

Л.В. Дашкевич¹, В.В. Кулыгин²

ОЦЕНКА СРЕДНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ АЗОВСКОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ СЪЁМКИ И НАБЛЮДЕНИЙ ПРИБРЕЖНЫХ ГИДРОМЕТЕОСТАНЦИЙ

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены особенности оценки средней годовой температуры воды для акватории Азовского моря в целом. Представлена краткая история исследования этого параметра по материалам разных авторов.

Проведено сравнение средних оценок температуры воды, полученных по данным наблюдений на гидрометеорологических станциях, и результатов спутниковой съёмки температуры поверхности моря по данным радиометров AVHRR (спутники серии NOAA, уровень обработки L4) за период 1982–2015 годов. Показано хорошее соответствие оценок, полученных из двух независимых источников.

По результатам сравнительного анализа предложены оптимальные варианты осреднения данных наблюдений за температурой вод Азовского моря для получения климатически значимых характеристик. Хорошее соответствие между оценками среднегодовой температуры воды по спутниковой информации и данным наблюдений на гидрометеорологических станциях позволяет сделать вывод об адекватности использования методики осреднения прибрежных наблюдений для оценки среднегодовой температуры вод Азовского моря в целом и возможности её использования при ретроспективных исследованиях климатических изменений в регионе.

В многолетней динамике изменений температуры воды Азовского моря по данным дистанционного зондирования Земли, так же как и по информации гидрометеорологических станций, наблюдается тенденция её роста с середины 1990-х годов, несколько замедлившаяся после наиболее тёплого за имеющийся период спутниковых наблюдений 2010 год. Выявлено потепление вод Азовского моря в начале XXI века относительно конца XX века почти на градус Цельсия, более выраженное в открытой части акватории.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Азовское море, средняя годовая температура воды, спутниковые данные

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, пр. Чехова, д. 41, 344006, Ростов-на-Дону, Россия, *e-mail*: ldashkev@ssc-ras.ru

² Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, пр. Чехова, д. 41, 344006, Ростов-на-Дону, Россия, *e-mail*: kulygin@ssc-ras.ru

Lyudmila V. Dashkevich¹, Valerii V. Kulygin²

THE AVERAGE TEMPERATURE ASSESSMENT OF THE SURFACE LAYER OF THE SEA OF AZOV BASED ON SATELLITE IMAGERY AND OBSERVATIONS AT COASTAL HYDROMETEOROLOGICAL STATIONS

ABSTRACT

The assessment of the average annual sea temperature of the Sea of Azov are considered. A brief history of the study of this parameter based on the materials of various authors is presented.

A comparison of the average sea temperature assessment obtained from observations at hydrometeorological stations and from the satellite imagery was made. Sea surface temperature maps are based on AVHRR radiometers data (NOAA satellites, processing level L4). The period 1982–2015 was considered. The good agreement of the assessments obtained from two independent sources was shown.

According to the results of a comparative analysis, the optimal variants of averaging the data of sea temperature observations of the Sea of Azov to obtain climatically significant characteristics are proposed. The agreement between the assessments of the average annual sea temperature with using satellite information and observational data at hydrometeorological stations suggests the adequacy of using the averaging method of coastal observations to estimate the Sea of Azov annual temperature and the possibility of using it in retrospective studies of climate change in the region.

In the long-term dynamics of changes in the sea temperature of the Sea of Azov according to the data of remote sensing of the Earth, as well as according to the information of hydrometeorological stations, there is a tendency of its growth since the mid-1990s, somewhat slowed down after the warmest year 2010. The warming of the waters of the Sea of Azov at the beginning of the twenty-first century relative to the end of the twentieth century by almost a degree Celsius, more pronounced in the open part of the sea, is detected.

KEYWORDS: Sea of Azov, average annual sea temperature, satellite imagery

ВВЕДЕНИЕ

При оценках состояния водной экосистемы часто используют такие показатели гидрологического режима как средние годовые солёность и температура воды. Как известно, локальные неосреднённые значения температуры воды не дают искомой климатической информации в явном виде, даже если для анализа имеется столетний ряд таких локальных измерений. В то же время среднегодовые значения, из которых исключен сезонный и суточный ход, осреднённые по пространству выбранных акваторий для исключения пространственной изменчивости, при условии достаточной длительности ряда удобны для выявления климатических тенденций и потому являются климатически значащим параметром [Фёдоров, Островский, 1986].

