\pm 0.8^\circ\text{C}$), whereas the lowest deviations are typical of the autumn-winter period ($\pm 0.1\text{--}0.2^\circ\text{C}$). A few cases when the diurnal heating is high were detected and analyzed. In some regions, the amplitude of the sea surface temperature diurnal cycle exceeded 5°C and reached its extreme values $7\text{--}7.2^\circ\text{C}$. The low wind speed (less than 4 m/s) is an important reason of these extreme events. The most often intensive diurnal heating is due to the low wind conditions which are highly frequently observed in May. In winter the values of the sea surface temperature diurnal amplitude are minimum and do not exceed 1.5°C . Since April, they sharply increase and reach their maximum 2.4°C in May. The most significant sea surface temperature diurnal amplitude is observed in the Black Sea southeast region and in its southwest coastal part. Such spatial distribution is a result of the wind shadow zone which is formed by the Caucasian and Pontic mountains.

Discussion and conclusion. The features of spatial and seasonal variability of the Black Sea surface temperature diurnal cycle, and its relation to the wind characteristics in different seasons are studied based on the SEVIRI scanner high-frequency measurements.

Keywords: sea surface temperature, SEVIRI, amplitude of diurnal variation, diurnal heating.

Acknowledgments: the features of seasonal variability of the SST diurnal variation are determined at support of the RFBR grant No. 17-05-41102 RGO_a. Relation between the SST diurnal variation and the wind characteristics is studied at support of the RFBR grant No. 16-35-60036 mol_a_dk. The data are analyzed and processed within the state task on the themes No. 0827-2018-0002, No. 827-2019-0002.

For citation: Rubakina, V.A., Kubryakov, A.A. and Stanichny, S.V., 2019. Seasonal Variability of the Diurnal Cycle of the Black Sea Surface Temperature from the SEVIRI Satellite Measurements. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, [e-journal] 35(2), pp. 171-184. doi:10.22449/0233-7584-2019-2-171-184 (in Russian).

Введение

Важнейшей характеристикой состояния всего Мирового океана, и Черного моря в частности, является температура поверхностного слоя океана/моря (ТПМ), которая влияет на климат и функционирование экосистемы планеты. Повышение ТПМ может привести к более частому возникновению тропических циклонов, ураганов и тайфунов, их усилению и в результате – увеличению причиняемого ими ущерба [1]. Суточный ход ТПМ вызывает бризовые ветры, которые могут значительно влиять на процессы обмена в прибрежной зоне Черного моря [2, 3]. Этот параметр непосредственно используется в расчетах турбулентного теплообмена между океаном и атмосферой [4]. ТПМ значительно влияет на точность восстановления параметров океана и атмо-

сферы (скорость ветра, соленость, содержание водяного пара и т. п.) по спутниковым измерениям в микроволновом диапазоне [5–7]. Все это обуславливает необходимость в постоянном мониторинге ТПМ, ее суточных и сезонных изменений.

Суточный цикл ТПМ определяется совместным действием трех факторов: солнечной радиации, турбулентного перемешивания и динамики теплообмена между океаном и атмосферой. В течение дня в условиях чистого неба и слабого ветра температура приповерхностных вод повышается за счет поглощения поступающего коротковолнового солнечного излучения, вследствие чего может возникать значительный вертикальный температурный градиент. В ночное время конвективное перемешивание разрушает суточный термоклин [8].

Так как поглощение солнечного тепла наиболее интенсивно на поверхности, максимальное увеличение температуры наблюдается в границах тонкого приповерхностного слоя (на глубине ~ 0,5–1 м). Однако ветровое перемешивание может распространять поглощенное тепло ниже, в толщу вод. Таким образом, слой прогрева может расширяться в глубину до 10–20 м [8].

Величина амплитуды суточного хода ТПМ зависит от облачного покрова, обуславливающего количество падающей солнечной радиации, а также от ветрового перемешивания. При незначительной облачности и достаточно слабом ветре в отдельных областях при наблюдениях *in situ* был зафиксирован перепад ТПМ на 5°C на глубине от 0,3–0,6 [8] до 7 м [9]. Летом из-за интенсивной солнечной радиации и слабого ветра суточные колебания температуры на поверхности больше, чем в зимние месяцы*.

С возникновением спутниковых средств дистанционного зондирования Земли на геостационарной орбите появилась возможность получать информацию о параметрах океана и атмосферы на планетарных масштабах с очень высокой временной дискретностью – от 5 мин. Эти данные позволили впервые проанализировать процессы изменчивости облачности, температуры и других параметров на временных масштабах от нескольких минут до суток.

В настоящее время одним из лучших приборов для определения ТПМ с дискретностью 15 мин является сканер *SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager)*, устанавливаемый на геостационарных метеорологических спутниках *MSG (Meteosat Second Generation)* [4]. *SEVIRI* имеет относительно высокое пространственное разрешение (от 4 до 6 км). Такие параметры прибора позволяют эффективно использовать его данные для изучения циклического процесса дневного прогрева [9–12]. Например, по данным этого сканера в работе [13] проведен анализ особенностей суточного хода ТПМ для Атлантического океана и ряда европейских морей.

С использованием данных *SEVIRI*, дрейфтеров, а также численного моделирования в работе [4] проведено подробное исследование ТПМ (суточный ход, дневной прогрев, случаи экстремального дневного прогрева) для Средиземного моря за 2013 г. Произведена оценка теплового баланса Средиземного моря, а также проанализированы сезонные и суточные колебания теплового баланса.

* Давыдов Л. К., Дмитриева А. А., Конкина Н. Г. Общая гидрология. Л. : Гидрометеоздат, 1973. URL: http://elibrshu.ru/files_books/pdf/img-216094822.pdf (дата обращения: 15.11.2018).

