

# АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

Научная статья

УДК 551.468:551.582(262.54)

EDN: QPFZZT

## Причины стремительного роста солености воды Азовского моря в XXI веке

С. В. Бердников , В. В. Кулыгин, Л. В. Дашкевич

*Федеральный исследовательский центр Южный научный центр  
Российской академии наук (ЮНЦ РАН), Ростов-на-Дону, Россия*

*berdnikovsv@yandex.ru*

Поступила в редакцию 03.03.2023; одобрена после рецензирования 06.04.2023;  
принята к публикации 06.09.2023.

### *Аннотация*

*Цель.* При обсуждении осолонения Азовского моря как в 1970-е гг., так и в современный период в качестве основной его причины указывается сокращение речного стока, прежде всего реки Дон, и, как следствие, усиление адвекции черноморских вод. Однако одного этого фактора оказывается недостаточно для объяснения снижения солености в последней четверти XX в. и ее стремительного роста в 2007–2020 гг. Цель настоящей работы – оценка вклада в изменение солености Азовского моря составляющих водного баланса за более чем 50 лет (1966–2020 гг.).

*Методы и результаты.* Для расчета среднегодовой солености Азовского моря используется математическая модель водно-солевого баланса. Рассмотрена изменчивость всех компонентов водного баланса и источники ее неопределенности. Показано, что используемая модель устойчива к вариации входных данных. На основе проведенного корреляционного анализа установлено, что в период осолонения наряду с речным стоком важную роль играет испарение. При этом в 1970-е гг. определяющее воздействие на величину испарения оказывала скорость ветра, а в начале XXI в. – температурно-влажностный режим.

*Выводы.* Причиной стремительного роста солености воды Азовского моря в начале XXI в. стало длительное маловодье, совпавшее с периодом роста температуры воды и воздуха и, как следствие, с повышением испарения с акватории. При этом для значительного снижения солености вод в условиях изменения атмосферных процессов в регионе только перехода от маловодного периода речного стока к многоводному в бассейне Азовского моря может быть недостаточно. Это следует учитывать при подготовке планов адаптации хозяйственной деятельности к климатическим изменениям.

**Ключевые слова:** Азовское море, соленость воды, водный баланс, математическая модель, климатические изменения, испарение

**Благодарности:** публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. проекта 122013100131-9. При выполнении работ использовалось оборудование ЦКП ЮНЦ РАН «Объединенный центр научно-технологического оборудования ЮНЦ РАН (исследование, разработка, апробация)».

**Для цитирования:** Бердников С. В., Кулыгин В. В., Дашкевич Л. В. Причины стремительного роста солености воды Азовского моря в XXI веке // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 6. С. 760–778. EDN QPFZZT.

© Бердников С. В., Кулыгин В. В., Дашкевич Л. В., 2023

## Reasons for Rapid Increase of Water Salinity in the Sea of Azov in the 21st Century

S. V. Berdnikov , V. V. Kulygin, L. V. Dashkevich

Federal Research Centre The Southern Scientific Centre of Russian Academy of Sciences (SSC RAS),  
Rostov-on-Don, Russia  
 berdnikovsv@yandex.ru

*Purpose.* When discussing the Sea of Azov salinization both in the 1970s and in the current period, the reduction of river runoff (primarily in the Don River) is indicated as the main reason for this phenomenon that results in the increased advection of the Black Sea waters. However, this factor alone is not enough to explain salinity decrease in the last quarter of the 20th century as well as its rapid growth in 2007–2020. The paper is purposed at assessing the contribution of water balance components to the change in the Azov Sea salinity for more than 50 years (1966–2020).

*Methods and Results.* A mathematical model of water-salt balance is used to assess the annual average salinity of the Sea of Azov. The variability of all the water balance components and the sources of its uncertainty are considered. It is shown that the model applied is resistant to variation of the input data. Based on the correlation analysis, it is found that during the salinization period, evaporation plays an important role along with the river runoff. At that in the 1970s, a decisive impact upon evaporation was exerted by the wind speed, whereas at the beginning of the 21st century – by the temperature and humidity regimes.

*Conclusions.* At the beginning of the 21st century, the reason for rapid salinity increase in the Azov Sea waters consisted in the prolonged period of low-water in rivers coinciding with the period of high water and air temperatures that resulted in an increase of evaporation from the sea surface. The obtained results permit to conclude that at the changed atmospheric processes in the region, the only factor consisting in transition from the low river inflows to the Azov Sea basin to the high ones may be not enough to provide significant decrease of seawater salinity. This circumstance should be taken into account when preparing the plans for adapting the economic activities to the climate changes.

**Keywords:** Sea of Azov, water salinity, water balance, mathematical model, climatic changes, evaporation

**Acknowledgments:** The study was carried out within the framework of state assignment of SSC RAS, project No. 122013100131-9, using the equipment of the “Joint Science and Technology Equipment Center of SSC RAS (research, development, testing)”.

**For citation:** Berdnikov, S.V., Kulygin, V.V. and Dashkevich, L.V., 2023. Reasons for Rapid Increase of Water Salinity in the Sea of Azov in the 21st Century. *Physical Oceanography*, 30(6), pp. 714-730.

### Введение

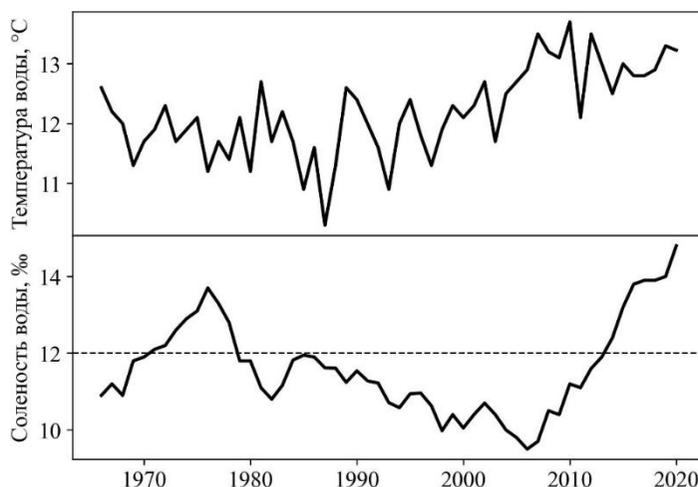
Среди океанологических факторов, играющих организующую роль в формировании физико-химического и биологического облика Азовского моря, соленность занимает ведущее место, поскольку ее изменения вызывают особенно быстрые и глубокие деформации самых различных его абиотических и биотических компонентов<sup>1</sup>.

В 2007–2019 гг. экосистема моря по комплексу гидрологических показателей перешла в состояние, которое не наблюдалось за период инструментальных наблюдений [1]. В первом десятилетии XXI в. увеличилась средняя по

---

<sup>1</sup> Бронфман А. М., Хлебников Е. П. Азовское море: основы реконструкции. Л. : Гидрометеоиздат, 1985. 270 с.

мору годовая температура воды на фоне относительно низкой солености вод, затем в условиях маловодья на Дону (а потом и на Кубани) начался стремительный рост солености при незначительном снижении среднегодовой температуры вод (рис. 1).



**Р и с. 1.** Динамика среднегодовых осредненных по морю значений температуры и солености вод Азовского моря

**Fig. 1.** Dynamics of annual sea-averaged values of water temperature and salinity in the Sea of Azov

На протяжении всего периода инструментальных наблюдений среднегодовая соленость вод Азовского моря находилась в диапазоне от 9,3 до 14 ‰, при этом можно было наблюдать чередование периодов с низкими (периоды 1924–1935, 1945–1949, 1993–2010 гг.), средними (1936–1940, 1950–1971, 1979–1992 гг.) и высокими (1972–1978 гг., с 2011 г. по настоящее время) значениями.

Периоды осолонения до строительства и ввода в эксплуатацию Цимлянского водохранилища в 1953 г. были кратковременными, чередуясь с продолжительными пресными фазами. Однако начавшаяся в конце 1960-х гг. очередная фаза пониженной увлажненности бассейна привела к экстремальным значениям солености вод Азовского моря в 1972–1978 гг. (до 13,8 ‰ в 1976 г.)<sup>2</sup>.

