

УДК 551.582.3:551.46 (262.54)

НОВОЕ СОСТОЯНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА АЗОВСКОГО МОРЯ В XXI ВЕКЕ

© 2022 г. С. В. Бердников^{1,*}, Л. В. Дашкевич¹, В. В. Кульгин¹

Представлено академиком РАН Г.Г. Матишовым 15.10.2021 г.

Поступило 20.10.2021 г.

После доработки 08.11.2021 г.

Принято к публикации 11.11.2021 г.

В статье рассмотрена динамика состояния Азовского моря на протяжении XX–начала XXI вв. Представлены основные факторы, формировавшие гидрологический режим водоема. Выявлено, что текущее состояние Азовского моря: значительная положительная аномалия температуры и солености вод, не отмечалось ранее в истории исследования данного водоема. Отмечено увеличение среднего квадратичного отклонения рядов среднегодовых значений, как по солености, так и по температуре воды, что может говорить об увеличении изменчивости этих характеристик в современный период.

Ключевые слова: Азовское море, климатические изменения, температура воды, соленость воды

DOI: 10.31857/S2686739722030057

ВВЕДЕНИЕ

Азовское море замыкает цепь средиземноморских морей, связанных с Атлантическим океаном и опоясывающих южные берега Европы. Его небольшие размеры (площадь 39 тыс. км², максимальная глубина 13 м (средняя – 7 м) [1]) обуславливают существенную зависимость гидрологического режима и биологической продуктивности от внешнего влияния. На рубеже XX и XXI веков в бассейне Азовского моря произошли существенные изменения, обусловленные колебаниями климата и возросшей антропогенной нагрузкой на регион [2–4].

В данной статье для Азовского моря выполнено сопоставление двух важных гидрологических (и экосистемных) параметров его вод: среднегодовых осредненных в пределах акватории значений солености и температуры между собой и с температурой воздуха, ледовитостью и суммарным речным стоком. Именно эти характеристики определяют жизнедеятельность гидробионтов и хозяйственную деятельность человека в акватории. Рассмотрен почти 100-летний ряд инструментальных наблюдений и показано, что экосистема Азовского моря на рубеже XX и XXI веков перешла в новое состояние, не наблюдавшееся ранее.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основным источником была общедоступная океанографическая база данных по Азовскому морю [5, 6], которая содержит более 47000 станций с данными по солености за 1924–2012 гг. (рис. 1 а). Для периода 2013–2019 гг. использованы более 1500 станций морских наблюдений ЮНЦ РАН [7, 8] (рис. 1б). Среднегодовые осредненные по акватории моря значения солености рассчитаны согласно [9].

Средняя годовая температура воды и воздуха для моря в целом рассчитывалась по данным 6 гидрометеорологических станций (ГМС): Таганрог, Ейск, Приморско-Ахтарск, Кубанская устьевая, Геническ, Бердянск по информации из общедоступной базы данных ВНИИГМИ-МЦД [10] в соответствии с подходом, предложенным в [11].

Средняя сезонная ледовитость моря за 1950–1977 гг. по данным наблюдений приведена согласно [1]. За 2001–2019 гг. ледовитость рассчитана по данным Международного Центра Данных – Морской Лед [12]. Пропуски за 1924–1949 и 1978–1999 гг. заполнены расчетным методом с помощью гидрологической модели, апробация которой в части расчета ледовитости и сравнимость полученных результатов с оценками по данным натурных наблюдений и космоснимкам представлены в [13].