История оценки климатических изменений по средним годовым показателям для Азовского моря начинается во второй половине XX века. До этого обширная работа по изучению Азовского моря, проведенная Н.М. Книповичем [Книпович, 1932; Гидрологический справочник..., 1937], не включала в себя обобщения для акватории в целом, а экспедиционные данные и наблюдения на гидрометеорологических станциях (ГМС) использовались для описания различных небольших районов моря.

¹ Federal Research Center the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Chekhov avenue, 41, 344006, Rostov-on-Don, Russia, *e-mail:* ldashkev@ssc-ras.ru

² Federal Research Center the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Chekhov avenue, 41, 344006, Rostov-on-Don, Russia, *e-mail:* kulygin@ssc-ras.ru

В работе [Гидрометеорологический справочник..., 1962] впервые были приведены оценки средней многолетней температуры воды поверхностного слоя Азовского моря для четырёх районов на основе экспедиционных наблюдений (методика оценки не указывалась). В [Гидрометеорологические условия..., 1986] приведена среднемноголетняя температура вод по 44 квадратам моря на основе данных прибрежных и экспедиционных наблюдений, однако, в этой работе нет оценок температуры вод по годам для моря в целом (или районов). Нет таких оценок и в более позднем справочнике [Гидрометеорология и гидрохимия..., 1991]. Обобщённые оценки средней температуры вод по годам для Азовского моря в целом встречаются в работах Ю.М. Гаргопы – например, [Гаргопа, 2003]: на основе осреднения данных наблюдений семи ГМС (Приморско-Ахтарск, Мариуполь, Ейск, Таганрог, Мысовое, Кубанская Устьевая, Бердянск). Вероятно, такой выбор станций определялся наличием данных. Следует отметить, что при таком выборе преобладают данные восточной части акватории, что, по нашим оценкам, может давать несколько заниженные значения температуры воды при осреднении.

Попытка получить картину средних температур Азовского моря по годам на основе данных экспедиционных наблюдений в открытом море была предпринята в рамках диссертационной работы [Дашкевич, 2008]. Однако количество данных и, главное, неоднородность их распределения по акватории и сезонам года не позволили получить среднюю ежегодную оценку температуры вод открытой части Азовского моря. Были построены среднемноголетние карты и вертикальные разрезы распределения температуры вод по месяцам [Matishov et al., 2008; Дашкевич, 2008], а также рассчитаны средние многолетние температуры по месяцам и глубинам для Таганрогского залива (ТЗ), открытой части собственно моря (СМ) и моря в целом [Дашкевич, 2008].

Развитие системы спутниковых наблюдений и открытие общего доступа к некоторым данным дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) позволили вернуться к вопросу средней годовой температуры воды для Азовского моря. ДДЗЗ позволяют оценить только некоторые параметры, измеряемые на ГМС, но их несомненное преимущество – территориальный охват – возможность рассмотреть то, или иное явление одновременно на всей акватории.

Наличие доступных многолетних архивов ДДЗЗ позволяет проводить всесторонний анализ температуры поверхности различных морей. Для вод Чёрного и Азовского морей на основе данных проекта Pathfinder за 1982–2009 годы в работе [Гинзбург и др., 2011] была оценена месячная температура (для Азовского моря с апреля по ноябрь) и сделан вывод о наблюдающемся потеплении морских вод. Аналогичная тенденция отмечена для температуры поверхности трёх районов Каспийского моря (Северного, Среднего и Южного Каспия) [Гинзбург, Костяной, 2018]. Среднемноголетний (за 1998–2017 годы) внутригодовой цикл температуры поверхности Чёрного моря по данным радиометра AVHRR рассмотрен в работе [Артамонов и др., 2019]: выявлены области моря с максимальной внутригодовой изменчивостью этой характеристики.

Следует отметить, что сравнение ДДЗЗ с регулярными наблюдениями на ГМС встречается нечасто. В настоящей работе был восполнен этот пробел для акватории Азовского моря.