Проблемы роста солености Азовского моря и совпавшее по времени падение уровня Каспийского моря привлекли большое внимание, обсуждались и изучались проекты переброски части стока северных рек в бассейны Волги и Дона, строительства сооружений для регулирования водного обмена с Черным морем в Керченском проливе, а также между Таганрогским заливом и центральной частью моря – в районе косы Долгой (см., например, работы<sup>1, 3</sup> [2]).

После 1980 г. соленость моря начала снижаться и достигла к 2006 г. 9,5 ‰. В это же время начал расти уровень Каспийского моря [3]. Таким

<sup>2</sup> Бронфман А. М., Дубинина В. Г., Макарова Г. Д. Гидрологические и гидрохимические основы продуктивности Азовского моря. М. : Пищ. Пром-сть, 1979. 288 с.

<sup>3</sup> Рациональное использование водных ресурсов бассейна Азовского моря: Математические модели / И. И. Ворович [и др.]. М. : Наука, 1981. 360 с.

образом, обозначенные выше проблемы разрешились сами собой, работа над проектами переброски стока северных рек на юг была свернута в 1986 г. Одновременно с этим резко сократились программы экспедиционных исследований в Азовском море [4].

Длительное распреснение Азовского моря (1979–2006 гг.) объясняли периодичностью в многолетних колебаниях атмосферной циркуляции [5, 6].

В 2007 г. произошло резкое переключение в динамике солёности моря и начался новый период осолонения. Стартовав с очень низкого значения (меньше 10 ‰), солёность непрерывно росла, превысив в 2020 г. 14 ‰ [7], что является историческим максимумом.

При изучении причин осолонения моря в 1972–1978 гг. основной акцент делался на уменьшении речного стока, дефицит которого компенсировался притоком черноморских вод. При этом авторы работы [8, с. 110] со ссылкой на монографию <sup>1</sup> отмечают, что «особенностью водного баланса Азовского моря является второстепенное значение влагообмена с атмосферой и существенная зависимость приходных и расходных частей баланса от водообмена с Черным морем и антропогенного преобразования стока рек в море». При обсуждении осолонения моря после 2007 г. в качестве основной его причины также указывается сокращение речного стока, прежде всего р. Дон, и усиление адвекции черноморских вод [7, 9].

Цель настоящей работы – рассмотреть вклад в изменение солёности Азовского моря всех составляющих водного баланса за более чем 50 лет (1966–2020 гг.). Такой выбор периода исследования обусловлен тем, что этот отрезок времени, во-первых, наиболее полно обеспечен данными непрерывных наблюдений на береговых гидрометеостанциях, во-вторых, охватывает оба периода сильного осолонения Азовского моря.

### Материалы и методы

Материалами для исследования являются общедоступная океанографическая база данных по Азовскому морю для периода 1924–2012 гг. [10, 11], дополненная результатами экспедиционных работ Южного научного центра РАН за 2013–2020 гг. [12, 13]. Среднегодовые осредненные по акватории моря значения солёности рассчитаны согласно [14].

Источниками данных многолетних прибрежных наблюдений на морских гидрометеорологических станциях (ГМС) Азовского моря послужили Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО <sup>4</sup>) и общедоступная база данных ВНИИГМИ-МЦД <sup>5</sup>. Использовалась информация о температуре и относительной влажности воздуха, скорости ветра, величине атмосферных осадков, температуре воды и уровне моря.

В работе использованы опубликованные в изданиях Государственного водного кадастра данные о ежедневных расходах воды на гидропостах станция Раздорская (р. Дон), хутор Тиховский и хутор Зайцево Колено (р. Кубань), с. Слободка (рукав Протока).

<sup>4</sup> URL: <http://portal.esimo.ru/portal> (дата обращения: 24.03.2022).

<sup>5</sup> URL: <http://meteo.ru> (дата обращения: 29.03.2022).

## Математическая модель водного и солевого баланса Азовского моря

Для расчета водного баланса рассмотрена следующая математическая модель:

$$\Delta V(t+1, t) = V(t+1) - V(t) = Sq \cdot \Delta h(t+1, t) = Q_{riv} + Q_{prec} + Q_{BA} - Q_{eva} - Q_{AB}, \quad (1)$$

где  $\Delta V(t+1, t)$  – изменение объема моря, км<sup>3</sup>/год;  $V(t+1)$  – объем Азовского моря на конец года  $t$ , км<sup>3</sup>;  $V(t)$  – объем Азовского моря на начало года  $t$ , км<sup>3</sup>;  $t$  – номер года;  $Sq$  – площадь Азовского моря, 38 тыс./км<sup>2</sup> [15];  $\Delta h(t+1, t)$  – изменение среднего уровня моря, м/год;  $Q_{riv}$  – приток речных вод, км<sup>3</sup>/год;  $Q_{prec}$  – осадки на акваторию, км<sup>3</sup>/год;  $Q_{eva}$  – испарение, км<sup>3</sup>/год;  $Q_{BA}$  – приток воды из Черного моря, км<sup>3</sup>/год;  $Q_{AB}$  – отток воды в Черное море, км<sup>3</sup>/год. Все потоки заданы в промежутке от  $t$  до  $t+1$ .

Водообмен между Азовским морем и заливом Сиваш не рассматривается.

Оценка среднегодовой солёности Азовского моря выполняется на основе модели баланса солей:

$$\begin{aligned} M(t+1) &= M(t) + S_B \cdot Q_{BA} - k \cdot S(t+1) \cdot Q_{AB}, \\ M(t) &= S(t) \cdot V(t), \end{aligned} \quad (2)$$

$$S(t+1) = \frac{M(t+1)}{V(t+1)} = \left( \frac{S(t) \cdot V(t) + S_B \cdot Q_{BA}}{V(t+1) + k \cdot Q_{AB}} \right),$$

$$S_A = \frac{S(t+1) + S(t)}{2},$$

где  $M(t+1)$  – запас солей в Азовском море на конец года, млн тонн;  $M(t)$  – запас солей в Азовском море на начало года, млн тонн;  $S(t+1)$  – средняя солёность моря в конце года, ‰;  $S(t)$  – средняя солёность моря в начале года, ‰;  $S_B$  – солёность черноморских вод, ‰;  $k$  – параметр, отражающий тот факт, что вода, вытекающая из Азовского моря в Черное, имеет солёность больше, чем средняя величина по морю;  $S_A$  – среднегодовая средняя солёность Азовского моря, ‰.

Солёность черноморских водных масс, поступающих в Азовское море, принята равной 18 ‰. Параметр  $k$  рассматривался в качестве калибровочного.

В уравнении баланса солей (2) обмен с заливом Сиваш также не учитывается.

Для оценки межгодовой динамики уровня Азовского моря  $\Delta h$  за рассматриваемый период (1966–2020 гг.) принят следующий подход. Для каждой береговой ГМС, обеспеченной данными измерения уровня моря, рассчитаны среднегодовые значения. Далее выполнено усреднение по всем ГМС и получена оценка среднего уровня моря в каждом году.

Поступление пресных вод в Азовское море определяется в основном стоком рек Дон и Кубань (около 95 %). Для оценки годового стока речных вод в море использованы данные наблюдений за расходом воды в станице Раздорской (замыкающий створ на р. Дон, 1966–2020 гг.) и хуторе Тиховском (расположен перед вершиной дельты р. Кубани и отделением рукава Протока, 1966–

2005 гг.). В 2006 г. в вершине дельты р. Кубани был построен Тиховский низконапорный гидроузел, который искусственно распределяет сток воды р. Кубани между рукавами Кубань и Протока, а также магистральным каналом Петровско-Анастасиевской оросительной системы. Поэтому для периода 2006–2020 гг. в качестве стока р. Кубани использовалась сумма расходов воды в двух пунктах: хутор Зайцево Колено (рукав Кубань), с. Слободка (рукав Протока). При расчете суммарного годового речного стока не учитывается боковая приточность и водопотребление на участках ниже указанных створов рек Дон и Кубань. Данные о годовом стоке малых рек в Азовское море за 1966–1985 гг. взяты из [16], для последующего периода использовалось значение 1,5 км<sup>3</sup>/год.