Анализ рядов солености и температуры воды Азовского моря и их аномалий относительно среднемноголетних значений 1924–2019 гг. позволил с применением кластерного анализа выде-

¹Федеральный исследовательский центр
“Южный научный центр Российской академии наук”,
Ростов-на-Дону, Россия

*E-mail: berdnikov@ssc-ras.ru

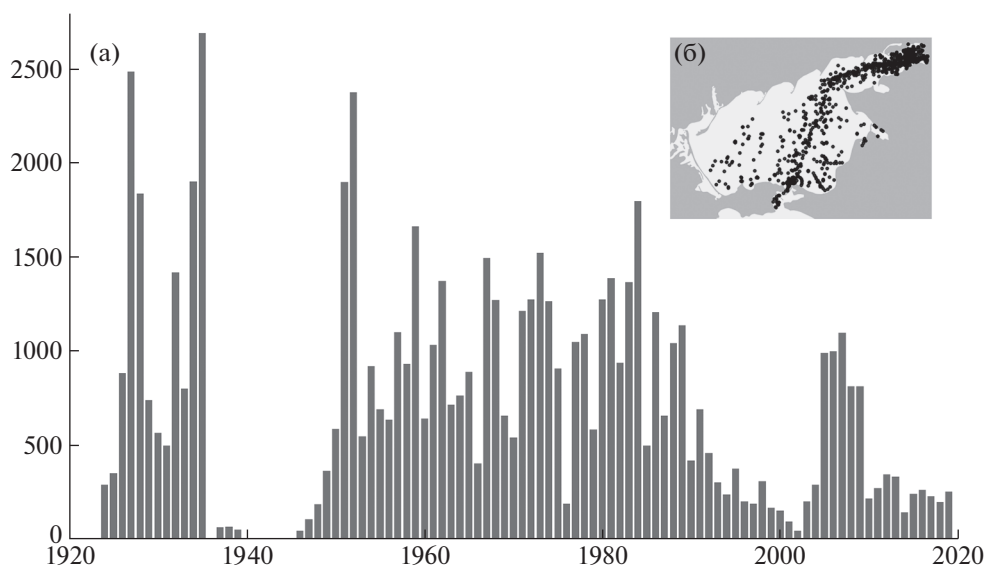


Рис. 1. Морские станции с измерениями солёности: (а) распределение количества станций по годам; (б) пространственное распределение станций за 2013–2019 гг.

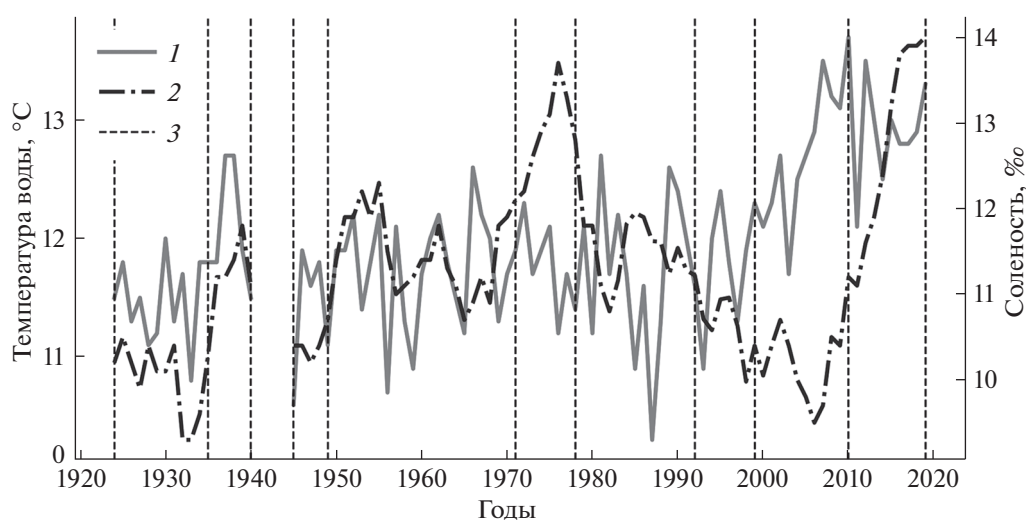


Рис. 2. Динамика среднегодовых осредненных по морю значений температуры 1 и солёности 2 вод Азовского моря, границы периодов 3.

лить следующие периоды: 1924–1935, 1936–1940, 1945–1949, 1950–1971, 1972–1978, 1979–1992, 1993–1999, 2000–2010 и 2011–2019 гг. (рис. 2). Из-за отсутствия большей части данных наблюдений в период Великой Отечественной войны интервал 1941–1944 гг. отсутствует.

