

Особенности изменения температуры поверхностного слоя Азовского моря в 21 веке по спутниковым данным

С. В. Станичный¹, Н. В. Василенко¹, В. А. Рубакина¹,
А. А. Кубряков¹, В. В. Кулыгин², С. В. Бердников²

¹ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия
E-mail: sstanichny@mail.ru

² Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, 344006, Россия

Рассмотрено изменение температуры поверхностного слоя в центральной части Азовского моря и в Таганрогском заливе на основе данных сканера MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) с 2003 по 2024 г. Показаны особенности в годовом ходе температуры в указанных акваториях — при почти одинаковых амплитудах годового хода воды Таганрогского залива раньше прогреваются весной и быстрее остывают в осенний сезон. При общем прогреве вод за анализируемый период тренды для различных месяцев существенно отличаются, в апреле и ноябре величина положительного тренда достигает 0,013 °C/год, а в октябре тренд отрицательный и равен –0,05...–0,08 °C/год. На основе комплексного анализа данных сканера SEVIRI (англ. Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) рассмотрены ситуации аномального дневного прогрева с привлечением данных о скорости ветра и карт температуры сканеров AVHRR (англ. Advanced Very High Resolution Radiometer), VIIRS (англ. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) и TIRS (англ. Thermal InfraRed Sensor). В штилевых условиях амплитуда дневного прогрева может превышать 8 °C. Показано возможное влияние мутности вод и наличия цианобактерий с поглощающими в оптическом диапазоне пигментами на амплитуду суточного хода температуры.

Ключевые слова: температура поверхности моря, Азовское море, Таганрогский залив, дневной прогрев, MODIS, SEVIRI, AVHRR, спутниковые данные

Одобрена к печати: 05.11.2025
DOI: [10.21046/2070-7401-2025-22-6-326-336](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-6-326-336)

Введение

Азовское море — мелководный бассейн, гидрологические и биологические характеристики которого подвержены влиянию стока рек Дон и Кубань. Гидрометеорологический режим Азовского моря в значительной мере подвергся изменениям под влиянием климатических и антропогенных факторов, что в первую очередь проявляется в повышении температуры как воздуха, так и водной среды (Гинзбург и др., 2021; Дашкевич, 2020), а в последние годы и в росте солёности моря (Бердников и др., 2019; Спирионова, Панов, 2021). Термические условия моря являются важным параметром, определяющим состояние морских экосистем (Дашкевич, Кулыгин, 2008; Кочергин, 2018).

Под действием глобального потепления в последние годы наблюдается достаточно значимый рост средней температуры и в Азовском море (около 1 °C за 100 лет) (Бердников и др., 2019; Дашкевич, Кулыгин, 2019). Учитывая географическое положение водоёма, его морфометрию, регулярное ветровое перемешивание вод до дна, для акватории характерна значительная пространственно-временная изменчивость термических условий (Гершанович и др., 1991; Ильин и др., 2009; Иошпа и др., 2019). Характер сезонной изменчивости температуры поверхности моря (ТПМ) в Азовском море в среднем схож с Чёрным, но имеет некоторые отличия (Гинзбург и др., 2021). Более того, Таганрогский залив отличается по сезонному ходу температуры и характеристикам дневного прогрева в силу его большей мелководности и выраженному влиянию речного пресноводного стока (Григоренко и др., 2019).

Наиболее интенсивный прогрев вод наблюдается в апреле и происходит неравномерно: быстрее прогреваются прибрежные зоны (на 8–11 °C) и Таганрогский залив (до 9–11 °C), в открытом же море температура часто не достигает 7 °C (Гершанович и др., 1991; Ильин

и др., 2009; Матишов и др., 2008). В период с мая по сентябрь сохраняется устойчивая термическая стратификация вод. Максимальная температура фиксируется в июле – августе, в среднем в поверхностном слое достигает 24–25 °С и отличается малой пространственной контрастностью (Гершанович и др., 1991; Ильин и др., 2009).

На данный момент имеется большое количество работ, посвящённых исследованию термических условий в Азовском море, основанных на измерениях гидрометеостанций, а также данных, полученных в ходе экспедиций (Бердников и др., 2019; Гершанович и др., 1991; Ильин и др., 2009; Кочергин, 2018; Матишов и др., 2008). Также имеется ряд исследований изменчивости температуры поверхностного слоя на основе данных дистанционного зондирования, в том числе с сопоставлением полученных результатов с данными контактных измерений (Боровская, Панов, 2009; Гинзбург и др., 2011; Дацкевич, Кулыгин, 2019).

Спутниковые измерения позволяют исследовать изменчивость ТПМ благодаря высокому временному разрешению, полному пространственному охвату района исследования, непрерывности измерений, а также имеющемуся многолетнему архиву данных (Лаврова и др., 2011).

Цель настоящей работы заключается в исследовании изменчивости среднемесячной температуры поверхности моря в Центральной части моря и в Таганрогском заливе, а также особенностей изменения температуры в суточном цикле, в том числе при наличии цианобактерий, поглощающих во всём оптическом диапазоне, на основе спутниковых измерений в последние десятилетия.

Методы и материалы

Для исследования межгодовой и внутригодовой изменчивости ТПМ использовались среднемесячные данные сканера MODIS (*англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) Aqua за период 2003–2024 гг. с пространственным разрешением 4 км (MODISA_L3m_NSST_Monthly_4km_R2019_0_sst). Данные были получены из архива Ocean Color (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). Чтобы исключить влияние берегов и мелководья использовались данные для центральной части моря, ограниченные областью от 35,5 до 37° в. д., от 45,5 до 46,5° с. ш. для собственно моря и от 38,53 до 39,3° в. д., 46,8 до 47,2° с. ш. для Таганрогского залива.

Для детального исследования ситуаций с аномальным прогревом использовались данные ТПМ, полученные по TIRS (*англ. Thermal InfraRed Sensor*) Landsat с применением двухканального метода восстановления температуры, предложенного в работе (Алескерова и др., 2016), и имеющие пространственное разрешение 100 м. Данные были получены на портале USGS (*англ. United States Geological Survey*) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Для исследования изменения ТПМ в суточном цикле использовались данные сканера SEVIRI (*англ. Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager*) в инфракрасном диапазоне спутника Meteosat второго поколения на геостационарной орбите. Временное разрешение данных – 1 ч, пространственное разрешение – 5 км. Данные получены на портале OSI SAF (*англ. Satellite Application Facility on Ocean and Sea Ice*) (<https://osi-saf.eumetsat.int/>). Также применялись данные сканеров AVHRR (*англ. Advanced Very High Resolution Radiometer*), а также VIIRS (*англ. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) из архива отдела дистанционных методов исследования Морского гидрофизического института РАН (<https://dvs.net.ru/>).