Для расчета атмосферных осадков использованы данные наблюдений на четырех береговых ГМС: Таганрог, Приморско-Ахтарск, Геническ, Керчь. В настоящее время выполняется работа по уточнению методики расчета осадков, выпадающих на акваторию Азовского моря, по данным береговых ГМС и спутниковым радарным снимкам [17], но для рассматриваемого периода такой ряд отсутствует. Значения суммарного за год слоя осадков по четырем береговым ГМС были усреднены для расчета среднего годового слоя осадков над морем. Объем осадков получен умножением этого значения на площадь моря.

Для расчета испарения с акватории Азовского моря использованы рекомендации <sup>6</sup> и формула

$$q_{\text{eva}} = 0,14 \cdot n \cdot (e(T_w) - f \cdot e(T_a)) \cdot (1 + 0,72 \cdot U), \quad (3)$$

где  $q_{\text{eva}}$  – испарение с водной поверхности, мм/мес;  $n$  – число дней в месяце;  $e(T_w)$  – давление насыщенного водяного пара на высоте 2 м от поверхности воды при температуре воды  $T_w$ , гПа;  $e(T_a)$  – давление насыщенного водяного пара на высоте 2 м от поверхности воды при температуре воздуха  $T_a$ , гПа;  $f$  – относительная влажность воздуха;  $U$  – скорость ветра на высоте 2 м от поверхности воды, м/с.

Давление насыщенного водяного пара рассчитывается по температуре  $T$  (°C) по формуле Магнуса

$$e(T) = 6,1 \cdot 10^{\frac{7,45T}{(235+T)}}.$$

Среднесуточные значения температуры воды и воздуха, скорости ветра и относительной влажности воздуха для акватории моря в целом рассчитывались по данным шести береговых ГМС: Таганрог, Ейск, Приморско-Ахтарск, Кубанская устьевая, Геническ, Бердянск – в соответствии с подходом, предложенным в [18]. Затем рассчитывались значения  $e(T_a)$  и  $e(T_w)$  и усреднялись в пределах месяца. С учетом средней за месяц относительной влажности рассчитывался дефицит влажности воздуха и по формуле (3) – испарение за месяц. Годовая величина испарения суммировалась для месяцев, когда не было ледового покрова. Таким образом, при оценке испарения не учитывались зимние месяцы, а также рекомендованные работой <sup>6</sup> поправки, связанные с трансформацией скорости ветра и влажности воздуха над водной поверхностью.

<sup>6</sup> Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л. : Гидрометеоиздат, 1969. 84 с.  
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 39 № 6 2023 765

Расчет водообмена с Черным морем через Керченский пролив выполнен по формулам, обоснованным в работе [16, с. 99]:

$$Q_{BA} = \frac{42,6}{1,014^F}, \quad Q_{AB} = 41,4 \cdot 1,01^F, \quad (4)$$

где  $F = Q_{riv} + Q_{prec} - Q_{eva}$ .

Кроме этого, дополнительно выполнена оценка оттока воды в Черное море  $Q_{AB}$  по уравнению водного баланса (1):

$$Q_{AB} = Q_{riv} + Q_{prec} + Q_{BA} - Q_{eva} - \Delta V(t+1, t). \quad (5)$$

Для учета существующих погрешностей (которые подробнее будут описаны ниже) в оценке компонентов водного баланса Азовского моря рассмотрена следующая схема вычислительных экспериментов.

К значениям компонентов водного баланса базового варианта расчета (таблица) добавляется шум по следующему правилу:

$$Q = Q + Q \cdot \xi \cdot cv = Q \cdot (1 + \xi \cdot cv),$$

где  $Q$  – один из варьируемых компонентов водного баланса (осадки, речной сток, испарение, приток воды из Черного моря, изменение объема воды в море);  $cv$  – коэффициент вариации соответствующего компонента водного баланса;  $\xi$  – случайная величина, равномерно распределенная в интервале  $(-0,5; +0,5)$ .

В результате получается новый набор данных, в котором компоненты водного баланса отклонены от базового варианта в одну из сторон не более чем на половину коэффициента вариации, рассчитанного по исходному ряду. С помощью модели (2) получена динамика средней солености моря в 1966–2020 гг. При этом для сохранения водного баланса отток воды из Азовского моря  $Q_{AB}$  определяется по уравнению (5).

Всего выполнено 1000 генераций динамики компонентов водного баланса. По результатам этой серии экспериментов для средней солености моря рассчитаны среднее, максимальное и минимальное значения.

Для оценки связи между компонентами водного баланса, а также факторами, их определяющими, и соленостью Азовского моря использовался корреляционный анализ. Для пар годовых временных серий рассчитывался выборочный коэффициент корреляции Пирсона и определялась его статистическая значимость. Чтобы исследовать изменение этих связей во времени, коэффициенты корреляции рассчитывались в пределах скользящего окна заданного размера.

Размер окна не должен быть слишком маленьким, так как рассматриваемые ряды получаются слишком короткими, что скажется на значении и значимости коэффициента корреляции. С другой стороны, размер окна ограничен сверху длиной исходного ряда (в нашем случае это 55 годовых значений с 1966 по 2020 г.). Итоговый размер окна выбран равным примерно половине исходного ряда: 30 годам. Таким образом, сначала корреляционный анализ выполняется для периода 1966–1995 гг., затем для 1967–1996 гг. и т. д. до 1991–2020 гг.

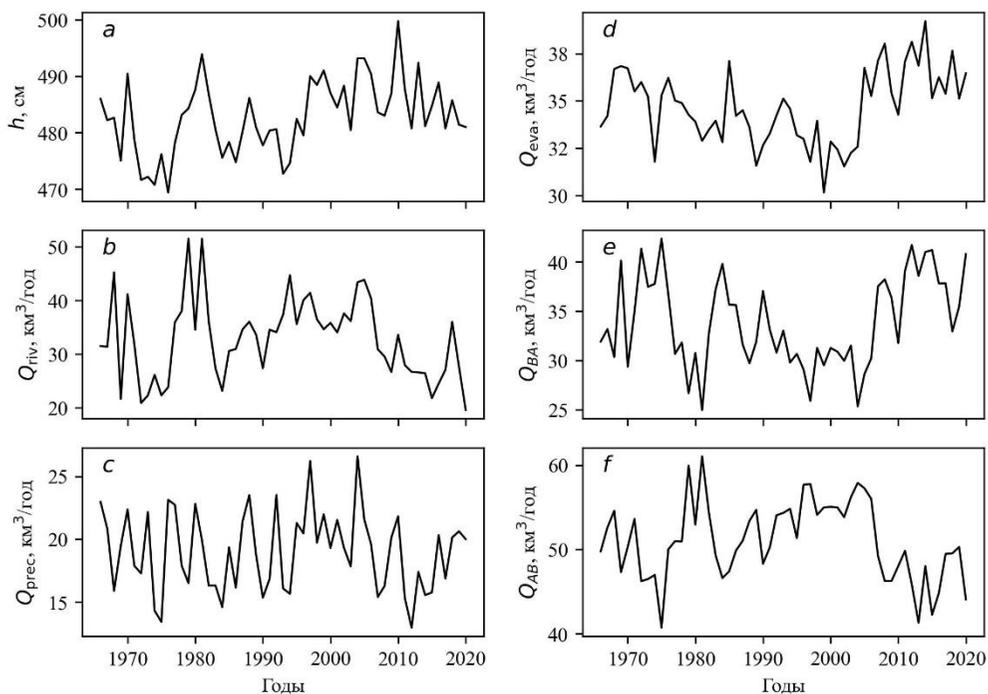
**Изменение элементов водного баланса (км<sup>3</sup>/год) и средней солености  
Азовского моря (‰)  $S$  по модели и  $S_{obs}$  по [1]  
Changes of water balance components (km<sup>3</sup>/year) and average salinity (‰)  $S$  of the Sea of Azov  
based on the results of modeling and field observations  $S_{obs}$  [1]**