Для выделенных периодов и рассматриваемых переменных состояния (температуры воздуха и воды, солёности вод, ледовитости, суммарного речного стока) построены эллипсы рассеяния (ЭР), главные оси которых определяются собственными векторами ковариационной матрицы этих величин, а большой и малый полуэллипсы

равны среднеквадратичным отклонениям значений рассматриваемых факторов. Построение ЭР позволило рассмотреть изменения во времени взаимосвязи между факторами и разброс их значений, влиявших на Азовское море на протяжении XX–XXI вв.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Построение ЭР для среднегодовых значений температур воздуха и воды ожидаемо показало их высокую взаимосвязь (рис. 3а), при этом отчетливо виден рост температур для двух послед-

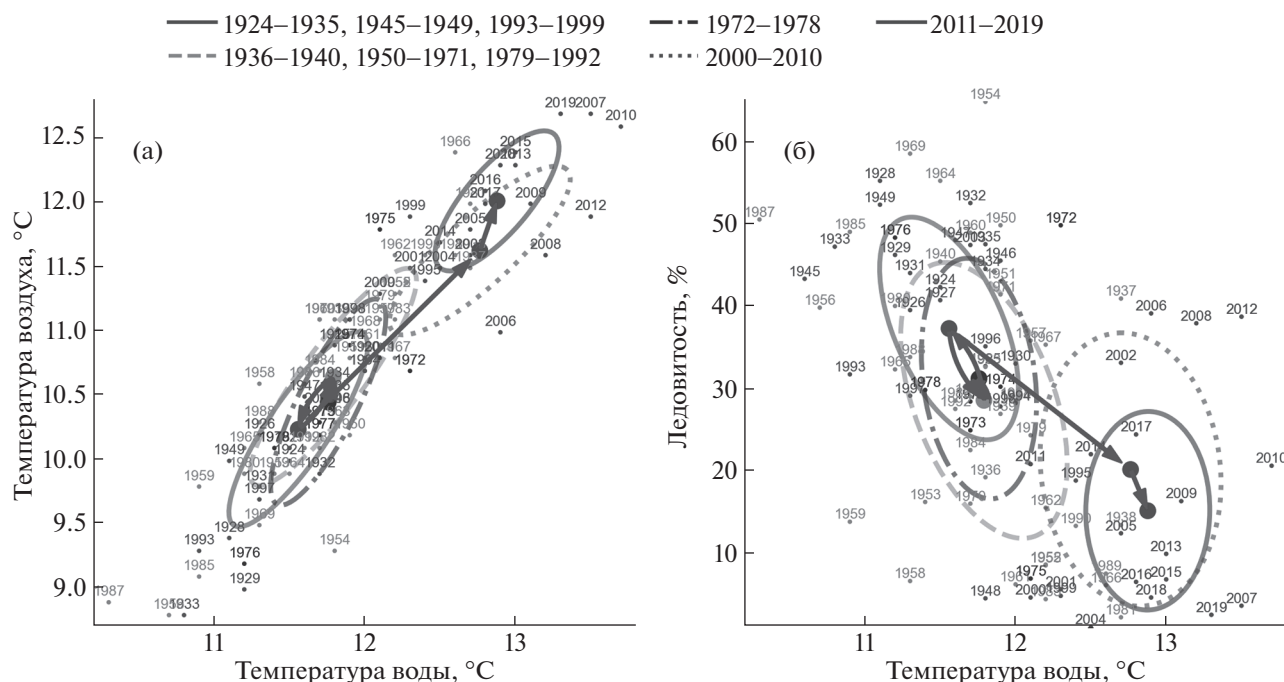


Рис. 3. Взаимосвязи температуры воздуха (а) и ледовитости (б) с температурой вод Азовского моря. Стрелками показано направление смещения центров ЭР при переходе от одного периода к другому.