Дополнительно привлекались спутниковые данные оптических сканеров MODIS с пространственным разрешением 1 км и MSI (*англ. Multispectral Instrument*) Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м. Данные MSI Sentinel-2 получены на портале CDSE (*англ. Copernicus Data Space Ecosystem*) (<https://dataspace.copernicus.eu/>).

Для исследования влияния ветра на суточный ход ТПМ привлекались данные о скорости ветра IKON с портала Ventusky (<https://www.ventusky.com/>).

Внутригодовая и межгодовая изменчивость температуры

Для исследования изменчивости температуры использован традиционный метод анализа временных рядов, а бассейн разделён на две акватории: центральную часть моря и Таганрогский

залив с существенными гидрологическими различиями по глубине, солёности, влиянию речного стока Дона. Эти факторы могут быть определяющими для межгодовой и внутригодовой изменчивости температуры поверхности, а также климатических трендов. На рис. 1а представлена изменчивость среднемесячных значений температуры морской поверхности для центральной части Азовского моря ($T_{\text{ц}}$, синяя линия), Таганрогского залива ($T_{\text{т}}$, красная линия) и разницы значений ТПМ для данных районов акватории (DT, зелёная линия). Сопоставление значений ТПМ показало, что межгодовая изменчивость сходная для залива и собственно моря (см. рис. 1а), при этом внутригодовой ход будет значительно отличаться (см. рис. 1б).

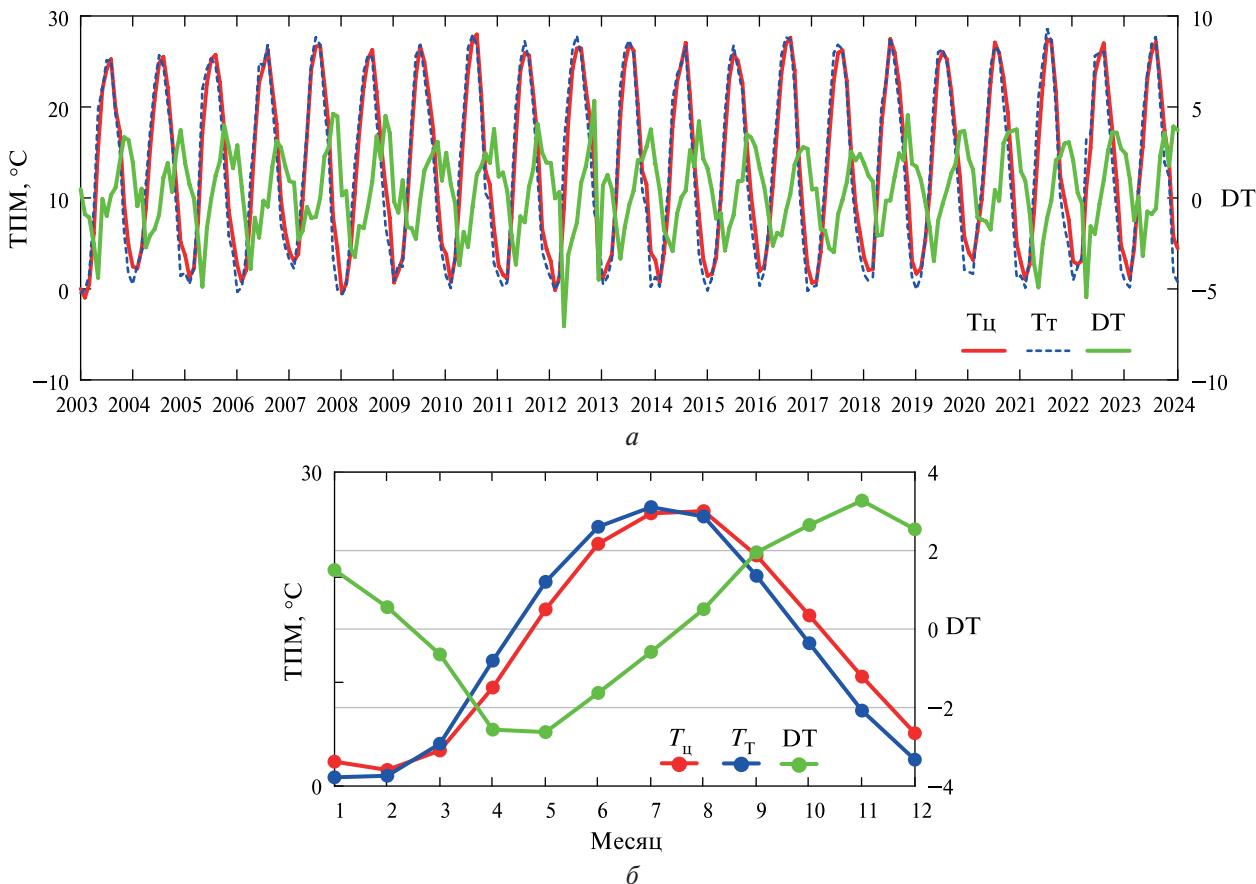


Рис. 1. Изменчивость температуры в центральной части Азовского моря и Таганрогском заливе по данным сканера MODIS Aqua: а — за период 2003–2024 гг.; б — средний годовой ход ТПМ. Синяя линия — значения для Таганрогского залива ($T_{\text{т}}$), красная — для центральной части моря ($T_{\text{ц}}$), зелёная — разница значений (DT)

Воды в Таганрогском заливе прогреваются быстрее, но и охлаждаются тоже быстрее, максимум температуры наблюдается в июле–августе, а минимум — в феврале. В апреле–мае воды залива теплее в среднем на 2,5 °C, а в ноябре холоднее на 3 °C. Отметим, что максимальные температуры достигают 26,5 °C, что превышает обнародованные ранее (Гершанович и др., 1991; Ильин и др., 2009). Полученные значения среднегодового хода отличаются от опубликованных за предыдущий период (Гинзбург и др., 2021), что, по-видимому, связано с изменением ледового режима моря и его осолонением. Отметим также, что температура за рассматриваемый период в центральной части моря растёт несколько быстрее, чем в Таганрогском заливе, — тренды соответственно 0,085 и 0,062 °C/год.