Пространственное распределение температуры воды в Азовском море относительно однородно. Мелководность водоёма и ветровое перемешивание зачастую создают условия гомотермии в акватории. Однако даже в этом случае существуют различия между северным, южным, а также западным и восточным побережьями СМ, и особенно ТЗ, что необходимо учитывать при оценке средней температуры воды для моря в целом. Прибрежная зона в связи с мелководностью отличается от остальной акватории очень большими суточными и сезонными колебаниями температуры воды, однако годовые значения достаточно стабильны.

В рамках государственного задания ЮНЦ РАН (№ госрегистрации 01201363188) разработан метод оценки средней температуры поверхностного слоя акватории Азовского моря в целом на основе данных наблюдений прибрежных ГМС. Проведена верификация предлагаемого метода на основе ДДЗЗ радиометров AVHRR (спутники серии NOAA, уровень обработки L4). По результатам сравнительного анализа предложены оптимальные варианты осреднения данных наблюдений за температурой вод Азовского моря для получения климатически значимых характеристик.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Источником данных наблюдений на ГМС были общедоступные базы данных: Южного научного центра РАН [Matishov et al., 2008]; российского сайта ООО «Расписание Погоды» (<http://rp5.ru>) и Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (<http://esimo.pacificinfo.ru>).

Следует отметить, что на оценку средней температуры Азовского моря в целом очень сильно влияет число и расположение станций ГМС, участвующих в осреднении. В случае данного водоёма представляется обязательным соблюдать равномерность распределения осредняемых станций по акватории. Нами использовались данные следующих ГМС: Таганрог, Ейск, Мариуполь, Бердянск, Геническ, Приморско-Ахтарск, Кубанская Устьевая, Мысовое, которые относительно равномерно расположены по побережью моря (рис.1). Наборы срочных данных температуры вод были осреднены посуточно, помесечно и далее до среднегодовых значений.