них периодов при незначительных колебаниях между ними ранее.

Столь же ожидаема полученная взаимосвязь сокращения ледовитости с ростом средней температуры воды (рис. 3б). Возвратно-колебательные движения от периода к периоду на протяжении XX в. сменились однонаправленным снижением ледовитости в XXI в.

Наиболее интересно изменение во времени взаимосвязи главных характеристик состояния морской воды: солёности и температуры (рис. 4а), являющихся ведущими факторами для экосистемы. На основе ЭР можно выделить пять достаточно самостоятельных состояний Азовского моря за период 1924–2019 гг. На протяжении XX в. среднегодовая температура вод находилась в коридоре значений от 10.3 (1987 г.) до 13.2°C (1966 г.), при этом можно наблюдать три состояния в вариациях солёности: низкая (периоды 1924–1935, 1945–1949, 1993–1999 гг.), средняя (1936–1940, 1950–1971, 1979–1992 гг.) и высокая (1972–1978 гг.). Начальный период XXI в. характеризовался низкой солёностью и высокой температурой, во втором десятилетии при сохранении высоких температур воды мы наблюдаем очень высокую солёность моря. Подобное состояние гидрологического режима моря не наблюдалось ранее за рассматриваемую историю инструментальных наблюдений.

Изменения взаимосвязи ледовитости и средней солёности моря (рис. 4б) повторяют характер изменений для солёности и температуры вод в пе-

ревернутом виде. Но следует отметить гораздо большую величину среднего квадратичного отклонения и разброс значений для средней ледовитости.

Сопоставление межгодовых флуктуаций притока речной воды и среднегодовой солёности Азовского моря за весь период наблюдений указывает на высокую степень их взаимосвязи (рис. 5), которая вместе с тем зависит от таких компонентов водного баланса моря, как осадки, испарение и водообмен через Керченский пролив. При довольно значительной межгодовой вариабельности речного стока разброс значений солёности моря в пределах 1‰.

В период повышения увлажнённости бассейна (1924–1932 гг.) средняя солёность моря снижалась от 10.5 до 9.1‰, а в фазу, относящуюся к началу 1940-х – от 11.8 до 9.2‰. В периоды недостаточного увлажнения (1933–1939, 1945–1954 гг.) средняя солёность моря достигала 11.8–12.1‰. Периоды осолонения (1912–1915, 1938–1940, 1950–1951 гг.) при незарегулированном стоке были кратковременны и разделялись продолжительными пресными фазами. С 1952 г. водность рек выше нормы и фаза повышенной увлажнённости бассейна продолжались до 1968 г. Начавшаяся далее очередная фаза пониженной увлажнённости привела к экстремальным значениям солёности Азовского моря в 1972–1978 гг. (до 13.8‰ в 1976 г.) [14]. В 1980-х гг. водосбор моря находился в условиях пониженного увлажнения.