Отмечено, что дневной прогрев с амплитудой более 1°C характерен для всего бассейна Средиземного моря. Случаи экстремального дневного прогрева чаще всего фиксировались летом, при этом максимальное их количество приходилось на июль. Максимальная амплитуда суточного хода в таких случаях превышала 5°C. Выявлена также корреляция поля ветра с величиной амплитуды суточного хода ТПМ. Отмечено, что случаи дневного прогрева наблюдались также зимой, весной и осенью, но с более низкой периодичностью.

Однако потенциальная возможность применения сканера *SEVIRI* для анализа суточного хода ТПМ в Черном море использована лишь в одной работе [14]. В ней разработана методика уменьшения средней ошибки восстановления полей ТПМ на основе данных спутникового сенсора *SEVIRI* для Черноморского региона. Суточный ход ТПМ имеет выраженную сезонную изменчивость, которая связана с сезонным ходом потоков тепла и скорости ветра.

Некоторые результаты настоящей работы были представлены в докладе на Девятой международной Школе-семинаре: «Спутниковые методы и системы исследования Земли», которая проходила в г. Тарусе, 12–16 апреля 2018 г. *.

Цель данной работы – исследование суточной динамики хода ТПМ Черного моря в различные сезоны и анализ ее пространственных особенностей по данным сканера *SEVIRI*.

Использованные данные

В работе использовались данные сканера *SEVIRI* за 2015 г. о ТПМ с дискретностью в 1 ч и пространственным разрешением 5 км. Так как температура, измеряемая в ИК-диапазоне, формируется в тонком слое (~ 0,1 мм), то ТПМ, измеряемая сканером, является температурой скин-слоя [14, 15]. Данные получены из архива *OSI SAF EUMETSAT* (<http://www.osi-saf.org/>). На основе сравнения данных, полученных сенсором *SEVIRI*, и измерений *in situ* свободно дрейфующими буями (дрифтерами) в работе [14] даны оценки точности измерений. Среднеквадратическое отклонение разности этих температур составило 0,45 К.

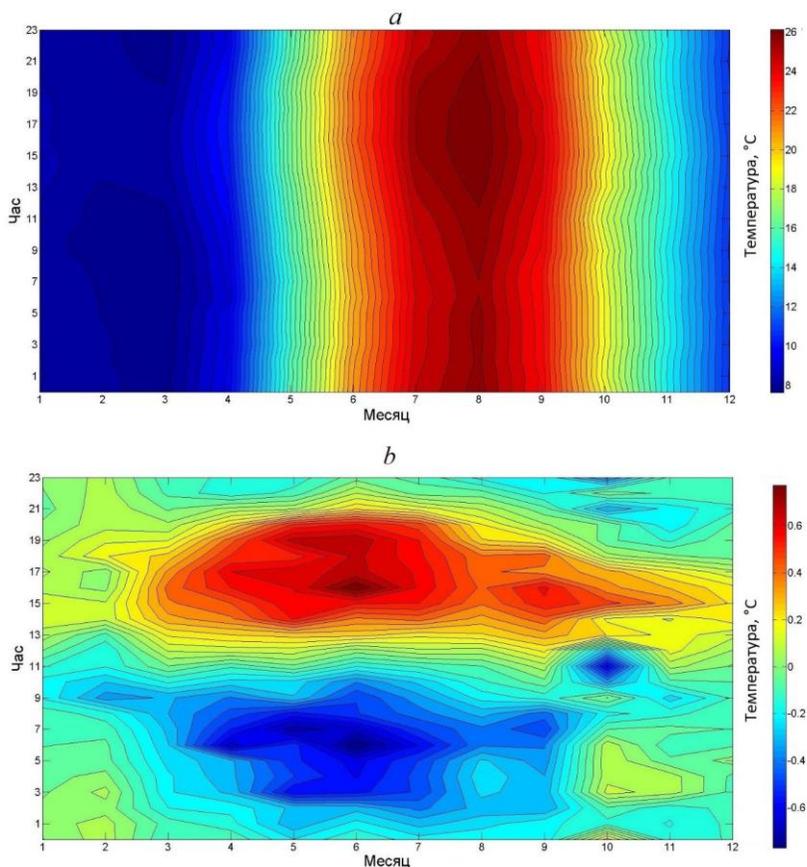
Для анализа поля ветра использовались данные реанализа *Era-Interim* о скорости ветра на высоте 10 м с дискретностью 6 ч и пространственным разрешением 0,75° [16], полученные из архива *ECMWF* (<https://www.ecmwf.int/>). В работе [17] показано, что данные *Era-Interim* достаточно хорошо согласуются с контактными измерениями.

Результаты и анализ

1. Средний суточный ход ТПМ в Черном море и его сезонная динамика

Для анализа сезонной динамики среднего суточного хода ТПМ рассчитано распределение средней по бассейну ТПМ в зависимости от времени суток и месяца (рис. 1, а). Для этого сначала вычислялась средняя по бассейну ТПМ для каждого момента времени. Далее находилось среднее значение за определенный час суток каждого месяца. По полученному массиву построена диаграмма (рис. 1, а).

* URL: http://d33.infospace.ru/d33_conf/tarusa2018/05.pdf (date of access: 20.01.2019).



Р и с. 1. Диаграмма распределения (по данным *SEVIRI* за 2015 г.): *a* – средней по бассейну ТПМ; *b* – отклонений ТПМ от среднесезонных значений

F i g. 1. Diagram of distribution of: *a* – average over the basin SST; *b* – SST deviations from the average seasonal ones on month and local time based on the *SEVIRI* data

Как видно из рис. 1, *a*, доминирующий вклад в изменчивость ТПМ вносит сезонный ход. Максимальная температура наблюдается в июле – августе 2015 г., когда она достигает значения 28°C . При этом видно, что наибольшие значения фиксируются в августе во второй половине дня (15:00–19:00 местного времени), а наименьшие — в феврале – марте в первой половине дня (с 3:00 до 5:00).