Рассчитанные значения трендов температуры (в °C/год) для каждого месяца представлены на рис. 2 (см. с. 329) (красными точками отмечены значения для центральной части Азовского моря ($T_{\text{пц}}$), синими — для Таганрогского залива ($T_{\text{пт}}$)).

Рис. 2. Рассчитанные тренды температуры ($^{\circ}\text{C}/\text{год}$) для каждого месяца по данным сканера MODIS Aqua. Красными точками отмечены значения для центральной части Азовского моря ($T_{\text{рц}}$), синими — для Таганрогского залива ($T_{\text{рТ}}$)

Как видно, максимальные положительные тренды наблюдаются в марте, апреле и ноябре, а отрицательные — в октябре.

Рассматриваемый в настоящей работе временной интервал (2003–2024) относительно небольшой, и говорить об устойчивых тенденциях сложно. Например, для ноября рост температуры в обоих районах наблюдался с 2010 г. (рис. 3), что совпадает с периодом начала интенсивного осолонения моря (Бердников и др., 2023).

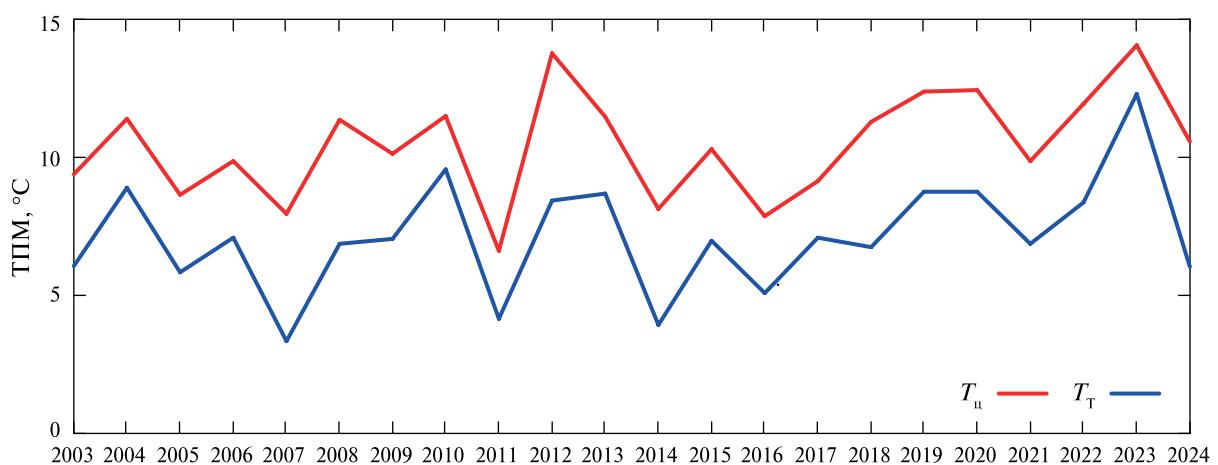
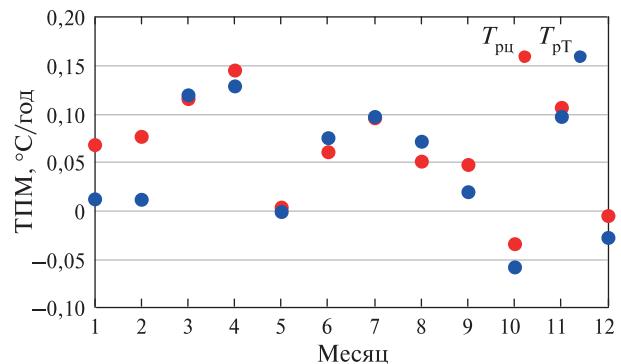


Рис. 3. Изменение средней температуры ($^{\circ}\text{C}$) для ноября по данным сканера MODIS Aqua. Красная линия — в центральной части Азовского моря ($T_{\text{рц}}$), синяя — для Таганрогского залива ($T_{\text{рТ}}$)

Аномальный прогрев

Одной из причин значительных изменений температуры поверхностного слоя является дневной прогрев, который может достигать нескольких градусов. Величина амплитуды суточного хода температуры зависит от распределения поглощённого солнечного излучения в поверхностном слое. Толщина прогретого слоя определяется характеристиками ветрового перемешивания и показателями поглощения объёма воды, изменяющимися от наличия взвешенного вещества и типа поглощающих пигментов в фитопланктоне. Для Азовского моря характерна высокая мутность вод и высокие значения концентрации взвешенного вещества в силу его мелководности и перемешивания до дна (Кушнир, 2009). Кроме того, в тёплое время года регулярно наблюдается обширное цветение фитопланктона, в особенности в Таганрогском заливе (Ковалева, 2019).

Предварительно по данным сканеров AVHRR, VIIRS и MODIS отбирались ситуации с дневным прогревом более $2-3^{\circ}\text{C}$, далее рассчитывались временные ряды по данным SEVIRI и скорость ветра по модельным данным. Дополнительно рассматривались данные о температуре высокого разрешения TIRS.

На рис. 4 (см. с. 330) представлен пример такого прогрева акватории за 9–11 июля 2014 г. Так, на вечернем снимке от 9 июля (см. рис. 4а) видно, что температура поверхности большей части моря не превышала $23,5^{\circ}\text{C}$, за исключением юго-западного района, где ТПМ достигала 25°C . Затем на утреннем снимке от 10 июля (см. рис. 4б) значения до 25°C наблюдались

по всему югу моря. Почти через 6 ч ТПМ достигла максимума и в отдельных районах превышала 28 °C (центральная и северо-восточная часть собственно моря и север Таганрогского залива на *рис. 4в*). Далее температура постепенно снижалась (см. *рис. 4—e*) до средних по акватории значений 22–24,5 °C 11 июля. Таким образом, амплитуда суточного хода температуры 10 июля достигала почти 5 °C ($A = 4,708 °C$) (см. *рис. 4ж*), что определялось слабыми ветрами со скоростью 1–4 м/с в указанный период (см. *рис. 4и*).