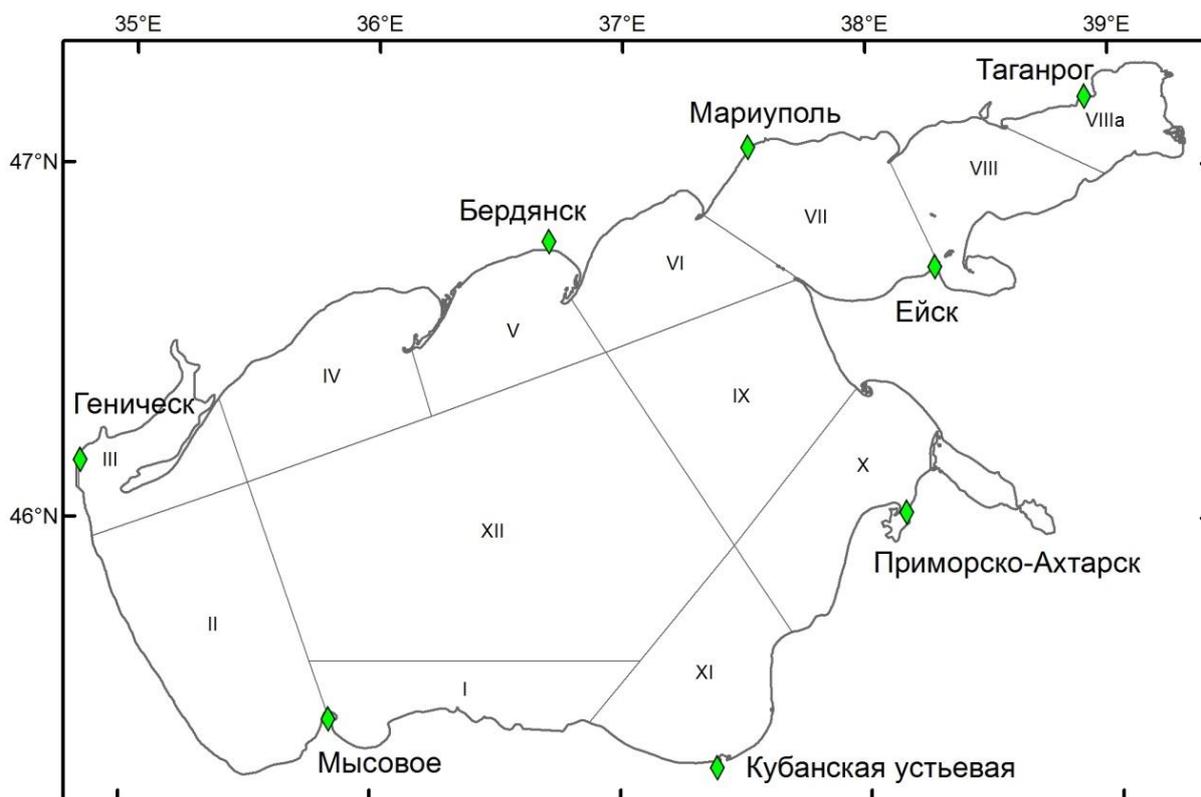


Рис. 1. Картограмма Азовского моря с основными гидрометеорологическими станциями и районированием акватории согласно [Гидрометеорологический справочник..., 1962]

Fig. 1. The schematic map of the Sea of Azov with the main hydrometeorological stations and zoning of the water area according to [Hydrometeorological reference..., 1962]

В качестве данных спутникового мониторинга использовался продукт «Чёрное море – температура поверхности моря в высоком разрешении» от Европейского центра данных Copernicus (Marine environment monitoring service <http://marine.copernicus.eu>). В основе этого продукта данные проекта Pathfinder версия 5.2 (PFV52) – спутниковые снимки, полученные радиометрами AVHRR, установленными на спутниках серии NOAA), уровень обработки L4 за период 1982–2015 годов. При создании указанного продукта для заполнения пустых ячеек, связанных с облачностью, использовался алгоритм оптимальной интерполяции (среднеквадратичная ошибка для продукта в целом составляет 0.55 °C, среднее отклонение – 0.21 °C). Набор данных представлял собой среднесуточные значения температуры воды на каждую дату за период с 01.01.1982 по 31.12.2015 годов в узлах регулярной сетки с размером ячейки 0.0417°x 0.0417° (это оригинальное разрешение данных PFV52).

Акватория Азовского моря была разделена на регионы согласно схеме районирования Азовского моря в [Гидрометеорологический справочник..., 1962] (рис.1). Расчёт среднегодовых значений средней по морю температуры воды на основе ДДЗЗ производился в несколько этапов:

- 1) суточное значение для каждого из районов рассчитывалось как среднее арифметическое всех ячеек сетки, попавших в соответствующий район;
- 2) суточные значения осреднялись в пределах месяца для каждого района;
- 3) месячные значения осреднялись в пределах года для каждого района;
- 4) среднее годовое значение температуры воды для ТЗ, СМ и моря в целом рассчитывалось как средневзвешенное значение с учётом площадей соответствующих районов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наилучшее соответствие между оценками по данным ГМС и по спутниковым снимкам (рис. 2) было получено для ТЗ при осреднении данных трёх станций (Таганрог, Ейск, Мариуполь), а СМ – четырёх (Геничеськ, Приморско-Ахтарск, Кубанская Устьевая и Бердянск), коэффициент корреляции (R) в обоих случаях равен 0.92.

Как показал анализ данных, для ТЗ при осреднении данных температуры воды достаточно использовать две станции (Таганрог и Ейск; R=0.91), что актуально в условиях сложности получения информации с украинского побережья. При осреднении данных только Таганрога и Мариуполя или Ейска и Мариуполя, результат получался значительно хуже, что объясняется географическим положением ГМС.

Лучшее соответствие между оценками по данным ГМС и спутниковых снимков для моря в целом получено при осреднении данных шести следующих станций: Таганрог, Ейск, Геничеськ, Приморско-Ахтарск, Кубанская Устьевая и Бердянск (R=0.92). Более того, коэффициент корреляции между ДДЗЗ и осреднёнными данными ГМС для моря в целом несколько выше, если в осреднении участвуют шесть станций (R=0.92), а не восемь (R=0.90). То же отмечено и для СМ: при осреднении данных четырёх ГМС (Геничеськ, Приморско-Ахтарск, Кубанская Устьевая и Бердянск): R=0.92, против R=0.88 при добавлении в осреднение данных ГМС Мысовое. Таким образом, как показал сравнительный анализ, при осреднении температуры вод для акватории в целом данными ГМС Мариуполь и Мысовое можно пренебречь.