Для того чтобы выделить суточный ход температуры, значения среднего сезонного хода ТПМ были вычтены из массива данных, рассчитанных для построения диаграммы на рис. 1, *a*. На полученной таким образом диаграмме аномалий ТПМ (рис. 1, *b*) хорошо видно, что суточный ход оказывает значительное влияние на изменчивость ТПМ и имеет выраженную сезонную динамику.

Максимальные отрицательные аномалии ТПМ приходятся на время с 5:00 до 7:00, а максимальные положительные – с 15:00 до 19:00. Таким образом, прогрев верхнего слоя в среднем наблюдается с 6:00 до 17:00, а охлаждение – с 19:00 до 5:00 следующего утра. Наибольшие отклонения ТПМ от среднесе-

зонных значений отмечаются в весенне-летний период (с апреля по июль), при этом наибольшие аномалии приходятся на июль. Максимальные (по модулю) значения аномалий составляют $0,82^{\circ}\text{C}$ в сторону увеличения температуры и $0,77^{\circ}\text{C}$ – в сторону уменьшения. Минимальные аномалии наблюдаются с середины ноября по март и не превышают (по модулю) $0,1-0,2^{\circ}\text{C}$.

На рис. 2 представлено пространственное распределение средней за июль ТПМ, измерившейся в 7:00 (рис. 2, *a*) и 17:00 (рис 2, *b*) локального времени, а также карта разности температуры (рис. 2, *c*). Данные карты наглядно демонстрируют пространственную изменчивость суточного хода температуры. В 7:00 ТПМ ниже, а в 17:00 выше средних значений за месяц. Разница между значениями температуры в 17:00 и 7:00 достигает $3,5-4^{\circ}\text{C}$ на отдельных участках Черного моря (юго-восточный район Черноморского бассейна).

Наибольшие области прогрева расположены в Азовском море и в юго-восточной части Черноморского бассейна. Небольшая глубина Азовского моря способствует его быстрому прогреву. На юго-востоке Черного моря наблюдаются минимальные значения скорости ветра, что объясняется блокировкой воздушных масс высокими Кавказскими горами. В целом для июня прогрев на 1°C и выше характерен почти для всей акватории Черноморского бассейна. Минимальная разница температур (менее $0,2^{\circ}\text{C}$) отмечается лишь для небольших по площади участков в основном в прибрежной зоне, в частности в районе Южного берега Крыма. Это может быть связано с локальными особенностями динамики прибрежной зоны, например бризовыми эффектами и/или влиянием апвеллингов.

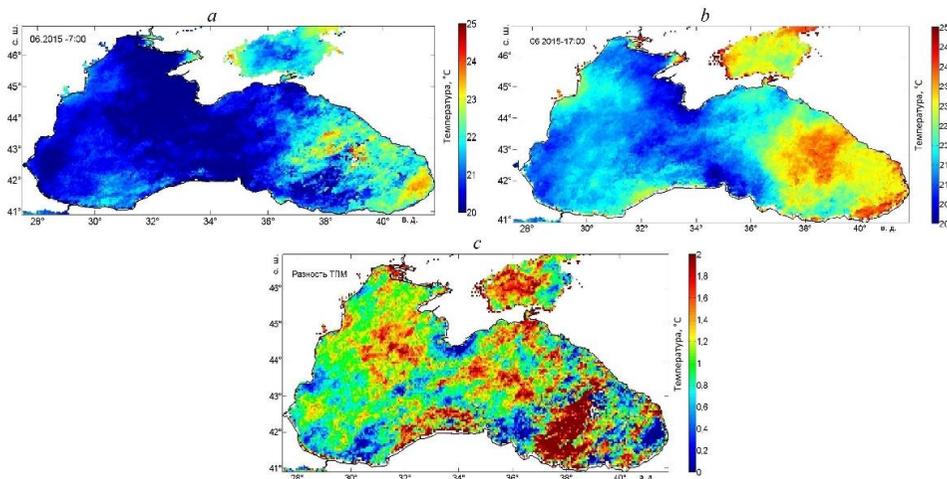


Рис. 2. Карты распределения в июне 2015 г. средней ТПМ в 7:00 (*a*), в 17:00 (*b*); карта разности средней ТПМ в 17:00 и 7:00 локального времени (*c*)

Fig. 2. Spatial distribution (June, 2015) of the average SST at 7:00 (*a*), at 17:00 (*b*); difference of the SST average values at 17:00 and 7:00, local time (*c*)

2. Амплитуда суточного хода ТПМ в Черном море

Приведенные выше оценки касаются среднего суточного хода ТПМ, который определяется прежде всего суточными вариациями солнечной коротковолновой радиации. Еще одним важным фактором, который значительно

влияет на высокочастотные изменения ТПМ, является ветер. В периоды штиля под действием солнечной радиации толщина верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) значительно уменьшается, что приводит к росту ТПМ [9]. При возникновении ветрового перемешивания ВКС увеличивается, и для его прогрева требуется большее количество тепла.

Случай сильного дневного прогрева, связанный со штилевыми условиями, наблюдался 11 мая 2015 г.

На рис. 3, *a* и *b* представлено пространственное распределение ТПМ в 3:00 и 16:00 (локального времени) 11 мая 2015 г. В 3:00 ТПМ в большей части моря не превышает 13°C. В отдельных районах западной и юго-западной части Черного моря, а также в восточной части Азовского бассейна ТПМ более высокая – от 14,5 до 15,9°C. На дневной карте в 16:00 ТПМ значительно выше. Она превышает 16°C на всей площади бассейна, за исключением прибрежных районов Крыма и юго-западной части Черного моря. В этих районах ТПМ также увеличивается, однако ее значения несколько меньше (13,6–14,5°C).