| Год / Year | $\Delta V$ | $Q_{riv}$ | $Q_{prec}$ | $Q_{eva}$ | $Q_{BA}$ | $Q_{AB}$ | $S_{obs}$ | $S$  |
|------------|------------|-----------|------------|-----------|----------|----------|-----------|------|
| 1966       | 2,9        | 31,5      | 23,0       | 33,6      | 31,9     | 49,8     | 10,9      | 10,9 |
| 1967       | -1,4       | 31,4      | 20,8       | 34,2      | 33,2     | 52,6     | 11,2      | 11,0 |
| 1968       | 0,2        | 45,2      | 15,9       | 36,7      | 30,3     | 54,6     | 10,9      | 10,7 |
| 1969       | -2,9       | 21,7      | 19,5       | 36,8      | 40,1     | 47,3     | 11,8      | 11,4 |
| 1970       | 5,8        | 41,1      | 22,4       | 36,7      | 29,4     | 50,3     | 11,9      | 11,0 |
| 1971       | -4,4       | 31,8      | 17,9       | 35,5      | 35,0     | 53,6     | 12,1      | 11,2 |
| 1972       | -2,7       | 20,9      | 17,3       | 36,0      | 41,3     | 46,2     | 12,2      | 11,9 |
| 1973       | 0,2        | 22,3      | 22,2       | 35,2      | 37,5     | 46,5     | 12,6      | 12,2 |
| 1974       | -0,5       | 26,1      | 14,3       | 31,8      | 37,8     | 47,0     | 12,9      | 12,4 |
| 1975       | 2,1        | 22,3      | 13,4       | 35,3      | 42,3     | 40,7     | 13,1      | 13,0 |
| 1976       | -2,6       | 23,8      | 23,1       | 36,2      | 36,7     | 50,0     | 13,7      | 13,1 |
| 1977       | 3,3        | 35,9      | 22,7       | 35,0      | 30,7     | 51,0     | 13,3      | 12,6 |
| 1978       | 1,9        | 38,0      | 17,9       | 34,9      | 31,8     | 50,9     | 12,8      | 12,2 |
| 1979       | 0,4        | 51,5      | 16,5       | 34,3      | 26,7     | 59,9     | 11,8      | 11,4 |
| 1980       | 1,2        | 34,5      | 22,8       | 33,9      | 30,8     | 52,9     | 11,8      | 11,2 |
| 1981       | 2,4        | 51,5      | 19,9       | 32,9      | 25,0     | 61,0     | 11,1      | 10,4 |
| 1982       | -2,7       | 36,1      | 16,3       | 33,5      | 32,7     | 54,4     | 10,8      | 10,5 |
| 1983       | -2,4       | 27,3      | 16,3       | 34,0      | 37,2     | 49,3     | 11,2      | 10,9 |
| 1984       | -1,9       | 23,1      | 14,6       | 32,8      | 39,8     | 46,6     | 11,8      | 11,5 |
| 1985       | 1,1        | 30,6      | 19,4       | 37,1      | 35,6     | 47,4     | 12,0      | 11,7 |
| 1986       | -1,4       | 31,0      | 16,1       | 34,2      | 35,6     | 49,9     | 11,9      | 11,8 |
| 1987       | 2,1        | 34,6      | 21,4       | 34,5      | 31,6     | 51,0     | 11,6      | 11,6 |
| 1988       | 2,3        | 36,0      | 23,5       | 33,6      | 29,7     | 53,4     | 11,6      | 11,2 |
| 1989       | -2,0       | 33,6      | 18,8       | 31,6      | 31,9     | 54,7     | 11,2      | 11,1 |
| 1990       | -1,2       | 27,4      | 15,3       | 32,7      | 37,0     | 48,3     | 11,5      | 11,5 |
| 1991       | 1,0        | 34,5      | 16,8       | 33,3      | 33,1     | 50,2     | 11,3      | 11,4 |
| 1992       | 0,1        | 34,1      | 23,5       | 34,2      | 30,8     | 54,1     | 11,2      | 11,2 |
| 1993       | -3,0       | 37,4      | 16,1       | 35,1      | 33,0     | 54,3     | 10,7      | 11,2 |
| 1994       | 0,7        | 44,7      | 15,7       | 34,6      | 29,8     | 54,8     | 10,6      | 10,9 |
| 1995       | 3,0        | 35,6      | 21,3       | 33,2      | 30,7     | 51,3     | 10,9      | 10,7 |
| 1996       | -1,1       | 40,0      | 20,5       | 33,0      | 29,1     | 57,7     | 11,0      | 10,4 |
| 1997       | 4,0        | 41,4      | 26,2       | 31,8      | 25,9     | 57,8     | 10,6      | 9,9  |
| 1998       | -0,6       | 36,5      | 19,7       | 34,0      | 31,3     | 54,1     | 10,0      | 9,9  |
| 1999       | 1,0        | 34,6      | 22,0       | 30,2      | 29,5     | 55,0     | 10,4      | 9,8  |
| 2000       | -1,5       | 35,8      | 19,3       | 32,9      | 31,3     | 55,0     | 10,1      | 9,8  |
| 2001       | -1,0       | 34,0      | 21,5       | 32,4      | 30,9     | 55,0     | 10,4      | 9,8  |
| 2002       | 1,5        | 37,6      | 19,3       | 31,5      | 30,0     | 53,8     | 10,7      | 9,8  |
| 2003       | -3,0       | 36,1      | 17,8       | 32,3      | 31,5     | 56,2     | 10,4      | 9,8  |
| 2004       | 4,8        | 43,4      | 26,6       | 32,6      | 25,3     | 57,9     | 10,0      | 9,3  |
| 2005       | 0,0        | 43,8      | 21,6       | 36,8      | 28,6     | 57,3     | 9,8       | 9,2  |
| 2006       | -1,1       | 40,4      | 19,6       | 35,3      | 30,2     | 56,0     | 9,5       | 9,3  |
| 2007       | -2,6       | 30,9      | 15,4       | 37,1      | 37,5     | 49,2     | 9,7       | 9,9  |
| 2008       | -0,2       | 29,5      | 16,3       | 38,0      | 38,2     | 46,3     | 10,5      | 10,5 |
| 2009       | 1,5        | 26,7      | 20,1       | 35,4      | 36,4     | 46,2     | 10,4      | 10,9 |
| 2010       | 4,9        | 33,6      | 21,8       | 34,3      | 31,8     | 48,0     | 11,2      | 10,8 |
| 2011       | -4,6       | 27,9      | 15,3       | 37,1      | 39,1     | 49,8     | 11,1      | 11,4 |
| 2012       | -2,6       | 26,7      | 13,0       | 38,1      | 41,7     | 45,9     | 11,6      | 12,0 |
| 2013       | 4,4        | 26,6      | 17,4       | 36,9      | 38,6     | 41,3     | 11,9      | 12,4 |
| 2014       | -4,3       | 26,4      | 15,6       | 39,2      | 41,0     | 48,0     | 12,4      | 12,9 |
| 2015       | 1,4        | 21,8      | 15,8       | 35,1      | 41,2     | 42,2     | 13,2      | 13,3 |
| 2016       | 1,6        | 24,5      | 20,3       | 36,3      | 37,8     | 44,8     | 13,8      | 13,4 |
| 2017       | -3,1       | 27,1      | 16,9       | 35,4      | 37,8     | 49,5     | 13,9      | 13,5 |
| 2018       | 1,9        | 36,0      | 20,1       | 37,7      | 32,9     | 49,5     | 13,9      | 13,2 |
| 2019       | -1,6       | 27,7      | 20,6       | 35,1      | 35,5     | 50,3     | 14,0      | 13,1 |
| 2020       | -0,2       | 19,6      | 20,0       | 36,5      | 40,8     | 44,1     | 14,8      | 13,5 |

Результат этой процедуры отображался на графике изменения коэффициента корреляции по времени с отметкой его значимости для конкретного периода. Значение коэффициента на графике отнесено к концу периода, т. е. каждая точка читается как характеристика связи двух факторов за предшествующие 30 лет. Уровень значимости при проведении анализа выбран равный 0,05.

### Результаты и обсуждение

**Изменение уровня и объем Азовского моря.** В период с 1993 по 2021 г. средний уровень вод на большей части Мирового океана повысился (см. карту, представленную в [19, с. 11]), в некоторых океанических бассейнах он поднялся на 15–20 см. Вместе с тем «перенос» изменений уровня вод Мирового океана во внутренние моря является довольно сложным и недостаточно изученным, так как знания о водном балансе морей ограничены и не определен количественно водообмен между некоторыми морями и океанами [20]. При этом эвстатическое повышение уровня Азовского моря во второй половине XX в. оценивается в 2 мм/год.