При сравнении графиков для ТЗ и СМ, полученных по данным ГМС и ДДЗЗ (рис. 2), выявлено, что при общем характере изменений температура вод по снимкам системно на 0.01–0.7 °C выше, чем по данным ГМС. Вероятно, это связано с разницей между температурой поверхности моря (измеряемой дистанционными методами) и температурой поверхностного слоя вод (измеряемого контактными методами). Следует отметить, что коэффициент корреляции между графиками среднегодовой температуры воды по ДДЗЗ и оценкам по ГМС несколько выше для безлёдного периода (весна-осень): R=0.95 и 0.94 для ТЗ и СМ соответственно. Возможно, это говорит о недооценке зимних температур воды по ДДЗЗ.

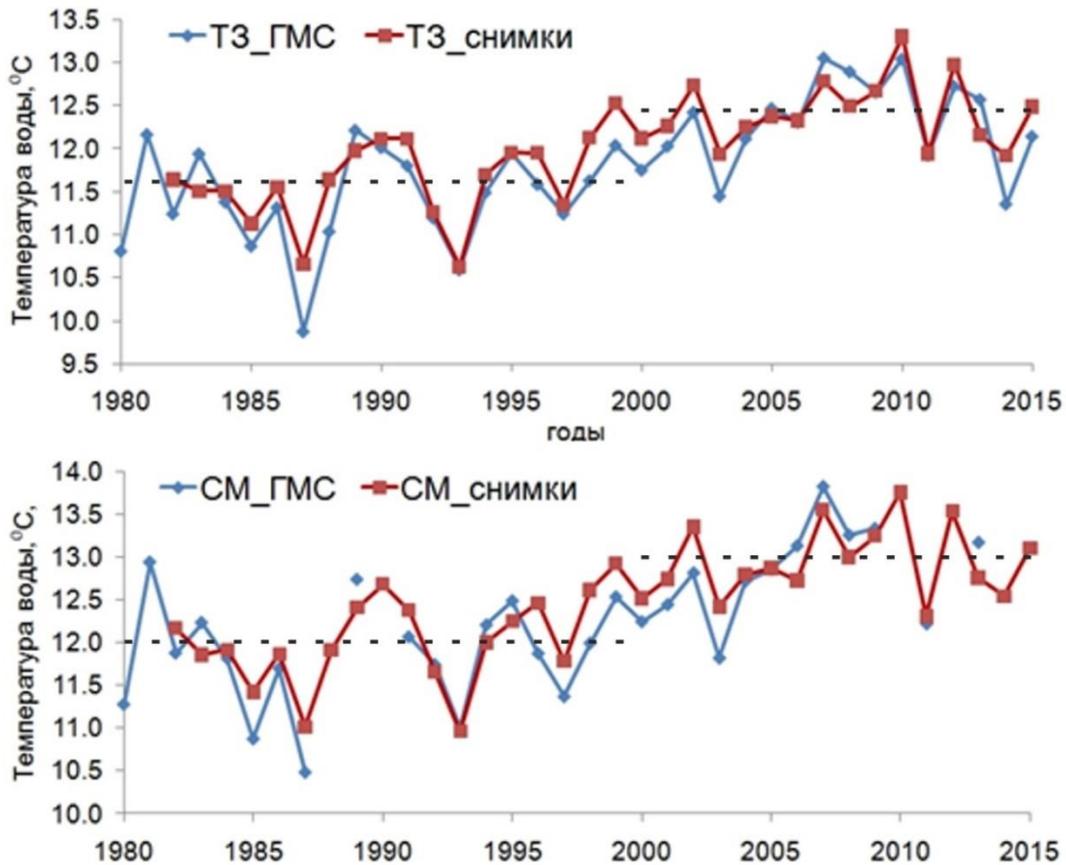


Рис. 2. Сравнение средних температур воды по данным гидрометеорологических станций и дистанционного зондирования Земли (пунктирной линией отмечена средняя температура воды за период)

Fig. 2. Comparison of average sea temperatures according to the observations at hydrometeorological stations and remote sensing data (the dotted line indicates the average sea temperature over a period)

Проведённый анализ, по данным как ГМС, так и ДЗЗ, выявил повышение средней годовой температуры воды за период с 2000–2015 годов относительно 1982–1999 годов на 0,84 и 0,95 °С в ТЗ и СМ соответственно (рис. 2).