Для расчета амплитуды суточного хода (*A*) по данным *SEVIRI* в каждой точке, где были доступны спутниковые измерения ТПМ, определялись ее максимальное и минимальное значения за сутки и их разность – амплитуда суточного хода температуры.

11 мая 2015 г. *A* принимает значения более 2°C на большей части бассейна, а в отдельных областях превышает 5°C (рис. 3, *c*).

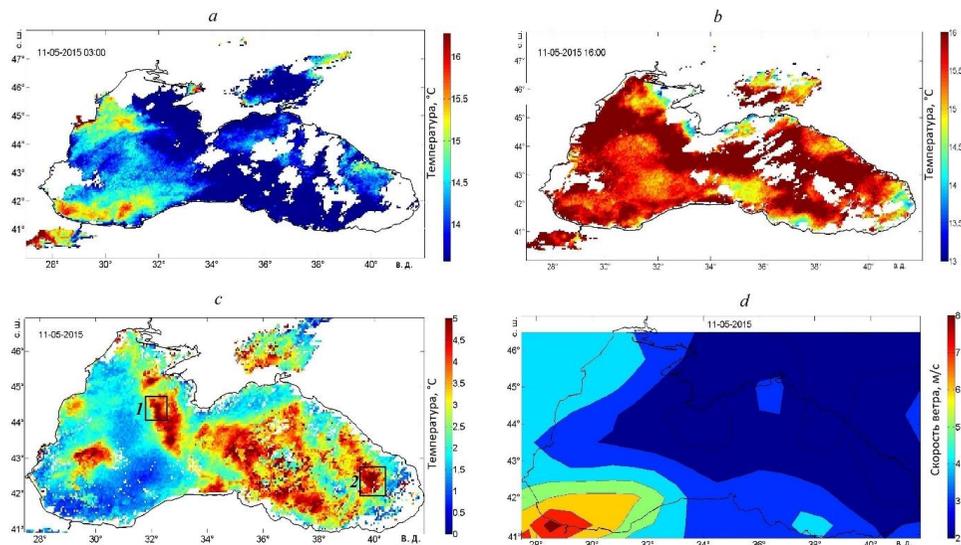


Рис. 3. Карта распределения за 11.05.2015 г.: *a* – ТПМ (°C) в 3:00; *b* – ТПМ (°C) в 16:00; *c* – амплитуды суточного хода ТПМ (°C); *d* – среднего значения модуля скорости ветра (м/с). Прямоугольниками выделены области, в которых выбраны точки 1 (31,8–32,1° в. д., 44–44,2° с. ш.) и 2 (39,5–40° в. д., 42,1–42,5° с. ш.) для анализа

Fig. 3. Spatial distribution (11.05.2015) of: *a* – SST (°C) at 3.00 h.; *b* – SST (°C) at 16.00 h.; *c* – amplitude of the SST diurnal cycle (°C); *d* – mean value of the wind speed module (m/s). The rectangles denote the areas within which the points intended for analysis are chosen

Из рис. 4, *a* видно, что 11 мая 2015 г. средняя по площади ТПМ с 00:00 до 6:00 почти не изменяется, с 6:00 до 9:00 начинает плавно увеличиваться. С 9:00 до 14:00 происходит наиболее резкий прогрев, когда ТПМ растет от 14,3 до 15,8°C. С 14:00 до 16:00 ч. этот показатель практически не изменяется, далее происходит его снижение до 14,7°C.