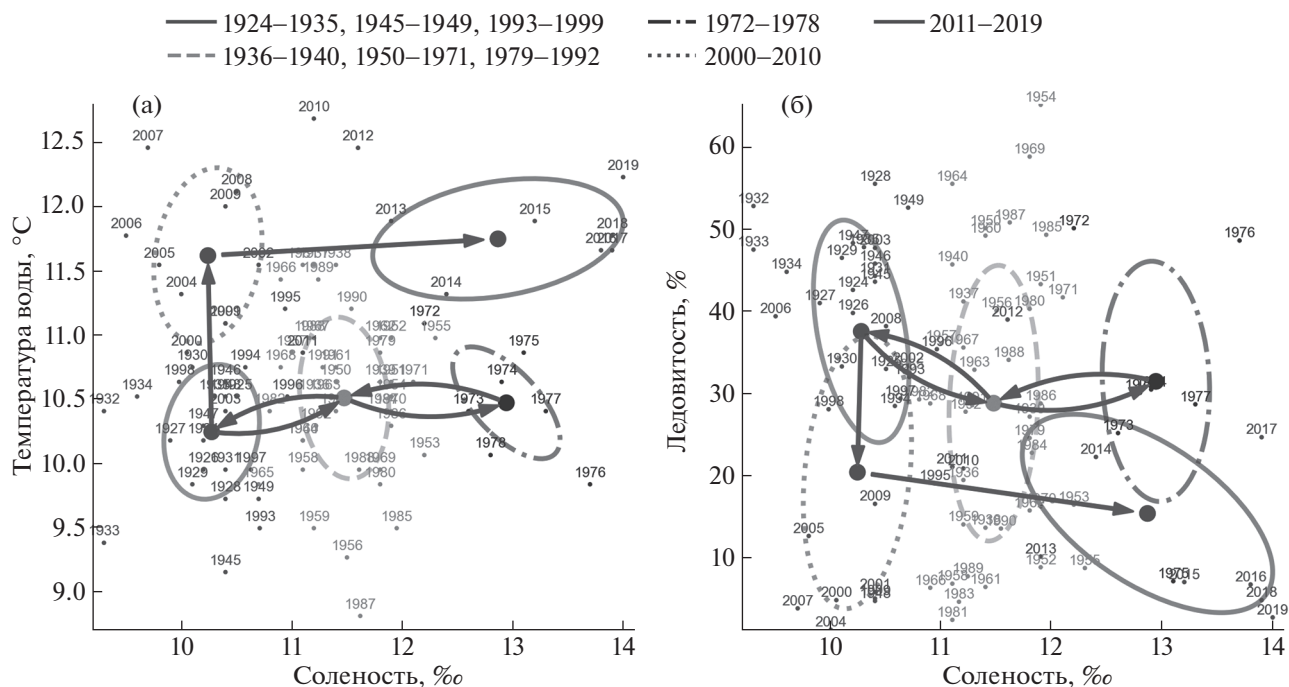


Рис. 4. Взаимосвязи температуры воды (а) и ледовитости (б) со средней соленостью моря; пояснение к рис. 2.

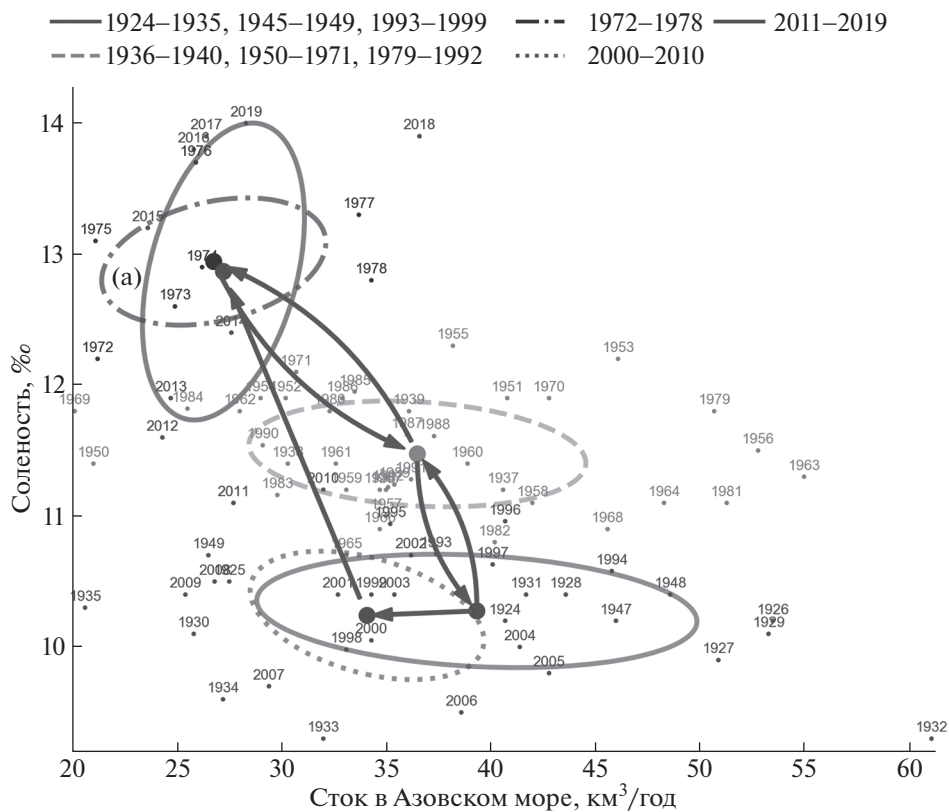


Рис. 5. Взаимосвязь суммарного речного стока в Азовское море и солености; пояснение к рис. 2.