На рис. 3 представлена средняя годовая температура поверхности вод Азовского моря по ДЗЗ. За рассматриваемый период наиболее низкая среднегодовая температура была отмечена в 1987 году, а наиболее высокая – в 2010 году. В качестве примера средних температур для периода 1982–1999 годов на рис. 3 приведён 1984 год, а для современного периода 2000–2015 годов – 2005 год соответственно. По рис. 2 и 3 можно проследить тенденцию повышения средней годовой температуры вод примерно с середины 1990-х годов. Это согласуется с исследованиями других авторов в Азово-Черноморском бассейне, например, [Гинзбург и др., 2011; Артамонов и др., 2019].

Хорошее соответствие между оценками среднегодовой температуры воды по ДЗЗ и данным ГМС позволяет сделать вывод об адекватности использования методики осреднения прибрежных наблюдений для оценки среднегодовой температуры поверхностных вод акватории Азовского моря в целом и возможности её использования при ретроспективных исследованиях климатических изменений в регионе.

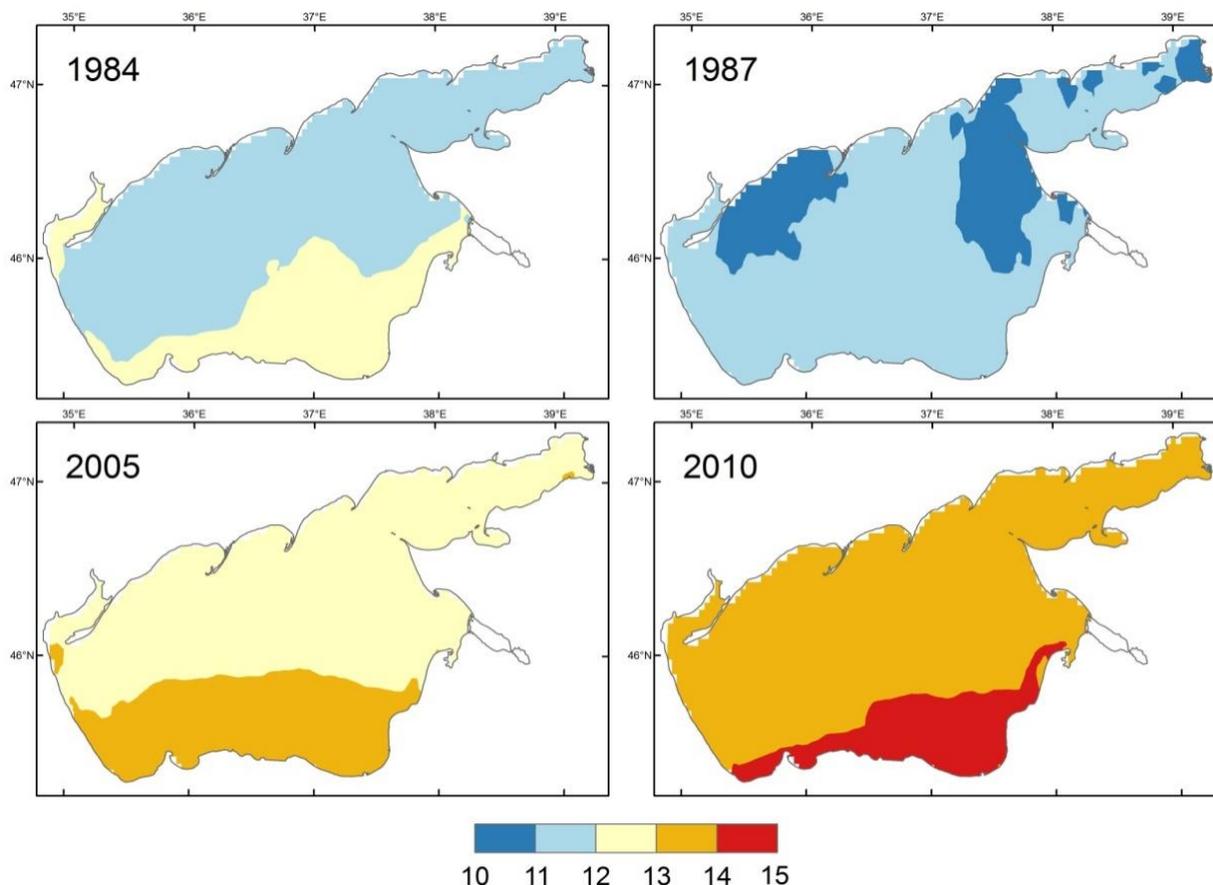


Рис. 3. Пространственное распределение средней годовой температуры воды (°C) в Азовском море по данным дистанционного зондирования Земли
 Fig. 3. Spatial distribution of the average annual water temperature (°C) in the Azov Sea based on remote sensing data

ВЫВОДЫ

В многолетней динамике температуры воды Азовского моря по ДДЗЗ (1982–2015 годы), так же как и по данным ГМС (рис. 2 и 3), наблюдается тенденция её роста с середины 1990-х годов (и по данным ГМС и по ДДЗЗ: для ТЗ – 0,04 °C/год, для СМ – 0,05 °C/год), несколько замедлившаяся после наиболее тёплого за имеющийся период спутниковых наблюдений 2010 года. Выявлено повышение средней годовой температуры воды за период с 2000–2015 годов относительно 1982–1999 годов на 0,84 и 0,95 °C в ТЗ и СМ соответственно.

Весьма вероятно, что отмеченные тенденции являются примером внутривековых природных циклов [Матишов и др., 2008; 2010].

Полученные результаты позволяют использовать средние оценки температуры воды по наблюдениям на береговых ГМС (полученные предлагаемым методом) на ряду с ДДЗЗ при реконструкции температурного режима Азовского моря.

БЛАГОДАРНОСТИ

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. проекта 01201363188.

ACKNOWLEDGMENTS

The publication was prepared in the framework of the implementation of the state assignment of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, project No 01201363188.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А., Латушкин А.А., Федирко А.В. Среднегодовое внутригодовое изменение гидрооптических характеристик, хлорофилла *a* и температуры на поверхности Чёрного моря по спутниковым данным. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019. Т. 16. № 1. С. 171–180.