**Р и с. 2.** Динамика уровня Азовского моря (*a*) и элементов его водного баланса: речного стока  $Q_{riv}$  (*b*), осадков  $Q_{prec}$  (*c*), испарения  $Q_{eva}$  (*d*), притока воды из Черного моря  $Q_{BA}$  (*e*), оттока воды в Черное море  $Q_{AB}$  (*f*)

**Fig. 2.** Dynamics of the Azov Sea level (*a*) and the components of its water balance: river discharge  $Q_{riv}$  (*b*), precipitation  $Q_{prec}$  (*c*), evaporation  $Q_{eva}$  (*d*), water inflow from the Black Sea  $Q_{BA}$  (*e*), and water outflow to the Black Sea  $Q_{AB}$  (*f*)

Если сравнивать уровень Азовского моря в начале XX в. по измерениям на ГМС с его современным положением в первых десятилетиях XXI в., то разница составляет примерно 15 см (рис. 2, *a*). Чтобы оценить, насколько верна

такая оценка, требуется отдельное исследование, выходящее за рамки данной статьи. Вместе с тем изменения объема моря могут быть оценены и использованы при расчетах (таблица). По нашим оценкам, ежегодное изменение объема моря в 1966–2020 гг. варьирует от  $-4,6$  до  $5,8$  км<sup>3</sup>. Как правило, после резкого увеличения объема моря на следующий год следует такое же уменьшение (например, 1970–1971, 2010–2011, 2013–2014 гг. в таблице). При этом среднее изменение объема близко к нулю. Это подтверждает мнение авторов работы [20], что водный баланс окраинных морей в большой степени влияет на изменение их уровня и обусловленные изменением уровня Мирового океана тенденции нельзя напрямую экстраполировать на Азовское море.

**Речной сток.** С 2007 г. наблюдается длительный период маловодья на Нижнем Дону, прерванный половодьем в 2018 г. При этом в 2019 г. проблемы с водообеспечением уже отмечались и на Дону, и в бассейне Кубани. Вместе с тем в 2007–2020 гг. объем пресных вод, поступающих в море, в среднем примерно такой же, как и в предыдущий период осолонения (1972–1978 гг.). Однако по длительности текущее маловодье продолжительнее (таблица, рис. 2, *b*). Следует отметить, что в период с 1978 по 2006 г., когда соленость Азовского моря уменьшалась, не наблюдалось сильного увеличения речного стока (только дважды он достигал  $\sim 51$  км<sup>3</sup>/год (в 1979 и 1981 гг.) при среднем значении  $36,7$  км<sup>3</sup>/год). При этом в 2018 г., самом многоводном после 2006 г., сток составил  $36,0$  км<sup>3</sup>/год.

**Осадки.** Атмосферные осадки – важнейший фактор формирования речного стока и водного баланса Азовского моря и самая противоречивая характеристика климатической изменчивости. В результате перестройки климата в конце XX – начале XXI в. было отмечено увеличение годовой суммы осадков относительно первой половины прошлого века (на западном и южном побережьях моря примерно на 130 мм, на восточном – около 70 мм) при увеличении variability их количества от года к году [21]. Положительный тренд атмосферных осадков в период 1891–1995 гг. показан в работе [22]. По мнению авторов работы [23], с 1979 по 2010 г. годовое количество осадков увеличилось на 54 мм. В настоящее время положительная тенденция на юге России сохраняется для весеннего сезона при снижении количества осадков летом<sup>7</sup>. На побережье Азовского моря после 2010 г. наблюдается некоторое снижение годового количества осадков (особенно на востоке), в основном за счет уменьшения их количества летом и осенью [21] (таблица, рис. 2, *c*).

Изменчивость атмосферных осадков существенно меньше, чем материкового стока, и определяется в большей степени циклическими вариациями глобальной атмосферной циркуляции [5, 24]. Отмечается, что «амплитуда межгодовых колебаний осадков составляет  $11,0$ – $14,4$  км<sup>3</sup>,  $\sigma = 2,8$ – $2,9$  км<sup>3</sup>» [8, с. 122]. В рассматриваемый нами период рассчитанные ежегодные объемы осадков колебались от  $13,0$  до  $26,6$  км<sup>3</sup>,  $\sigma = 3,2$  км<sup>3</sup>, медиана равна  $19,3$  км<sup>3</sup> (таблица).

---

<sup>7</sup> Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. М. : Росгидромет, 2019. 79 с.

При этом в 2007–2020 гг. на акваторию моря выпадало меньше осадков, чем ранее, – в среднем 17,8 (13,0–21,8) км<sup>3</sup>/год. В первый же период осолонения моря в среднем поступало 18,7 (13,4–23,1) км<sup>3</sup>/год.

По мнению авторов работы [8, с. 122] со ссылкой на [25], «учитывая небольшие размеры моря и густую, относительно равномерную наблюдательную сеть, интерполяционная погрешность определения осадков, выпавших на поверхность Азовского моря, не должна быть высока, особенно в годы с преобладанием циклонического их генезиса. С учетом погрешностей измерений осадков, в основном устраняемых введением соответствующих поправок, а также ошибок пространственной интерполяции, погрешность оценки среднегодовых величин осадков составляет (с вероятностью 67 %) 1,15 км<sup>3</sup> или 8 %».

**Испарение.** В работе [8, с. 122–123] отмечается, что «значительная сложность определения водообмена через проливы не позволяет находить испарение как остаточный член уравнения водного баланса». При этом погрешность определения среднегодовых величин испарения на основе полуэмпирических формул оценивается в 1,35 км<sup>3</sup>. В величине испарения для 1923–2000 гг. [8] отмечают тенденцию к уменьшению, которую объясняют региональными особенностями климатических изменений в последние 30 лет, связанными с уменьшением средней скорости ветра над акваторией Азовского моря [26] и увеличением облачности в летний сезон [8, с. 123].

Расчитанный объем испарения с водной поверхности Азовского моря представлен в таблице и на рис. 2, *d*. При сопоставлении расчетных величин с данными, представленными в таблицах водного баланса Азовского моря [16], за 1966–1985 гг. можно видеть, что среднее значение испарения по расчетам выше на 1,3 км<sup>3</sup>/год (34,7 против 33,4 км<sup>3</sup>/год), изменяется от 30,2 до 39,2 км<sup>3</sup>/год против 25,8–36,8 км<sup>3</sup>/год, амплитуда межгодовых колебаний в 1,5 раза меньше, стандартное отклонение тоже. Эти различия связаны с резким уменьшением испарения, представленного в монографии [16], в 1977–1980 гг.

Отрицательный тренд испарения прослеживается с начала 1980-х гг. вплоть до конца XX в. И связано это с уменьшением скорости ветра в азовском регионе. С начала XXI в. при сохранении низкой скорости ветра в связи с ростом температуры воздуха и температуры воды резким уменьшением относительной влажности воздуха испарение стало увеличиваться и возросло с 32 до 38 км<sup>3</sup>/год к 2011–2012 гг. (таблица и рис. 2, *d*).

Следует отметить, что расчет испарения по формуле (3) с использованием данных береговых ГМС приводит к погрешностям. В работах по их оценке (например, в [27]) приводятся значения, равные ~ 20–25 %, обычно в сторону занижения величины испарения над водоемом. Для исправления этих систематических погрешностей используются косвенные методы. Например, в [16] используется допущение, что в открытом море испарение пропорционально его значениям в прибрежной зоне и может быть определено через модульные коэффициенты (отношение среднегодовых значений к среднемноголетнему). Среднемноголетнее значение в открытом море при этом рассчитывается по архивным судовым наблюдениям. Однако ввиду малого объема современных

синхронных судовых наблюдений обновить среднемноголетнее значение в открытом море трудно. По данным расчетов, за рассматриваемый период оно составило  $34,7 \text{ км}^3/\text{год}$ , что почти совпадает со значением  $34,6 \text{ км}^3/\text{год}$ , указанным в [16] как среднее за 1923–1985 гг. Поэтому использование модульных коэффициентов относительно этого среднего почти не изменит результаты. Кроме того, для оценки испарения в открытом море могут быть использованы реанализы, однако в настоящей работе для подготовки входной информации рассматривались только данные прямых измерений.