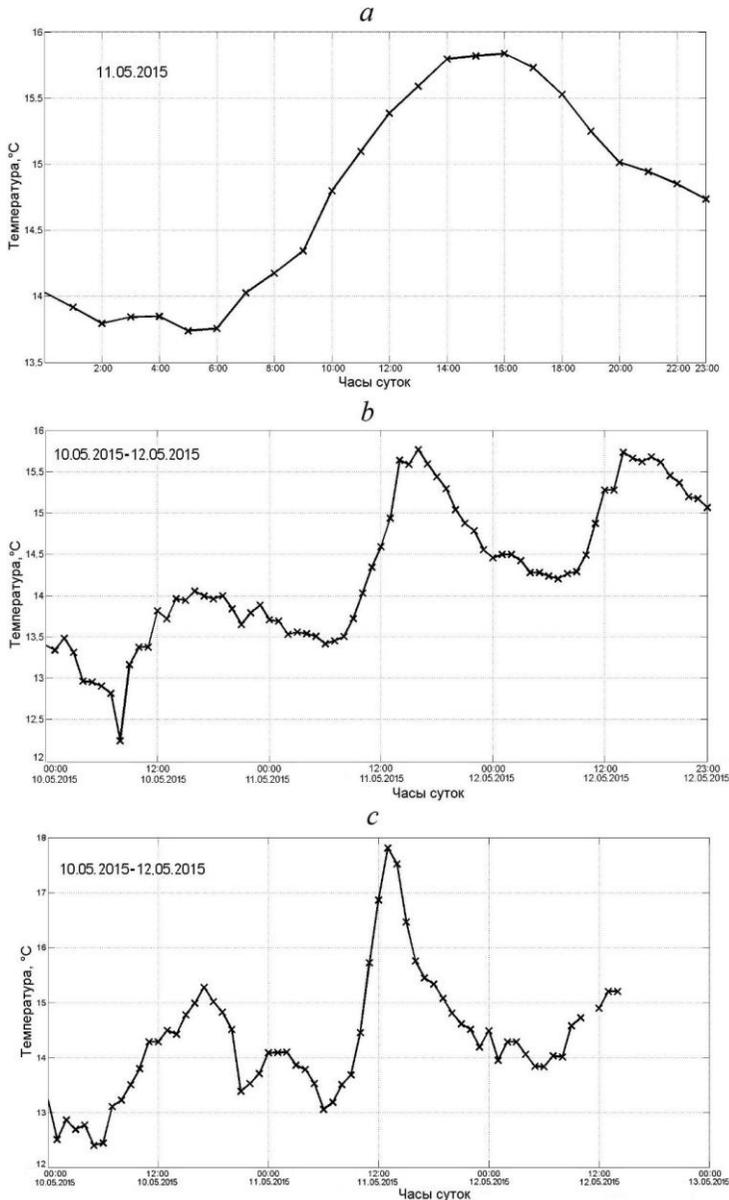


Рис. 4. Графики изменения: *a* – средней по площади ТПМ Черного моря 11.05.2015 г.; *b* – средней ТПМ для области 1 с 10.05.2015 г. по 12.05.2015 г. (см. рис. 3, *c*); *c* – средней ТПМ для области 2 с 10.05.2015 г. по 12.05.2015 г.

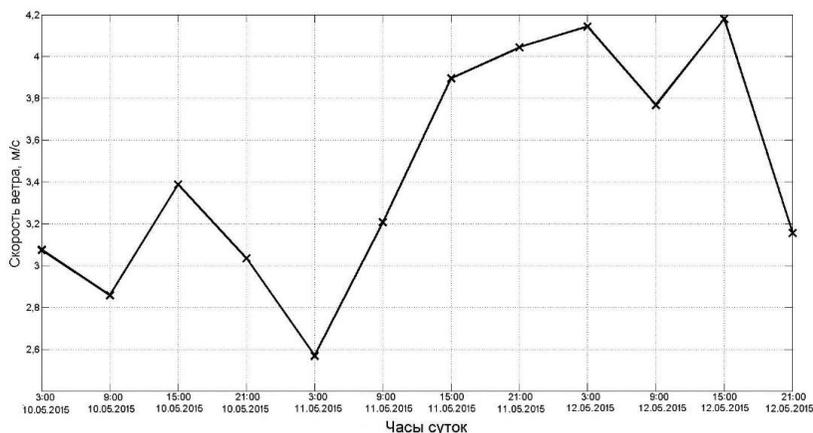
Fig. 4. Variability of: *a* – SST average over the Black Sea area, 11.05.2015; *b* – average SST for the region 1 from 10.05.2015 to 12.05.2015 (see Fig. 3, *c*); *c* – average SST for the region 2 from 10.05.2015 to 12.05.2015

На рис. 4, *b* и *c* продемонстрированы изменения ТПМ в областях, характеризующихся наиболее высокими значениями перепада температуры (черные прямоугольники на рис. 3, *c*). Видно, что 11 мая 2015 г. происходит наиболее значительное изменение ТПМ в течение суток. В этот день наблюдается интенсивный рост ТПМ в первой половине суток и довольно резкое ее снижение во второй половине по сравнению с 10 мая 2015 г. В области 1 минимальное значение ТПМ равно 13,4°C, максимальное – 15,8°C. Амплитуда суточного хода ТПМ составила 2,4°C.

Еще более выражен дневной прогрев в области 2 (рис. 4, *c*). Резкий рост ТПМ от минимального (13°C) до максимального (17,8°C) значения наблюдается с 6:00 до 13:00, далее происходит снижение ТПМ до 14,2°C (в 23:00). Таким образом, амплитуда суточного хода ТПМ в этой точке достигает 4,8°C.

Отметим, что в некоторых точках бассейна 11 мая 2015 г. амплитуда суточного хода достигает экстремально высоких значений и составляет 7–7,2°C. Столь же высокие значения зафиксированы и в районе Атлантического океана в предыдущих работах, в частности в работе [9]. Такой сильный суточный прогрев может существенно изменять потоки тепла между океаном и атмосферой. Это, в свою очередь, может значительно влиять на качество воспроизведения атмосферной циркуляции в численных моделях. Кроме того, увеличение ТПМ способно стать причиной уменьшения потоков кислорода в толщу вод, что негативно отражается на развитии экосистемы.

Причиной таких резких перепадов ТПМ послужили штилевые условия, которые отмечались над Черным морем с 10 по 12 мая 2015 г. Как видно из рис. 5, средняя скорость ветра над Черным морем в этот период не превышала 4 м/с. Наименьшие значения скорости ветра (< 3,4 м/с) отмечаются с 00:00 10 мая до 12:00 11 мая по локальному времени. При этом минимальные скорости ветра, соответствующие штилевым условиям (~ 2,5 м/с), наблюдаются непосредственно перед началом наиболее интенсивного роста ТПМ 11 мая в 3:00 локального времени.



Р и с. 5. График изменения средней по бассейну скорости ветра для Черного моря с 10.05.2015 г. по 12.05.2015 г.

F i g. 5. Wind speed variation averaged over the Black Sea basin from 10.05.2015 to 12.05.2015

На рис. 3, *d* представлена карта среднего значения модуля скорости 11 мая 2015 г. Над большей частью Черного моря скорость ветра очень низкая и не превышает 3 м/с. Исключение составляет юго-западный район, где скорость ветра достигает 6–8 м/с. В этом районе амплитуда суточного хода небольшая (рис. 3, *c*) и не превышает 1,5°C. Над восточной частью моря скорость ветра наименьшая (< 2 м/с). Эта область совпадает с наиболее высокими значениями *A*, которые также наблюдаются на востоке моря. Таким образом, основной причиной высоких суточных перепадов ТПМ и особенностей их пространственного распределения в этом случае служит изменчивость скорости ветра.