2. Гаргона Ю.М. Крупномасштабные изменения гидрометеорологических условий формирования биопродуктивности Азовского моря. Дис... докт. географических наук. Мурманск, 2003. 467 с.
3. Гидрологический справочник морей СССР. Т. III: Азовское море. Вып. 2. Л.– М.: Гидрометиздат, 1937. 465 с.
4. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 3. Азовское море. Л.: Гидрометеоиздат., 1986. 218 с.
5. Гидрометеорологический справочник Азовского моря. Ред. А.А. Аксёнов. Л.: Гидрометеорологическое изд., 1962. 856 с.
6. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. V. Азовское море. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 237 с.
7. Гинзбург А.И., Костяной А.Г. Тенденции изменений гидрометеорологических параметров Каспийского моря в современный период (1990-е – 2017 гг.). Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2018. Т. 15. № 7. С. 195–207.
8. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Шеремет Н.А. Чёрное 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.
9. Дашкевич Л.В. Анализ многолетней изменчивости температурного режима вод открытой части Азовского моря с использованием геоинформационных технологий и математического моделирования. Дис... канд. географических наук. Мурманск: Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН, 2008. 164 с.
10. Книпович Н.М. Гидрологические исследования в Азовском море. Труды Азово-Черноморской научно-промысловой экспедиции. М., 1932. Вып. 5. 495 с.
11. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Гаргона Ю.М. Климатогенные изменения экосистем южных морей в условиях антропогенных воздействий. Известия РАН. Серия географическая, 2008. № 3. С. 26–34.
12. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Гаргона Ю.М., Дашкевич Л.В. Замерзание Азовского моря и климат в начале XXI века. Вестник Южного научного центра РАН, 2010. Т.6. № 1. С. 33–40.
13. Фёдоров К.Н., Островский А.Г. Климатически значащие физические параметры океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 42 с.
14. Matishov G., Matishov D., Gargona Yu., Dashkevich L., Berdnikov S., Kulygin V., Archipova O., Chikin A., Shabas I., Baranova O., Smolyar I. Climatic Atlas of the Sea of Azov 2008. Serp. International Ocean Atlas and Information Series. V. 11. OAA Atlas NESDIS 65. Washington: U.S. Government Printing Office, 2008. 148 p.