**Водообмен через Керченский пролив.** В работе [8] выполнен подробный анализ методов и подходов к оценке величин водного обмена Азовского и Черного морей и трудностей, которые с этим связаны. В качестве примера можно отметить тот факт, что в 1991 г. в одном издательстве под редакцией специалистов ГОИН были изданы два справочника по Азовскому [16] и Черному [28] морям. Оба справочника содержат таблицы водного баланса соответствующих водоемов для 1924–1985 гг. При этом объемы потоков воды из Азовского моря в Черное и обратно в этих двух изданиях значительно различаются. Если сравнить объемы притока воды в Азовское море за 1966–1985 гг., представленные в этих справочниках, то мы получаем соответственно  $38,0 (27,1–47,5)$  и  $33,3 (28,9–39,8) \text{ км}^3/\text{год}$ , т. е. в среднем справочник по Черному морю занижает приток черноморских вод на  $4,7 \text{ км}^3/\text{год}$ . Соответственно примерно на такую же величину завышается отток вод в Черное море:  $46,6 (35,2–71,2)$  против  $50,6 (41,8–68,9) \text{ км}^3/\text{год}$ . Это связано с разными эмпирическими формулами, принятыми для расчета водного обмена через Керченский пролив.

При сравнении методов расчета водообмена через Керченский пролив по [16] и [28] было обнаружено, что расчет оттока воды в Черное море по формулам из обоих справочников приводит к примерно одинаковым значениям. А расчет притока воды из Черного моря по формулам из [28] имеет очень низкую вариабельность. Так, среднеквадратичное отклонение за период 1966–2020 гг. для оттока воды в Черное море по [16] и [28] составило  $4,83$  и  $4,80 \text{ км}^3/\text{год}$  соответственно, а для притока воды из Черного моря –  $4,57$  и  $0,91 \text{ км}^3/\text{год}$ . Нет оснований считать, что одни и те же условия перемещения вод в проливе дают высокую межгодовую изменчивость оттока вод в Черное море, при этом сохраняя низкую изменчивость притока вод в Азовское море. Поэтому принятые в настоящей работе формулы (4) для расчетов водного обмена через пролив соответствуют справочнику [16] для периода зарегулированного стока. С их помощью был рассчитан приток водных масс из Черного моря, а отток воды из Азовского рассчитан по уравнению водного баланса (5) (таблица, рис. 2, *e* – *f*).

Если сравнивать между собой два периода осолонения (1972–1978 гг. и 2007–2020 гг.), то приток черноморских вод примерно одинаков:  $40,3 (35,4–48,0)$  и  $41,0 (35,4–45,3) \text{ км}^3/\text{год}$  соответственно. Поэтому повышенная адвекция вод из Черного моря в ответ на изменение пресноводного баланса не может быть единственной причиной столь стремительного роста солености в современное время. В длительный период распреснения (1979–2006 гг.) приток черноморской воды был в среднем на  $6 \text{ км}^3/\text{год}$  меньше при сохранении межгодовой изменчивости –  $34,3 (27,7–42,5) \text{ км}^3/\text{год}$ .

В недавно опубликованной работе [29] представлены оценки оттока водных масс из Азовского моря за 1981–2019 гг., которые получены с применением нового подхода, основанного на спутниковых данных (см. описание метода в работе [30]). По мнению авторов этой статьи, формирование водообмена через пролив в основном связано с локальными гидрометеорологическими процессами.

Мы сопоставили представленные в статье оценки годового оттока азовских вод в Черное море с рассчитанными в настоящей работе. При близких средних значениях имеются значительные различия в вариабельности межгодовой изменчивости – 56,0 (28,0–82,0) км<sup>3</sup>/год в работе [29] против 55,3 (45,7–63,9) км<sup>3</sup>/год в настоящей работе, стандартное отклонение больше более чем в три раза — 13,1 против 4,2 км<sup>3</sup>/год. Однако если использовать объемы вытекающей в Черное море воды по данным из [29] в уравнении водного баланса (5), то иногда появляются чрезвычайно малые и чрезвычайно большие объемы компенсационного притока черноморских вод (например, 5,2 км<sup>3</sup>/год в 1989 г., 4,4 км<sup>3</sup>/год в 2004 г., 62,2 км<sup>3</sup>/год в 1984 г., 65,4 км<sup>3</sup>/год в 2018 г.), которые ранее никогда в литературе не отмечались. Физическое объяснение такой сильной межгодовой вариации водообмена отсутствует.

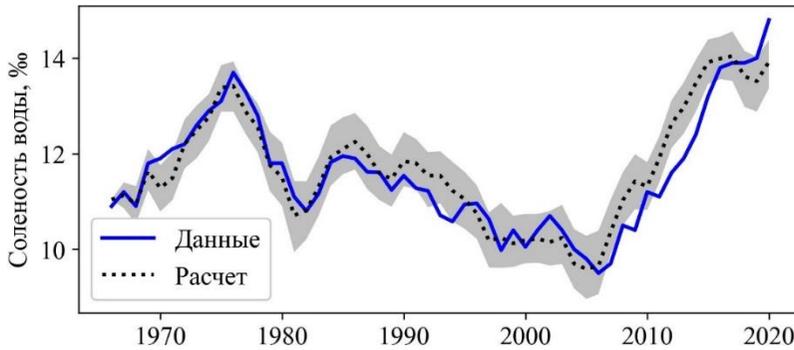
**Динамика средней солености моря.** Расчетная среднегодовая средняя по акватории моря соленость в сопоставлении с оценками  $S_{obs}$ , полученными в результате осреднения данных наблюдений [1], представлена в таблице. В расчетах использовалось значение калибровочного параметра  $k$ , равное 1,04. В целом модель (1)–(2) воспроизводит наблюдаемое изменение средней солености моря, повышение солености в первый период осолонения, последующее уменьшение солености моря с 1976 по 2006 г. и стремительный рост солености начиная с 2007 г. по настоящее время.

Результаты моделирования показывают, что рост солености в 2007–2020 гг. связан не только с длительным маловодьем на Дону, но и с климатическими процессами: потеплением, усилением дефицита влажности в регионе и, как следствие, с ростом испарения с акватории. Интересно, что рост испарения в регионе отмечают и авторы работы<sup>8</sup>, представившие водный баланс Цимлянского водохранилища с 2000 по 2018 г. Так, испарение с акватории водохранилища увеличилось с 2130 до 2780 млн м<sup>3</sup>/год, т. е. на 30 %, при том что в отдельные годы из-за недостаточного наполнения водохранилища площадь его зеркала сокращалась.

Результаты серии вычислительных экспериментов расчета средней солености моря с добавлением случайных погрешностей к компонентам водного баланса представлены на рис. 3. Видно, что модель (1)–(2) отражает изменчивость режима солености и сохраняет основные тенденции при вариации внешних факторов. Это позволяет говорить о правомерности получаемых выводов даже при применении других методов определения элементов водного баланса, отличных от использованных в этой работе, если разница между ними укладывается в величину заданных погрешностей.

---

<sup>8</sup> Научно-прикладной справочник: Основные гидрологические характеристики водных объектов бассейна реки Дон. СПб. : Свое издательство, 2020. 262 с.