В течение 2015 г. несколько раз зафиксированы подобные высокие значения суточного изменения ТПМ: 26 февраля; 11 апреля; 11, 14, 17, 18, 25 мая; 1, 13 июня; 8, 24 июля, а также 4 сентября.

Анализ изменчивости ТПМ за выбранные даты показал, что в дни максимального прогрева скорость ветра не превышала 3–4 м/с. При этом наиболее часто максимальные перепады ТПМ наблюдались в юго-восточном районе бассейна. В этой части Черного моря скорости ветра в среднем минимальны из-за блокирования воздушных масс высокими Кавказскими горами на востоке и Понтийскими горами на юге [18]. Большинство из случаев максимального прогрева отмечено в мае, поскольку этот месяц характеризуется наиболее низкими скоростями ветра [19].

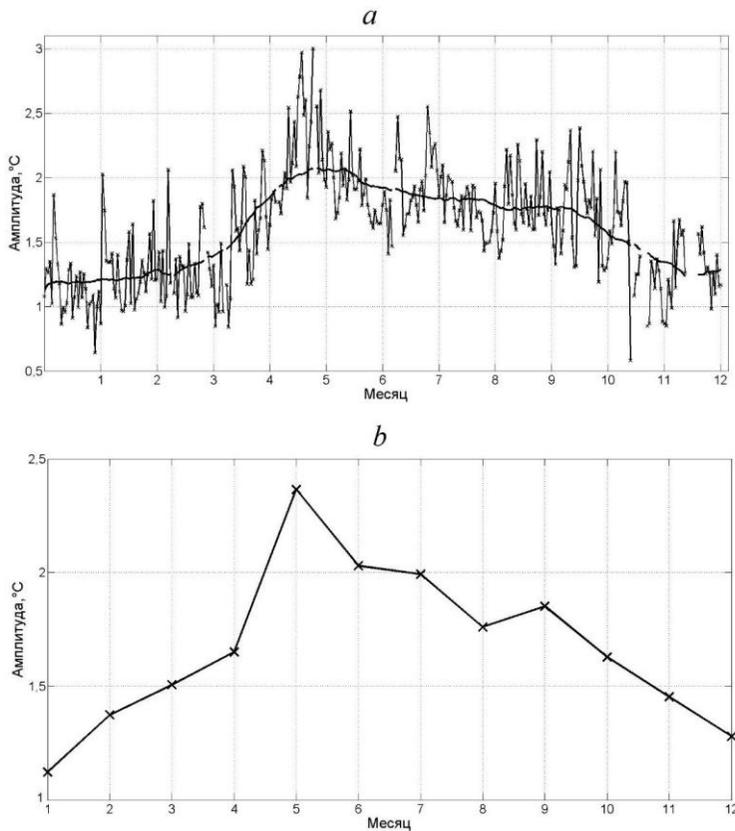
Отметим, что не только штилевые условия, но и штормовые ветры также приводят к резким изменениям поверхностной температуры. Ветровое турбулентное перемешивание, особенно сопровождающееся циклонической завихренностью, вызывает резкое увеличение глубины ВКС и вертикальное вовлечение глубинных холодных вод. Эти эффекты способны приводить к уменьшению температуры Черного моря на величину порядка 10°C [20–22]. Например, в работе [23] показано, что мощный квазитропический циклон в сентябре 2005 г. вызвал снижение ТПМ в центральной части моря с 20 до 8°C.

В отличие от коротковолновой радиации скорость ветра имеет существенную синоптическую и высокочастотную изменчивость. Фазы наступления максимума и минимума скорости ветра в течение суток могут быть различны. Поэтому значения амплитуды суточного хода ТПМ *A* будут отличаться от значений среднего суточного хода ТПМ, представленного в предыдущем разделе настоящей работы.

На рис. 6, *a* представлена рассчитанная временная изменчивость средней по площади бассейна *A* за 2015 г. Наиболее высокие значения наблюдаются в апреле – мае, когда они часто превышают 2,5°C и достигают 3°C. В эти месяцы действие крупномасштабных центров атмосферного давления – Азорского минимума и Сибирского максимума – на Черное море минимально и скорость ветра в среднем не превышает 5–6 м/с, а значит эффект дневного прогрева будет максимален. Также ряд высоких значений *A* наблюдается в июне и июле, достигая 2,5°C. Минимальные значения *A* приходятся на январь (0,64°C) и ноябрь (0,58°C).

Сезонная изменчивость амплитуды суточного хода ТПМ представлена на рис. 6, *b*. С января по апрель наблюдается плавное возрастание амплитуды суточного хода. Зимой ее значения минимальны и не превышают 1,5°C. Да-

лее происходит резкое увеличение A до максимального значения $2,4^{\circ}\text{C}$ в мае, после чего она плавно снижается. Летом A принимает значения $1,7\text{--}2^{\circ}\text{C}$. Осенью происходит ее дальнейшее снижение с $1,85^{\circ}\text{C}$ в сентябре до $1,45^{\circ}\text{C}$ в ноябре.