Если рассматривать периоды сильного осолонения (1970-х гг. и начавшийся с 2007 г. маловодный период на Дону), то можно отметить наличие некоторого критического объема годового пресного стока (примерно 25–27 км³), ниже которого Азовское море испытывает дефицит речных вод. Есть мнение, что в современных условиях низкий речной сток не оказывает влияние на водообмен через Керченский пролив, а приток черноморских вод регулируется ветровой деятельностью и может быть более интенсивным, чем в XX в. [15]. Видны различия в переходе к режимам осолонения. В 1970-х годах даже при большом стоке 1970 и 1971 г. уже была достаточно высокая соленость (около 12‰), а после первого же маловодного 1972 г. соленость перешла в критическую уже в 1973 г. В современный период “старт” был очень низкий (2007 г. – меньше 10‰, и даже в 2011 г. около 11‰), а затем соленость непрерывно росла до 14.0‰ в 2019 г. (немного снизившись в Таганрогском заливе в многоводном 2018 г.). Есть оценки, что среднегодовая средняя по морю соленость в 2020 г. достигла исторического максимума – 14.83‰ [16].

Речной сток в настоящее время не является единственным фактором, уменьшение которого приводит к росту солености в море. Вклад климатически обусловленных изменений атмосферных процессов в такие компоненты водного баланса, как испарение и водообмен с Черным морем (на фоне наблюдаемого роста уровня моря [17]), не оценен в полной мере и возможны каскадные эффекты, вызванные аномальным ростом температуры водных масс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На протяжении почти всего XX века Азовское море пребывало в одном из двух состояний: распресненном или осолоненном. В первой декаде XXI в. увеличилась средняя по морю средняя годовая температура воды при относительно низкой солености вод; затем в условиях маловодья на Дону (а потом и Кубани) начался стремительный рост солености. В течение 2000–2019 гг. экосистема Азовского моря по комплексу гидрологических показателей перешла в состояние, которое не наблюдалось в период инструментальных наблюдений (1924–1999 гг.).

Закономерным следствием процесса потепления вод Азовского моря и роста солености стало существенное (в 2 раза) снижение ледовитости моря, несмотря на наблюдаемые аномальные ледовые условия в отдельные зимы (2006, 2012 г.).

Следует обратить внимание на увеличение среднеквадратичного отклонения рядов среднегодовых значений для новых состояний, как по солености, так и по температуре воды (особенно

выражено при сравнении начала XX и XXI в.), что можно интерпретировать как увеличение изменчивости этих характеристик в современный период.

При оценке происходящих изменений для биологических ресурсов экосистемы Азовского моря прежде всего делается акцент на росте солености и его прямой связи с дефицитом пресного стока [16]. Рост температуры воды пока остается за скобками обсуждений. Вместе с тем есть оценки, что согласованный рост температуры и солености среды может негативно повлиять на принимаемые меры по восстановлению запаса популяции азовского судака [18].