**Р и с. 3.** Сравнение средней солености Азовского моря по данным наблюдений [1] с результатами серии экспериментов (линия соответствует среднему значению, серая область – диапазону от минимальных до максимальных значений)

**F i g. 3.** Comparison of the sea-averaged salinity of the Sea of Azov based on observations [1] with the results of a series of experiments (line corresponds to the average value, gray area – to the range of values from minimum to maximum ones)

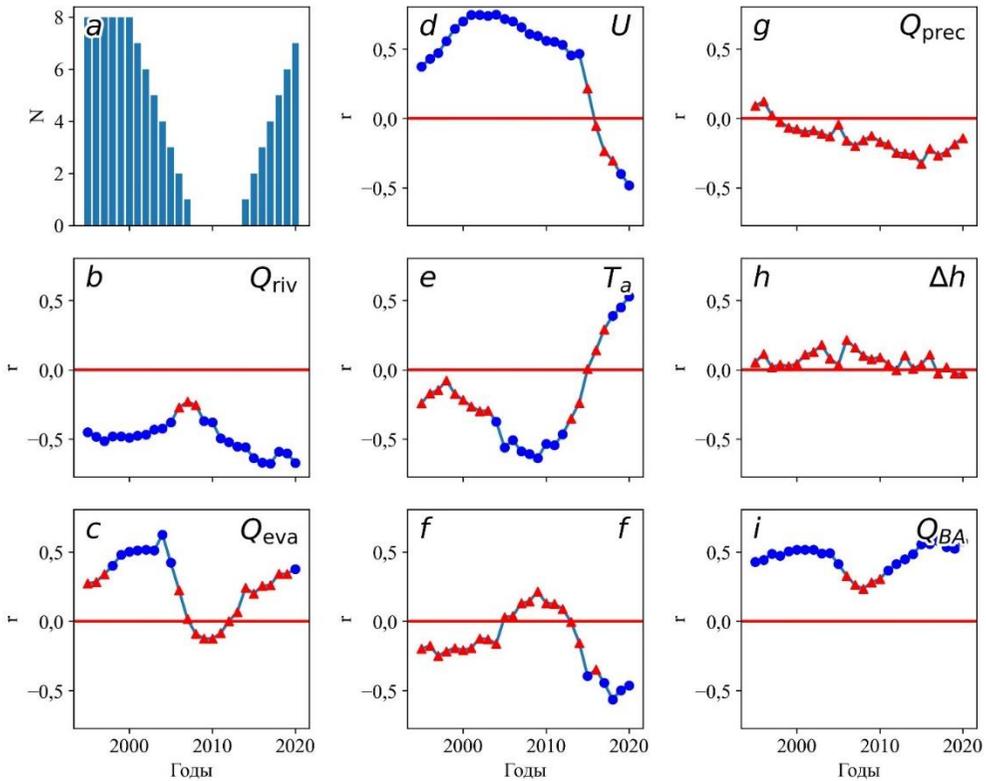
Для облегчения интерпретации результатов корреляционного анализа и графиков изменения коэффициентов корреляции во времени построена гистограмма количества лет с высокой соленостью (более 12 ‰), попавших в соответствующее скользящее окно (рис. 4, *a*). Это позволяет определить, насколько сильно конкретная точка на временном графике коэффициентов корреляции характеризует период с высокой соленостью. Можно выделить три периода: I) скользящие окна, захватывающие годы осолонения в 1970-х; II) окна, охватывающие последующие годы распреснения моря, и III) окна, содержащие годы осолонения в начале XXI в.

Для первого периода имеет место значимая отрицательная корреляционная связь солености моря с речным стоком (рис. 4, *b*) и значимая положительная связь с испарением (рис. 4, *c*) и скоростью ветра (рис. 4, *d*). Причем к началу периода осолонения 1970-х гг. наблюдается рост абсолютных значений коэффициентов корреляции всех трех указанных параметров, а к концу этого периода – спад. При этом амплитуда изменения коэффициента корреляции для речного стока мала, а для испарения и скорости ветра значительна.

Во втором периоде, соответствующем распреснению моря, корреляционная связь с речным стоком (рис. 4, *b*) и испарением (рис. 4, *c*) перестает быть значимой. При этом сохраняется достаточно сильная положительная связь со скоростью ветра (рис. 4, *d*) и становится значимой отрицательная связь с температурой воздуха и воды (на рис. 4, *e* приведен только график для температуры воздуха, так как график для температуры воды почти полностью его повторяет).

На третьем, современном этапе осолонения восстанавливается значимость связи солености с речным стоком (рис. 4, *b*), при этом абсолютные значения коэффициента корреляции немного выше, чем в первый период. Под конец третьего периода, когда в скользящее окно попадет все больше лет с высокой

соленостью, становится значимой связь со скоростью ветра (рис. 4, *d*) и температурой воздуха/воды (рис. 4, *e*), однако знак связи для этих зависимостей меняется на противоположный по сравнению с предшествующими периодами. Дополнительно появляется значимая отрицательная связь с относительной влажностью (рис. 4, *f*) и начинает расти значимость испарения (рис. 4, *c*).



**Р и с. 4.** Гистограмма количества лет  $N$  с высокой соленостью Азовского моря (более 12 ‰), попавших в соответствующее скользящее окно (*a*), и динамика изменения коэффициентов корреляции  $r$  между соленостью и следующими характеристиками: речным стоком  $Q_{riv}$  (*b*); испарением  $Q_{eva}$  (*c*), скоростью ветра  $U$  (*d*), температурой воздуха  $T_a$  (*e*), относительной влажностью  $f$  (*f*), осадками  $Q_{prec}$  (*g*), изменением уровня моря  $\Delta h$  (*h*), притоком воды из Черного моря  $Q_{BA}$  (*i*). Значимые коэффициенты корреляции отмечены синим кружком, незначимые – красным треугольником

**F i g. 4.** Histogram of a number of years  $N$  with high salinity in the Sea of Azov (more than 12‰) that fell into the corresponding moving window (*a*), and dynamics of variation of the correlation coefficients  $r$  between salinity and the following characteristics: river discharge  $Q_{riv}$  (*b*); evaporation  $Q_{eva}$  (*c*), wind speed  $U$  (*d*), air temperature  $T_a$  (*e*), relative humidity  $f$  (*f*), precipitation  $Q_{prec}$  (*g*), change of sea level  $\Delta h$  (*h*) and water inflow from the Black Sea  $Q_{BA}$  (*i*). Statistically significant correlation coefficients are marked with blue circles, insignificant ones – with red triangles

Что касается других компонентов водного баланса, то корреляционная связь солености Азовского моря с осадками (рис. 4, *g*) и изменением уровня моря (рис. 4, *h*) всегда низка и незначима.

В силу формул (4) потоки водообмена с Черным морем функционально зависят от речного стока, поэтому форма графиков и значения коэффициентов корреляции у них повторяются с точностью почти до знака. На рис. 4, *i* приведен график притока черноморских вод, а график оттока азовских вод почти полностью идентичен графику речного стока (рис. 4, *b*).

В результате проведенного анализа получено, что соленость Азовского моря сильно связана с величиной речного стока в периоды осолонения, при этом в фазу распреснения эта связь ослабевает. В оба периода осолонения важную роль также играет испарение с тем различием, что в первом периоде определяющее воздействие оказывала скорость ветра, а во втором – температурно-влажностный режим.

Таким образом, высокая скорость роста солености воды Азовского моря в начале XXI в. может быть объяснена двумя факторами. Во-первых, это продолжительный период маловодья, когда недостаток воды текущего года постепенно усугублялся накапливающимся дефицитом прошлых лет. Во-вторых, это наблюдавшийся в то же время повышенный температурный фон, приведший к росту испарения с водной поверхности. Детальная оценка роли этих двух факторов требует дополнительных исследований.

Относительно основных движущих факторов в период распреснения меньше ясности: видно, что роль как речного стока, так и испарения снижается. При этом остается высокой связь солености со скоростью ветра и температурой воздуха/воды. Поскольку в этот период непосредственная корреляционная связь с испарением слабая, то нельзя достоверно утверждать, что ветер и температура посредством него влияют на соленость. Малое влияние испарения в период распреснения можно объяснить разнонаправленными воздействиями определяющих его факторов, компенсирующими друг друга (так падение скорости ветра приводило к снижению испарения, а рост температуры – к его увеличению).

Кроме того, можно предположить, что отрицательная связь солености моря с температурой носит случайный характер, отражая тот факт, что период падения солености Азовского моря совпал с периодом роста как глобальных, так и региональных температур, но причины этих процессов могут быть разные.

Поскольку связь солености с величиной пресного баланса в период распреснения низкая, возможно, в этот период было усилено влияние водообмена с Черным морем. Проверить это в рамках предложенной модели нельзя в связи с функциональной зависимостью водообмена по формулам (4).

### **Выводы**

После экстремального повышения в 1976 г. среднегодовой средней для Азовского моря солености до 13,8 ‰ она начала снижаться вплоть до 2006 г. и достигла уровня 9,5 ‰, а затем опять стала увеличиваться, причем темпами более быстрыми, чем в период предыдущего осолонения моря в 1965–1976 гг. В 2020 г. соленость моря превысила 14 ‰ и продолжает расти.

Одной из основных причин осолонения Азовского моря после 2007 г. является маловодье на Дону (и частично в бассейне Кубани), которое продолжается уже более 15 лет. Однако одного этого фактора недостаточно для объяснения как снижения солености в последней четверти XX в., так и стремительного роста в 2007–2020 гг.