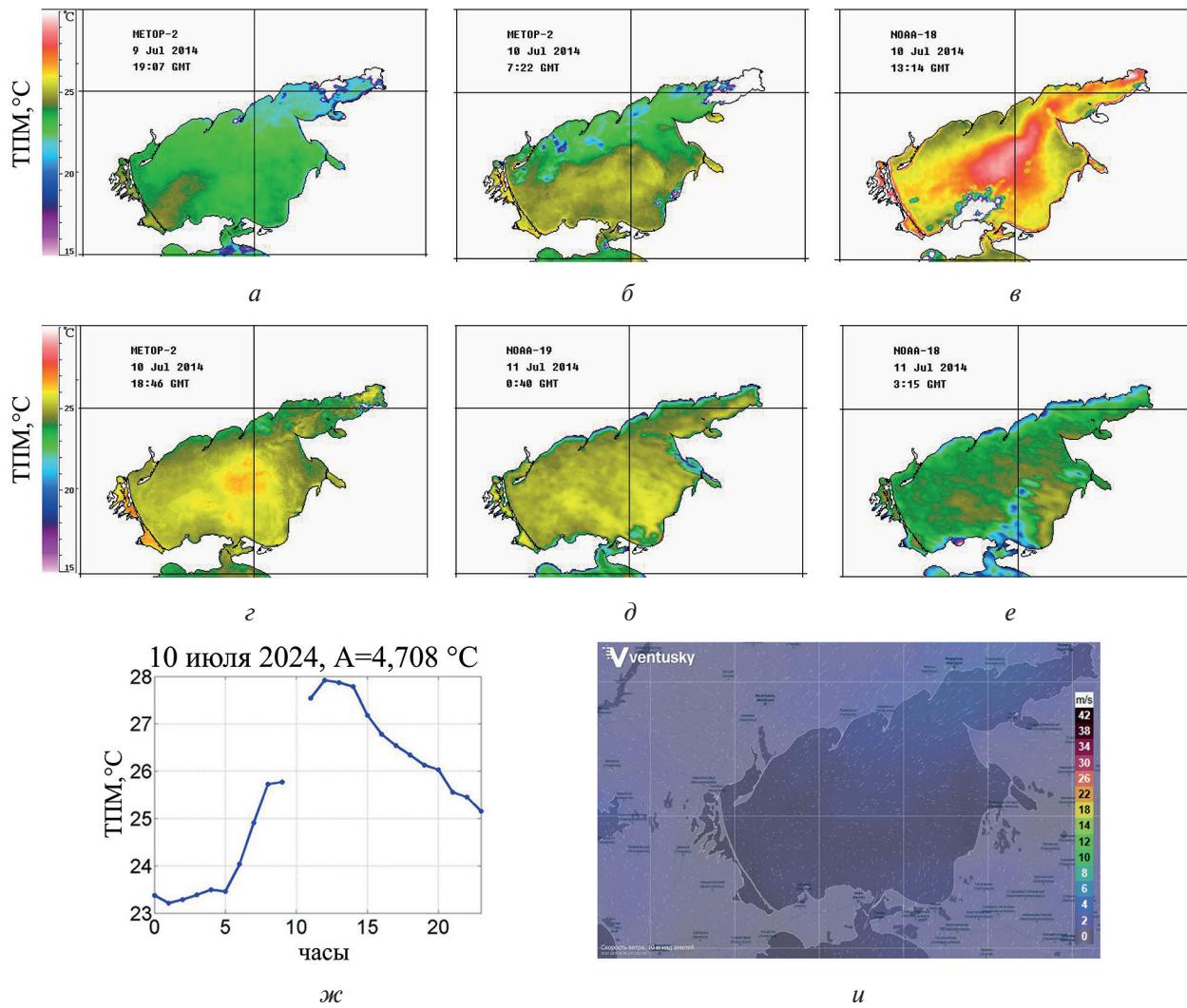


Рис. 4. Температура поверхности Азовского моря 9–11 июля 2014 г. по данным AVHRR (a–e); суточный ход ТПМ 10 июля 2014 г. по данным SEVIRI (жс); поле ветра по данным IKON (и) (<https://www.ventusky.com/>). GMT (англ. Greenwich Mean Time)

Пример сопоставления изменения температуры в суточном цикле в Таганрогском заливе и центральной части моря за 20 июня 2012 г. представлен на *рис. 5*. В этом случае помимо влияния ветровых условий на прогрев вод акватории можно отметить выраженное влияние мутности вод Таганрогского залива.

Как показано на *рис. 5а* (см. с. 331), ТПМ характеризуется значениями 23,8–24,5 °C, затем почти через 10 ч акватория прогрелась до 25–30 °C (см. *рис. 5б*), при этом амплитуда суточного хода ТПМ в центральной части ($A = 1,662 °C$) в два раза меньше, чем в Таганрогском заливе ($A = 3,13 °C$) (см. *рис. 5в, г*). В первую очередь такая разница может быть связана с различиями в скорости ветра (до 5–7 м/с над собственно Азовским морем и 2–4 м/с над Таганрогским заливом) (см. *рис. 5е*). Кроме этого, сопоставление спутнико-

вых данных о поле ТПМ (см. *рис. 5б*) и яркости восходящего излучения (*англ. Water-Leaving Radiance — WLR*) на длине волны 551 нм (см. *рис. 5д*) показало, что для районов акватории с температурой, превышающей 26,5 °C, характерны высокие значения WLR, которые соответствуют водам с большим содержанием взвешенного вещества.