REFERENCES

1. Artamonov Yu. V., Skripaleva E. A., Latushkin A. A., Fedirko V. A. Multi-year average intra-annual cycle of hydrooptical characteristics, chlorophyll *a* and surface temperature of the Black sea from

- satellite data. Modern problems of remote sensing of the Earth from space, 2019. V. 16. No 1. P. 171–180 (in Russian).
2. *Dashkevich L.V.* Analysis of long-term variability of the temperature regime of the waters of the open part of the Azov Sea using geoinformation technologies and mathematical modeling. The thesis of PhD of geographical sciences. Murmansk: Murmansk Marine Biological Institute KSC RAS, 2008. 164 p. (in Russian).
 3. *Fedorov K.N., Ostrovskii A.G.* Climatically meaningful physical parameters of the ocean. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. 42 p. (in Russian).
 4. *Gargopa Yu.M.* Large-scale changes in the hydrometeorological conditions for the formation of the bioproductivity of the Azov Sea. The thesis of Doctor of geographical sciences. Murmansk, 2003. 467 p. (in Russian).
 5. *Ginzburg A.I., Kostyanoy A.G.* Tendencies of changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea in the modern period (1990s–2017). Modern problems of remote sensing of the Earth from space, 2018. V. 15. No 7. P. 195–207.
 6. *Ginzburg A.I., Kostyanoy A.G., Sheremet N.A.* The Black and Azov seas: a comparative analysis of the sea surface temperature variability (1982–2009, satellite information). Modern problems of remote sensing of the Earth from space, 2011. V. 8. No 4. P. 209–218 (in Russian).
 7. Hydrometeorological conditions of the shelf zone of the seas of USSR. Book 3. Sea of Azov. Leningrad: Hydrometeorological Publishing, 1986. 218 p. (in Russian).
 8. Hydrometeorological reference of the Sea of Azov. Ed. By A.A. Aksyonov. Leningrad: Hydrometeorological Publishing, 1962. 856 p. (in Russian).
 9. Hydrometeorological reference of the seas of USSR. Book 3. The Sea of Azov. Leningrad–Moscow: Hydrometeorological Publishing, 1937. 465 p. (in Russian).
 10. Hydrometeorology and hydrochemistry of seas of the USSR. V. V. The Sea of Azov. Leningrad: Hydrometeorological Publishing, 1991. 237 p. (in Russian).
 11. *Knipovich N.M.* Hydrological Studies in the Sea of Azov. Transactions of the Azov-Black Sea Scientific and Fishery Expedition. Iss. 5. Moscow, 1932. 495 p. (in Russian).
 12. *Matishov G.G., Matishov D.G., Gargopa Ju.M.* Climatogenic changes of ecosystems of the southern seas in the conditions of anthropogenic impacts. Proceedings of the RAS. Geographical series, 2008. No 3. P. 26–34 (in Russian).
 13. *Matishov G.G., Matishov D.G., Gargopa Yu.M., Dashkevich L.V.* The freezing of the Sea of Azov and climate at the beginning of the XXI century. Bulletin of the Southern Scientific Center of RAS, 2010. V. 6. No 1. P. 33–40 (in Russian).
 14. *Matishov G., Matishov D., Gargopa Yu., Dashkevich L., Berdnikov S., Kulygin V., Archipova O., Chikin A., Shabas I., Baranova O., Smolyar I.* Climatic Atlas of the Sea of Azov 2008. International Ocean Atlas and Information Series. V. 11. OAA Atlas NESDIS 65. Washington: U.S. Government Printing Office, 2008. 148 p.
-