С применением математической модели водного и солевого баланса Азовского моря, в рамках которой водоем рассматривался как единый водный объект, для среднегодовых значений показано, что в оба периода осолонения важную роль играет испарение, но при этом в первый период определяющее воздействие оказывала скорость ветра, а во второй – температурно-влажностный режим.

Основываясь на сказанном выше, можно предположить, что смена маловодного периода на многоводный в регионе Азовского моря может быть недостаточной причиной для значительного уменьшения солености вод в условиях потепления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бердников С. В., Дашкевич Л. В., Кулыгин В. В. Новое состояние гидрологического режима Азовского моря в XXI веке // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 503, № 1. С. 65–70. EDN REQVQV. <https://doi.org/10.31857/S2686739722030057>
2. Использование математической модели экосистемы Азовского моря для исследования закономерностей функционирования и структуры системы / И. И. Воронич [и др.] // Доклады АН СССР. 1981. Т. 259, № 2. С. 302–306.
3. Матишов Д. Г., Яцкая Н. А., Бердников С. В. Изменение температуры и солености вод Каспийского моря в XX веке // Океанология. 2018. Т. 58, № 6. С. 864–874. EDN DTGSQM. <https://doi.org/10.1134/S0030157418060114>
4. Информационная основа для нового климатического атласа Азовского моря / Н. Н. Дьяков [и др.] // Труды Государственного океанографического института. 2022. Вып. 223. С. 33–48. EDN BWZVZF.
5. Гаргона Ю. М. Современное распределение Азовского моря и его связь с многолетними колебаниями атмосферной циркуляции // Водные ресурсы. 2002. Т. 29, № 6. С. 747–754.
6. Матишов Г. Г., Матишов Д. Г., Гаргона Ю. М. Климатогенные изменения экосистем южных морей в условиях антропогенных воздействий // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2008. № 3. С. 26–34. EDN INMKCT.
7. Водно-экологические проблемы Азовского моря как трансграничного водного объекта и пути их решения / С. В. Жукова [и др.] // Трансграничные водные объекты: использование, управление, охрана : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. г. Сочи, 20–25 сентября 2021 г. Новочеркасск : Лик, 2021. С. 137–143.
8. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 1. Азовское море / Ю. П. Ильин [и др.]. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. 400 с.
9. Матишов Г. Г., Григоренко К. С. Причины осолонения Таганрогского залива // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477, № 1. С. 92–96. EDN ZRWDNJ. <https://doi.org/10.7868/S086956521731019X>
10. Climatic atlas of the Sea of Azov 2008 / G. Matishov, S. Levitus (Eds.). Washington, D. C. : U.S. Government Printing Office, 2008. 148 p. (NOAA Atlas NESDIS 65).
11. Atlas of climatic changes in nine large marine ecosystems of the northern hemisphere (1827–2013). Washington, D.C. : U.S. Government Printing Office, 2014. 131 p. (NOAA Atlas NESDIS 78). <https://doi.org/10.7289/V5Q52MK5>

12. *Матишов Г. Г., Степаньян О. В.* Научно-исследовательское судно «Денеб»: 10 лет морских научных исследований // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 6. С. 548–555. EDN YPUYXZ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-6-548-555>
13. *Матишов Г. Г., Григоренко К. С.* Динамический режим Азовского моря в условиях осолонения // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 492, № 1. С. 107–112. EDN IOCNCJ. <https://doi.org/10.31857/S268673972005014X>
14. *Дашкевич Л. В., Бердников С. В., Кулыгин В. В.* Многолетнее изменение средней солёности Азовского моря // Водные ресурсы. 2017. Т. 44, № 5. С. 563–572. EDN ZDQIKH. <https://doi.org/10.7868/S0321059617040046>
15. *Крыленко В. В., Крыленко М. В., Алейников А. А.* Уточнение длины береговой линии Азовского моря с использованием данных спутников Sentinel-2 // Вестник СГУГиТ. 2019. Т. 24, № 4. С. 78–92. EDN SQDLTH. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2019-24-4-78-92>
16. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 5. Азовское море. СПб. : Гидрометеоздат, 1991. 236 с.
17. *Евстигнеев В. П., Мишин Д. В., Остроумова Л. П.* Расчет количества выпадающих на поверхность Азовского моря осадков как составляющей его водного баланса // Метеорология и гидрология. 2018. № 8. С. 39–52. EDN LZRJVB.
18. *Дашкевич Л. В., Кулыгин В. В.* Оценка средней температуры поверхностного слоя Азовского моря на основе данных спутниковой съемки и наблюдений прибрежных гидрометеостанций // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий : материалы Международной конференции. М. : Издательство Московского университета, 2019. Т. 25, ч. 2. С. 112–120. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-2-25-112-120>
19. Copernicus sea level space observations: A basis for assessing mitigation and developing adaptation strategies to sea level rise / J.-F. Legeais [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2021. Vol. 8. 704721. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.704721>
20. *Михайлов В. Н., Михайлова М. В.* Влияние многолетних изменений морских факторов на устья рек // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 4. С. 367–379. <https://doi.org/10.7868/S0321059615040082>
21. *Дашкевич Л. В.* Долговременные тенденции в изменениях метеопараметров региона Азовского моря // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2020. Т. 1, № 5. С. 130–137. <https://doi.org/10.23885/2500-395X-2020-1-5-130-137>
22. *Лурье П. М., Панов В. Д.* Влияние изменений климата на гидрологический режим р. Дон в начале XXI столетия // Метеорология и гидрология. 1999. № 4. С. 90–97. EDN XBPNSP.
23. *Костяной А. Г., Гинзбург А. И., Лебедев С. А.* Климатическая изменчивость гидрометеорологических параметров морей России в 1979–2011 годах // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2014. № 570. С. 50–87. EDN SFYXKT.
24. *Бабкин В. И., Постников А. Н.* О роли циклонической деятельности в формировании стока Волги, Дона и Днепра // Водные ресурсы. 2000. Т. 27, № 1. С. 106–108. EDN HSUCMY.
25. *Шлыгин И. А.* Оценка погрешности расчета составляющих водного баланса Азовского моря // Труды Государственного океанографического института. 1980. Вып. 153. С. 14–23.
26. *Луц Н. В.* Многолетняя изменчивость скорости ветра в Восточном Приазовье // Метеорология и гидрология. 2001. № 2. С. 98–102.
27. *Албул И. П.* Применение формулы ГГИ для расчета испарения с водной поверхности при различном составе исходной информации // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География 2012. Вып. 3. С. 125–136. EDN PCIXIN.
28. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб. : Гидрометеоздат, 1991. 429 с.

29. Исследование водообмена в Керченском проливе по историческим данным и данным контактных измерений 2019 г. / И. Б. Завьялов [и др.] // *Океанология*. 2021. Т. 61, № 3. С. 377–386. EDN MJWWCC. <https://doi.org/10.31857/S0030157421030199>
30. Water exchange between the Sea of Azov and the Black Sea through the Kerch Strait / I. Zaviyalov [et al.] // *Ocean Science*. 2020. Vol. 16, iss. 1. P. 15–30. <https://doi.org/10.5194/os-16-15-2020>

*Об авторах:*

**Бердников Сергей Владимирович**, директор, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Россия, 344006, Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-3095-5532**, **Scopus Author ID: 6601964465**, **ResearcherID: AAR-9246-2020**, **SPIN-код: 8657-0260** **AuthorID: 59994**, [berdnikovsv@yandex.ru](mailto:berdnikovsv@yandex.ru)

**Кулыгин Валерий Валерьевич**, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Россия, 344006, Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0001-9748-6497**, **Scopus Author ID: 24399335100**, **ResearcherID: I-3194-2013**, **SPIN-код: 3657-5016** **AuthorID: 539586**, [kulygin@ssc-ras.ru](mailto:kulygin@ssc-ras.ru)

**Дашкевич Людмила Владимировна**, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Россия, 344006, Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1827-0696**, **Scopus Author ID: 56462913600**, **ResearcherID: I-3497-2013**, **SPIN-код: 2002-6082** **AuthorID: 130359**, [ldashkev@ssc-ras.ru](mailto:ldashkev@ssc-ras.ru)