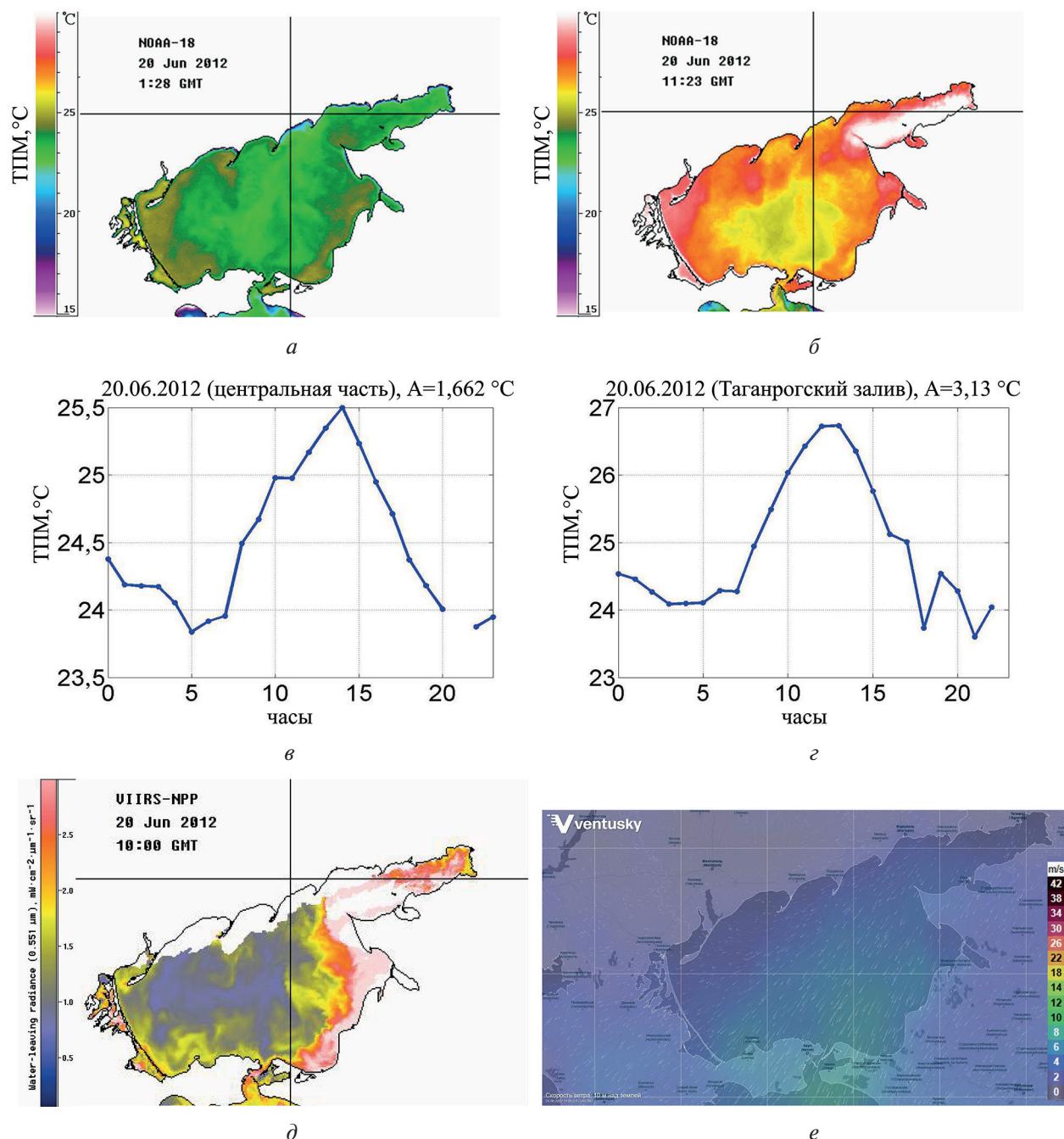


Рис. 5. Температура поверхности Азовского моря по данным AVHRR от 20 июля 2012 г.: *а* — 01:28 GMT; *б* — 11:23 GMT. Суточный ход ТПМ по данным SEVIRI: *в* — в центральной части моря; *г* — в заливе. Яркость восходящего излучения (WLR 551) (*д*) и поле ветра по данным IKON (*е*) (<https://www.ventusky.com/>)

Скорость прогрева воды определяется потоком солнечного излучения, его поглощением и перераспределением за счёт ветрового перемешивания. Чем меньше толщина слоя, в котором излучение поглощается и перераспределяется за счёт перемешивания, тем быстрее

прогрев. Максимальные значения следует ожидать при штилевых условиях и больших величинах показателя поглощения. Пример с аномальной скоростью прогрева 26 апреля 2011 г. в центральной части моря приведён на *рис. 6*. При слабых ветрах скорость прогрева достигала 1,9 °C/ч в центральной части моря, а амплитуда суточного хода — величины 8,2 °C.