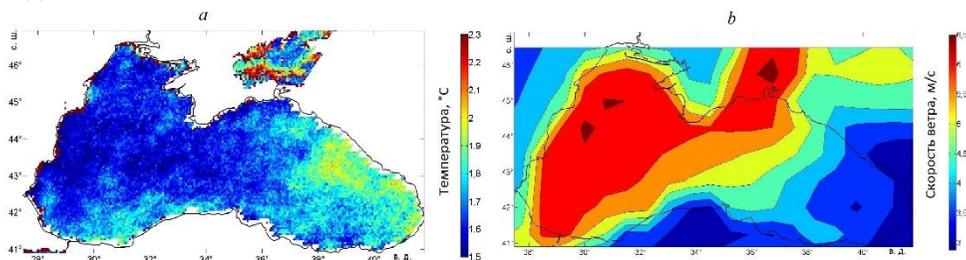


Р и с. 6. Графики изменчивости амплитуды суточного хода ТПМ A за 2015 г., сглаженной скользящим средним с окном 30 дней (*a*), изменения средней за месяц амплитуды суточного хода ТПМ в 2015 г. (*b*)

F i g. 6. Graph of variability of the SST diurnal cycle amplitude A for 2015 smoothed by the moving average with a window length 30 days (*a*), variations of the monthly average amplitude of the SST diurnal cycle for 2015 (*b*)

Карта на рис. 7, *a* демонстрирует наличие пространственных особенностей в распределении амплитуды суточного хода. Наибольший перепад ТПМ (т. е. прогрев) наблюдается в юго-восточном районе и в прибрежной части юго-западного района Черного моря. Наименьшие значения A свойственны его центральной и западной части. Такая пространственная изменчивость связана прежде всего с распределением поля скорости ветра (рис. 7, *b*), которое, в свою очередь, зависит от рельефа суши, окружающей Черное море. Повышенные значения амплитуды суточного хода располагаются в зонах ветровой тени. В прибрежных районах юго-восточной части моря высокие Кавказские горы блокируют ветры восточных и северо-восточных румбов,

Понтийские горы на юге блокируют южные ветры. Таким образом, здесь находится обширная зона ветровой тени. Прибрежная юго-западная часть моря также защищена от действия сильных северо-восточных ветров Понтийскими горами на центральном Анатолийском побережье. А западная и северная части моря подвержены действию интенсивных северо-восточных и северных ветров, что приводит к уменьшению штилевых условий и суточного хода ТПМ.



Р и с. 7. Карта распределения: *a* – средней за год амплитуды суточного хода ТПМ ($^{\circ}\text{C}$); *b* – среднего за год модуля скорости ветра (m/s)

Fig. 7. Spatial distribution of: *a* – annual average amplitude of the SST diurnal cycle ($^{\circ}\text{C}$); *b* – annual average wind speed module (m/s)

Заклучение

В настоящей работе на основе высокочастотных измерений радиометра *SEVIRI* с дискретностью 1 ч исследовались особенности пространственной и сезонной изменчивости суточного хода ТПМ и ее связь с ветровыми характеристиками. Получены следующие результаты.

1. Наибольшие суточные отклонения ТПМ от среднесезонных значений наблюдаются в весенне-летний период (с апреля по июль), наименьшие – в осенне-зимний период (ноябрь – март). Максимальные по модулю значения аномалий ТПМ ($0,82^{\circ}\text{C}$ в сторону увеличения температуры и $0,77^{\circ}\text{C}$ в сторону уменьшения) отмечаются в июне. Минимальные аномалии наблюдаются с середины ноября по март и не превышают по модулю $0,1-0,2^{\circ}\text{C}$. В течение суток прогрев верхнего слоя в среднем происходит с 6:00 до 17:00, а охлаждение с 19:00 до 5:00 следующего утра.

2. Рассмотрен ряд случаев интенсивного дневного прогрева. Показано, что в отдельных случаях амплитуда суточного хода ТПМ превышала 5°C и достигала экстремально высоких значений — $7-7,2^{\circ}\text{C}$. Развитию дневного прогрева способствовали штилевые условия, при которых скорость ветра не превышала 4 m/s на протяжении суток и более над основной частью акватории Черного моря. Наиболее часто интенсивный дневной прогрев наблюдался в мае, когда скорость ветра была минимальной.

3. Исследована сезонная изменчивость амплитуды суточного хода ТПМ. С января по апрель наблюдается ее плавное возрастание, зимой значения A минимальны и не превышают $1,5^{\circ}\text{C}$. С апреля происходит ее резкое увеличение до максимального значения $2,4^{\circ}\text{C}$ в мае, после чего она плавно снижается. Летом A принимает значения $1,7-2^{\circ}\text{C}$. Осенью происходит дальнейшее снижение A с $1,85^{\circ}\text{C}$ в сентябре до $1,45^{\circ}\text{C}$ в ноябре. Наибольший перепад ТПМ наблюдается в юго-восточном районе, а также в прибрежной части юго-

западного района Черного моря. Наименьшие значения A характерны для центральной и западной частей Черного моря. Повышенные значения амплитуды суточного хода располагаются в зонах ветровой тени, которую формируют Кавказские и Понтийские горы. Западная и северная части моря подвержены действию интенсивных северо-восточных и северных ветров, что приводит к уменьшению штилевых условий и суточного хода ТПМ.