Необходимость всесторонних оценок происходящих изменений и поиск оптимальных условий эксплуатации истощенных биологических ресурсов моря обуславливают развитие системы мониторинга и технологий моделирования для понимания происходящих процессов.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Публикация подготовлена в рамках ГЗ ЮНЦ РАН на 2022 г. “Геоинформационный анализ и моделирование морских и наземных экосистем Юга России”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 3. Азовское море. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 218 с.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории РФ. М.: Росгидромет, 2014. 58 с.
3. Доклад об особенностях климата на территории РФ за 2020 г. М.: Росгидромет, 2021. 104 с.
4. Матишов Г.Г., Дашкевич Л.В., Кириллова Е.Э. Цикличность климата в Приазовье: голоцен и современный период (XIX–XXI вв.) // ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 498. № 5. С. 96–100. <https://doi.org/10.31857/S2686739721050091>
5. Climatic Atlas of the Sea of Azov 2008 / NOAA Atlas NESDIS 65. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 2008. 148 p.
6. Atlas of Climatic Changes in Nine Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1827–2013) / NOAA Atlas NESDIS 78. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 2014. 131 p.
7. Матишов Г.Г., Степаньян О.В. НИС “Денеб”: 10 лет морских научных исследований // Морской гидрофиз. журн. 2018. Т. 34. № 6. С. 548–555.
8. Матишов Г.Г., Григоренко К.С. Динамический режим Азовского моря в условиях осолонения // ДАН. 2020. Т. 492. № 1. С. 107–112. <https://doi.org/10.31857/S268673972005014X>
9. Дашкевич Л.В., Бердников С.В., Кулыгин В.В. Многолетнее изменение средней солености Азовского моря // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 5. С. 563–572. <https://doi.org/10.7868/S0321059617040046>

10. <http://meteo.ru>
11. Дашкевич 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. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-2-25-112-120>
12. <http://wdc.aari.ru>
13. Дашкевич Л.В., Немцева Л.Д., Бердников С.В. Оценка ледовитости Азовского моря в XXI веке по спутниковым снимкам Terra/Aqua MODIS и результатам математического моделирования // Совр. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 91–100. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-5-91-100>
14. Бронфман А.М., Дубинина В.Г., Макарова Г.Д. Гидрологические и гидрохимические основы продуктивности Азовского моря. М: Пищ. пром., 1979. 288 с.
15. Завьялов И.Б., Осадчиев А.А., Завьялов П.О., Кременецкий В.В., Гончаренко И.В. Исследование водообмена в Керченском проливе по историческим данным и данным контактных измерений 2019 г. // Океанология. 2021. Т. 61. № 3. С. 377–386. <https://doi.org/10.31857/S0030157421030199>
16. Жукова С.В., Шишкин В.М., Карманов В.Г., Бурлачко Д.С., Подмарева Т.И., Лутынская Л.А., Тарадина Е.А. Водно-экологические проблемы Азовского моря как трансграничного водного объекта и пути их решения // Трансграничные водные объекты: использование, управление, охрана. Сб. мат. Всеросс. научно-практической конф. (Сочи, 20–25 сентября 2021 г.). Новочеркасск: Лик, 2021. С. 137–143.
17. Михайлов В.Н., Михайлова М.В. Влияние многолетних изменений морских факторов на устья рек // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 4. С. 367–379.
18. Тютюнов Ю.В., Сенина И.Н., Титова Л.И., Дашкевич Л.В. Оправдался ли долгосрочный прогноз риска вымирания азовского судака? // Биофизика. 2020. Т. 65. № 2. С. 390–401.

NEW STATE OF THE HYDROLOGICAL REGIME OF THE SEA OF AZOV IN THE XXI CENTURY

S. V. Berdnikov^{a,#}, L. V. Dashkevich^a, and V. V. Kulygin^a

^a*Federal Research Centre “The Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences”, Rostov-on-Don, Russian Federation*

[#]*E-mail: berdnikov@ssc-ras.ru*

Presented by Academician of the RAS G.G. Matishov October 15, 2021

The article examines the dynamics of the Sea of Azov state during the XX–early XXI centuries. The main factors that form the sea hydrological regime are presented. It was revealed that the current state of the Sea of Azov, a significant positive anomaly of water temperature and salinity, was not previously noted in the history of the its study. An increase in the standard deviation of the mean annual series of water salinity and temperature was noted which may indicate an increase in the variability of these characteristics in the modern period.

Keywords: Sea of Azov, climatic changes, water temperature, water salinity