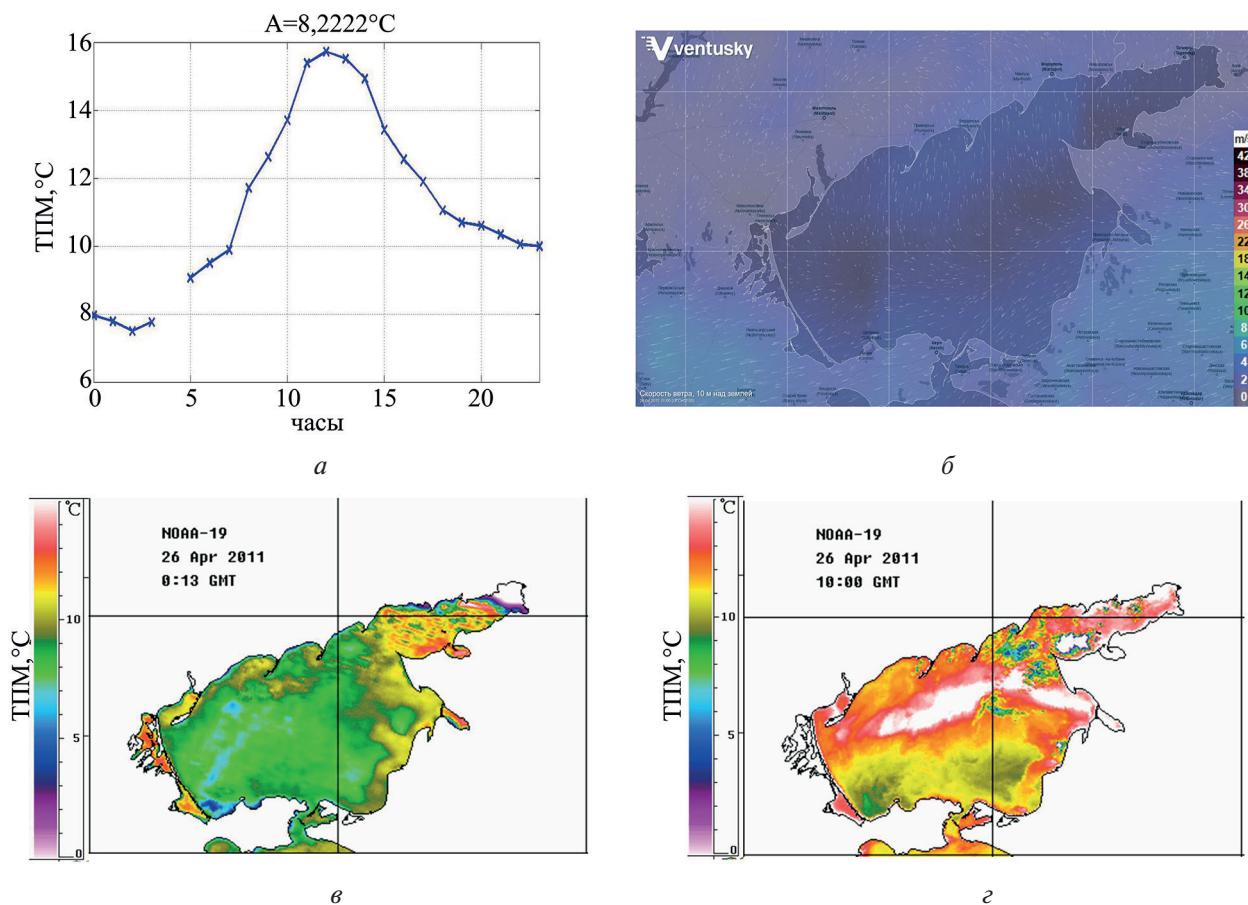


Рис. 6. Изменение ТПМ в суточном цикле по данным SEVIRI от 26.04.2011 (а); поле ветра по данным IKON (б) (<https://www.ventusky.com/>); ТПМ Азовского моря по данным AVHRR 00:13 GMT (в) и 10:00 GMT (г) 26.04.2011

Влияние развития цианобактерий на прогрев вод

Кроме минеральной взвеси и растворённых веществ на величину прогрева может влиять наличие цианобактерий типа *Anabaena* с фикоэритроцианином, поглощающим во всём видимом диапазоне (Bryant, 1982). Это приводит к тому, что большая часть излучения поглощается в достаточно тонком приповерхностном слое, а максимальный прогрев следует ожидать в зонах плавающих водорослей. Пример такого прогрева в данных сканера TIRS показан на *рис. 7в* (см. с. 333). В стандартных RGB-композитах (см. *рис. 7а*) зона развития цианобактерий не проявляется, однако, если вместо красного канала ch4 (англ. channel 4) поставить ближний инфракрасный ch5 (англ. channel 5), их можно хорошо детектировать (см. *рис. 7б*). Также хорошо выделяет зону развития цианобактерий индекс с использованием красного и ближнего инфракрасного каналов: $(\text{ch5} - \text{ch4}) / (\text{ch5} + \text{ch4})$. Отметим, что зоны развития цианобактерий, фиксирующиеся в видимом диапазоне, имеют повышенную температуру, сильнее прогреваясь в суточном цикле (см. *рис. 7в*). В данном случае зона развития цианобактерий на 3 °C теплее окружающих вод.

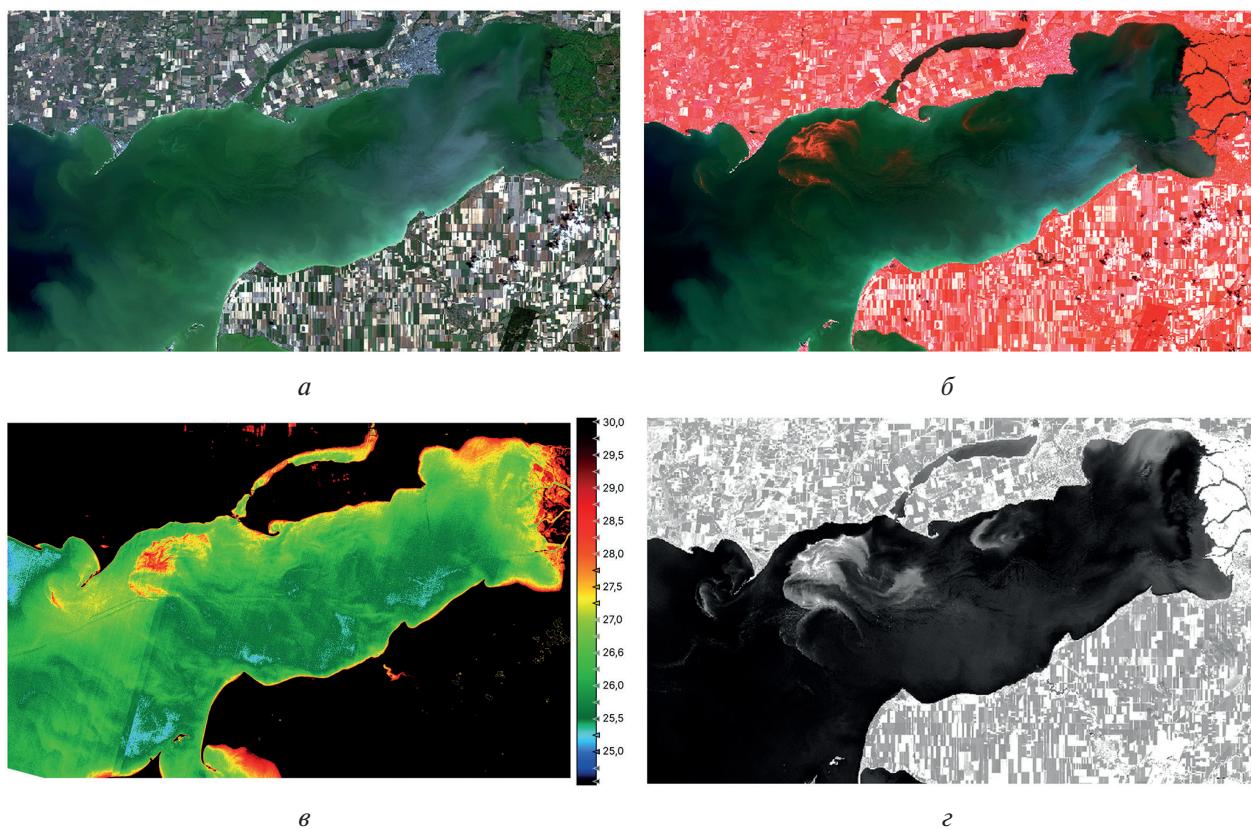


Рис. 7. Данные Landsat-9 за 9 июля 2018 г.: *а* — RGB-композит в псевдонатуральных цветах; *б* — RGB-композит с привлечением канала в инфракрасном диапазоне; *в* — температура по данным TIRS; *г* — индекс $(\text{ch5} - \text{ch4}) / (\text{ch5} + \text{ch4})$ для сканера OLI (англ. Operational Land Imager)

Заключение

Рассмотрены особенности изменения температуры в центральной части Азовского моря и в Таганрогском заливе на основе данных сканера MODIS. Показаны особенности в годовом ходе температуры в указанных акваториях. При почти одинаковых амплитудах годового хода вода в Таганрогском заливе раньше прогревается весной и быстрее остывает в осенний сезон.