Суточный ход ТПМ может существенно влиять на потоки тепла (см., например, работу [24]) и импульса, бризовую циркуляцию. В частности, дневной прогрев может значительно увеличивать потоки скрытого тепла, вызывая ошибки, которые могут превышать 10 Вт/м^2 [24]. Исследование влияния суточного хода ТПМ на процессы в атмосфере в Черноморском регионе представляет собой важную задачу, которая требует проведения целенаправленных численных экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme / E. P. Meredith [et al.] // *Nature Geoscience*. 2015. Vol. 8, no. 8. P. 615–619. doi:10.1038/ngeo2483
2. Ефимов В. В., Барабанов В. С. Бризовая циркуляция в Черноморском регионе // *Морской гидрофизический журнал*. 2009. № 5. С. 23–36. URL: http://mgfjz.ph/images/files/2009/05/200905_02.pdf (дата обращения: 15.05.2018).
3. Efimov V. V., Krupin A. V. Breeze circulation in the Black Sea region // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016. Vol. 41, iss. 4. P. 240–246. <https://doi.org/10.3103/S1068373916040026>
4. The diurnal cycle of sea-surface temperature and estimation of the heat budget of the Mediterranean Sea / S. Marullo [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2016. Vol. 121, iss. 11. P. 8351–8367. <https://doi.org/10.1002/2016JC012192>
5. Does direct impact of SST on short wind waves matter for scatterometry? / S. A. Grodsky [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2012. Vol. 39, iss. 12. P. 1–6. <https://doi.org/10.1029/2012GL052091>
6. The Aquarius salinity retrieval algorithm / T. Meissner [et al.] // 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium: Proceedings. IEEE, 2012. P. 386–388. doi:10.1109/IGARSS.2012.6351557
7. A physical retrieval of cloud liquid water over the global oceans using Special Sensor Microwave / Imager (SSM/I) observations / T. J. Greenwald [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1993. Vol. 98, iss. D10. P. 18471–18488. <https://doi.org/10.1029/93JD00339>
8. Castro S. L., Wick G. A., Buck J. J. H. Comparison of diurnal warming estimates from unpumped Argo data and SEVIRI satellite observations // *Remote Sensing of Environment*. 2014. Vol. 140. P. 789–799. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.042>
9. Gentemann C. L., Minnett P. J., Le Borgne P., Merchant C. J. Multi-satellite measurements of large diurnal warming events // *Geophysical Research Letters*. 2008. Vol. 35, iss. 22. L22602. <https://doi.org/10.1029/2008GL035730>
10. A diurnal-cycle resolving sea surface temperature product for the tropical Atlantic / S. Marullo [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2010. Vol. 115, iss. C5. C05011. <https://doi.org/10.1029/2009JC005466>
11. Diurnal warm-layer events in the western Mediterranean and European shelf seas / C. J. Merchant [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2008. Vol. 35, iss. 4. L04601. <https://doi.org/10.1029/2007GL033071>
12. An empirical model for the statistics of sea surface diurnal warming / M. J. Filipiak [et al.] // *Ocean Science*. 2012. Vol. 8, iss. 2. P. 197–209. <https://doi.org/10.5194/os-8-197-2012>

13. *Karagali I., Høyer J. L.* Characterisation and quantification of regional diurnal SST cycles from SEVIRI // *Ocean Science*. 2014. Vol. 10, iss. 5. P. 745–758. <https://doi.org/10.5194/os-10-745-2014>
14. *Акимов Е. А., Станичный С. В., Полонский А. Б.* Использование данных сканера SEVIRI для оценки температуры поверхностного слоя Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2014. № 6. С. 37–46. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22760986> (дата обращения: 15.11.2018).
15. *Saunders P. M.* The temperature at the ocean-air interface // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1967. Vol. 24, no. 3. P. 269–273. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1967\)024<0269:TTATOА>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1967)024<0269:TTATOА>2.0.CO;2)
16. The ERA Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Quarterly Journal of the royal meteorological society*. 2011. Vol. 137, iss. 656. P. 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
17. Comparing satellite and meteorological data on wind velocity over the Black Sea / *A. V. Garmashov [et al.] // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. Vol. 52, iss. 3. P. 309–316. <https://doi.org/10.1134/S000143381603004X>
18. *Efimov V. V., Anisimov A. E.* Climatic parameters of wind-field variability in the Black Sea region: Numerical reanalysis of regional atmospheric circulation // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011. Vol. 47, iss. 3. P. 350–361. <https://doi.org/10.1134/S0001433811030030>
19. Гидрометеорологические условия морей Украины. Том 2: Черное море / Ю. П. Ильин [и др.]. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 421 с. URL: <https://sogoin.ru/wp-content/files/gumt2.PDF> (дата обращения: 15.11.2018).
20. Formation of the coastal current in the Black Sea caused by spatially inhomogeneous wind forcing upon the upper quasi-homogeneous layer / *A. G. Zatsepin [et al.] // Oceanology*. 2008. Vol. 48, iss. 2. P. 159–174. <https://doi.org/10.1134/S0001437008020021>
21. *Efimov V. V., Barabanov V. S.* Anomalies of the Black Sea surface temperature and modeling of intense cold anomaly formation in September 2014 // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017. Vol. 53, iss. 3. P. 343–351. <https://doi.org/10.1134/S0001433817030057>
22. *Ефимов В. В., Комаровская О. И.* Формирование крупномасштабной холодной аномалии поверхностной температуры Черного моря по спутниковым данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14, № 7. С. 238–249. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-238-249
23. Observations of a quasi-tropical cyclone over the Black Sea / *V. V. Efimov [et al.] // Russian Meteorology and Hydrology*. 2008. Vol. 33, iss. 4. P. 233–239. <https://doi.org/10.3103/S1068373908040067>
24. *Clayson C. A., Bogdanoff A. S.* The effect of diurnal sea surface temperature warming on climatological air – sea fluxes // *Journal of Climate*. 2013. Vol. 26, no. 8. P. 2546–2556. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00062.1>

Об авторах:

Рубаккина Валентина Александровна, младший научный сотрудник, лаборатория инновационных методов и средств океанологических исследований, ФГБУН МГИ (Россия, 299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), **ORCID ID: 0000-0003-3561-5913**, valenru93@mail.ru

Кубряков Арсений Александрович, старший научный сотрудник, отдел дистанционных методов исследования, ФГБУН МГИ (Россия, 299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-3561-5913**, arskubr@mhi-ras.ru

Станичный Сергей Владимирович, старший научный сотрудник, заведующий отделом дистанционных методов исследований, ФГБУН МГИ (Россия, 299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1033-5678**, stanichny@mhi-ras.ru