При общем прогреве вод средняя температура за рассматриваемый период в центральной части моря растёт несколько быстрее, чем в Таганрогском заливе — тренды соответственно $0,085$ и $0,062$ $^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Тренды для различных месяцев существенно отличаются, в апреле и ноябре величина положительного тренда достигает $0,013$ $^{\circ}\text{C}/\text{год}$, а в октябре тренд отрицательный и равен $-0,05 \dots -0,08$ $^{\circ}\text{C}/\text{год}$. На основе комплексного анализа данных сканера SEVIRI рассмотрены ситуации аномального дневного прогрева с привлечением данных о скорости ветра и карт температуры сканера AVHRR, а также данных сканера TIRS с более высоким пространственным разрешением. В штилевых условиях амплитуда дневного прогрева может превышать 8 $^{\circ}\text{C}$. Показано возможное влияние мутности вод и наличия цианобактерий с поглощающими в оптическом диапазоне пигментами на амплитуду суточного хода температуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2024-528 от 24.04.2024 на реализацию крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития).

Литература

1. Алексерова А.А., Кубряков А.А., Станичный С.В. Двухканальный метод восстановления температуры поверхности Черного моря по измерениям Landsat-8 // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 4. С. 57–64. DOI: 10.7868/S0205961416040023.
2. Бердников С.В., Дацкевич Л.В., Кулыгин В.В. Климатические условия и гидрологический режим Азовского моря в XX–начале XXI вв. // Водные биоресурсы и среда обитания. 2019. Т. 2. № 2. С. 7–19. DOI: 10.47921/2619-1024_2019_2_2_7.
3. Бердников С.В., Кулыгин В.В., Дацкевич Л.В. Причины стремительного роста солености воды Азовского моря в XXI веке // Морской гидрофиз. журн. 2023. Т. 39. № 6. С. 760–778.
4. Боровская Р.В., Панов Б.Н. Система космического биоокеанологического мониторинга Азово-Черноморского бассейна // Ученые записки Крымского федер. ун-та имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2009. Т. 22. № 2. С. 41–49.
5. Гершанович Д.Е., Гоптарев Н.П., Затучная Б.М., Симонов А.И. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 5. Азовское море. СПб.: Гидрометеозидат, 1991. 235 с.
6. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Шеремет Н.А. Черное и Азовское моря: сравнительный анализ изменчивости температуры поверхности (1982–2009 гг., спутниковая информация) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 209–218.
7. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Серых И.В., Лебедев С.А. Климатические изменения гидрометеорологических параметров Черного и Азовского морей (1980–2020 гг.) // Океанология. 2021. Т. 61. № 6. С. 900–912. DOI: 10.31857/S003015742106006X.
8. Григоренко К.С., Олейников Е.П., Григоренко Е.Г. Влияние половодья Дона 2018 г. на термохалинную структуру Азовского моря // Наука юга России. 2019. Т. 15. № 3. С. 63–69. DOI: 10.7868/S25000640190307.
9. Дацкевич Л.В. Долговременные тенденции в изменениях метеопараметров региона Азовского моря // Экология. Экономика. Информатика. Сер.: Системный анализ и моделирование эконом. и эколог. систем. 2020. Т. 1. № 5. С. 130–137. DOI: 10.23885/2500-395X-2020-1-5-130-137.
10. Дацкевич Л.В., Кулыгин В.В. Сравнительный анализ среднемноголетнего распределения температуры воды Азовского моря по сезонам // Вестн. Южного науч. центра РАН. 2008. Т. 4. № 3. С. 64–71.
11. Дацкевич Л.В., Кулыгин В.В. Оценка средней температуры поверхностного слоя Азовского моря на основе данных спутниковой съемки и наблюдений прибрежных гидрометеостанций // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2019. Т. 25. № 2. С. 112–120. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-112-120.
12. Ильин Ю.П., Фомин В.В., Дьяков Н.Н., Горбач С.Б. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 1. Азовское море. Севастополь, 2009. 401 с.
13. Иошпа А.Р., Антоненко В.В., Стрюцкая А.О. Особенности многолетней динамики температуры воды в Азовском море // Экология. Экономика. Информатика. Сер.: Геоинформац. технологии и косм. мониторинг. 2019. № 4. С. 223–226. DOI: 10.23885/2500-123X-2019-2-4-223-226.
14. Ковалева Г.В. Проблема «цветения воды» в Таганрогском заливе и лиманах восточного побережья Азовского моря // Экология. Экономика. Информатика. Сер.: Системный анализ и моделирование эконом. и эколог. систем. 2019. Т. 1. № 4. С. 186–193. DOI: 10.23885/2500-395X-2019-1-4-186-193.
15. Кочергин А.Т. Межгодовая изменчивость температуры воды Азовского моря и его районов в летний период 1992–2016 гг. // Водные биоресурсы и среда обитания. 2018. Т. 1. № 2. С. 12–17. DOI: 10.47921/2619-1024_2018_1_2_12.
16. Кушнир В.М. Характеристики приповерхностного слоя Азовского моря по данным оптических сканеров системы MODIS // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 3. С. 35–46.
17. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 472 с.
18. Матищов Г.Г., Матищов Д.Г., Бердников С.В., Сорокина В.В., Левитус С., Смоляр И.В. Внутривековые флуктуации климата Азовского моря (по термохалинным данным за 120 лет) // Докл. Акад. наук. 2008. Т. 422. № 1. С. 106–109.
19. Спиридонова Е.О., Панов Б.Н. Изменения структурных показателей и среднего значения поля солености вод Азовского моря // Морской гидрофиз. журн. 2021. Т. 37. № 3. С. 305–317. DOI: 10.22449/0233-7584-2021-3-305-317.
20. Bryant D.A. Phycoerythrocyanin and phycoerythrin: properties and occurrence in cyanobacteria // Microbiology. 1982. V. 128. No. 4. P. 835–844.

Features of changes in surface temperature of the Sea of Azov in the 21st century according to satellite data

S. V. Stanichny¹, N. V. Vasilenko¹, V. A. Rubakina¹,
A. A. Kubryakov¹, V. V. Kulygin², S. V. Berdnikov²

¹ Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia
E-mail: sstanichny@mail.ru

² Southern Scientific Centre RAS, Rostov-on-Don 344006, Russia

The article considers changes in surface layer temperature in the central part of the Sea of Azov and in the Taganrog Bay on the basis of MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) scanner data from 2003 to 2024. Features in the annual temperature course in the specified water areas are shown: with almost identical amplitudes of the annual course, the waters of the Taganrog Bay warm up earlier in spring and cool down faster in autumn. With a general warming of the waters over the period under consideration, the trends for different months differ significantly: in April and November the value of the positive trend reaches 0.013 °C/year, and in October the trend is negative –0.05...–0.08 °C/year. Based on a comprehensive analysis of SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) scanner data, situations of anomalous daytime heating are considered using wind speed data and temperature maps from AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) and TIRS (Thermal InfraRed Sensor) scanners. In calm conditions, the amplitude of daytime heating can exceed 8 °C. The possible influence of water turbidity and the presence of cyanobacteria with pigments absorbing in the optical range on the amplitude of the diurnal temperature variation is shown.

Keywords: sea surface temperature, Sea of Azov, Taganrog Bay, daytime heating, MODIS, SEVIRI, AVHRR, satellite data

Accepted: 05.11.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-326-336

References

1. Aleskerova A. A., Kubryakov A. A., Stanichny S. V., A two-channel method for retrieval of the Black Sea surface temperature from Landsat-8 measurements, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, V. 52, No. 9, pp. 1155–1161, DOI: 10.1134/S0001433816090048.
2. Berdnikov S. V., Dashkevich L. V., Kulygin V. V., Climatic conditions and hydrological regime of the sea of Azov in the XX–early XXI centuries, *Aquatic Bioresources and Environment*, 2019, V. 2, No. 2, pp. 7–19 (in Russian), DOI: 10.47921/2619-1024_2019_2_2_7.
3. Berdnikov S. V., Kulygin V. V., Dashkevich L. V., Reasons for rapid increase of water salinity in the Sea of Azov in the 21st century, *Physical Oceanography*, 2023, 30(6), pp. 714–730.
4. Borovskaya R. V., Panov B. N., System of satellite bioceanologic monitoring of the Azov-Black Sea basin, *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*, 2009, V. 22, No. 2, pp. 41–49 (in Russian).
5. Gershovich D. E., Goptarev N. P., Zatuchnaya B. M., Simonov A. I., *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei SSSR. T. 5. Azovskoe more* (Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. V. 5. Sea of Azov), Saint Petersburg: Gidrometeozidat, 1991, 235 p. (in Russian).
6. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A., The Black and Azov seas: a comparative analysis of the sea surface temperature variability (1982–2009, satellite information), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, V. 8, No. 4, pp. 209–218 (in Russian).
7. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Serykh I. V., Lebedev S. A., Climate change in the hydrometeorological parameters of the Black and Azov Seas (1980–2020), *Oceanology*, 2021, V. 61, No. 6, pp. 745–756, DOI: 10.1134/S0001437021060060.
8. Grigorenko K. S., Oleynikov E. P., Grigorenko E. G., Influence of the Don River seasonal flood 2018 on the Sea of Azov thermohaline structure, *Science in the South of Russia*, 2019, V. 15, No. 3, pp. 63–69 (in Russian), DOI: 10.7868/S25000640190307.

9. Dashkevich L. V., Long-term trends in changes in meteorological parameters of the Sea of Azov region, *Ehkologiya. Ehkonomika. Informatika. Ser.: Sistemnyi analiz i modelirovanie ehkonomicheskikh i ehkologicheskikh sistem*, 2020, V. 1, No. 5, pp. 130–137 (in Russian), DOI: 10.23885/2500-395X-2020-1-5-130-137.
10. Dashkevich L. V., Kulygin V. V., Comparative analysis of average long-term distribution of temperature of water of the Sea of Azov through seasons, *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN*, 2008, V. 4, No. 3, pp. 64–71 (in Russian).
11. Dashkevich L. V., Kulygin V. V., The average temperature assessment of the surface layer of the Sea of Azov based on satellite imagery and observations at coastal hydrometeorological stations, *InterKarto. InterGIS*, 2019, V. 25, No. 2, pp. 112–120 (in Russian), DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-112-120.
12. Il'in Yu. P., Fomin V. V., D'yakov N. N., Gorbach S. B., *Gidrometeorologicheskie usloviya morei Ukrayiny. T. 1. Azovskoe more* (Hydrometeorological conditions of Ukrainian seas. V. 1. Sea of Azov), Sevastopol, 2009, 401 p. (in Russian).
13. Ioshpa A. R., Antonenko V. V., Stryuckaya A. O., Especially multi-year dynamics of water temperature in the Sea of Azov, *Ehkologiya. Ehkonomika. Informatika. Ser.: Geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskii monitoring*, 2019, No. 4, pp. 223–226 (in Russian), DOI: 10.23885/2500-123X-2019-2-4-223-226.
14. Kovaleva G. V., The problem of “water blooming” in the Taganrog Bay and estuaries of the eastern coast of the Sea of Azov, *Ehkologiya. Ehkonomika. Informatika. Ser.: Sistemnyi analiz i modelirovanie ehkonomicheskikh i ehkologicheskikh sistem*, 2019, V. 1, No. 4, pp. 186–193 (in Russian), DOI: 10.23885/2500-395X-2019-1-4-186-193.
15. Kochergin A. T., Inter-annual variability of the water temperature in the Azov sea and its regions in the summer season of 1992–2016, *Aquatic Bioresources and Environment*, 2018, V. 1. No. 2, pp. 12–17 (in Russian), DOI: 10.47921/2619-1024_2018_1_2_12.
16. Kushnir V. M., Characteristics of the near-surface layer of the Sea of Azov based on data from optical scanners of the MODIS system, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 3, pp. 35–46 (in Russian).
17. Lavrova O. Yu., Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., *Kompleksnyi sputnikovy monitoring morei Rossii* (Complex satellite monitoring of the Russian seas), Moscow: IKI RAS, 2011, 472 p. (in Russian).
18. Matishov G. G., Matishov D. G., Berdnikov S. V. et al., Secular climate fluctuations in the Sea of Azov region (based on thermohaline data over 120 years), *Doklady Earth Sciences*, 2008, V. 422, No. 1, pp. 1101–1104, DOI: 10.1134/S1028334X08070222.
19. Spiridonova E. O., Panov B. N., Changes of the structure indicators and the salinity field average value in the Sea of Azov, *Physical Oceanography*, 2021, V. 28(3), pp. 282–293, DOI: 10.22449/1573-160X-2021-3-282-293.
20. Bryant D. A., Phycoerythrocyanin and phycoerythrin: properties and occurrence in cyanobacteria, *Microbiology*, 1982, V. 128, No. 4, pp. 835–844.