

Водные биоресурсы и среда обитания
2023, том 6, номер 4, с. 7–30
<http://journal.azniirkh.ru>, www.azniirkh.ru
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online



Aquatic Bioresources & Environment
2023, vol. 6, no. 4, pp. 7–30
<http://journal.azniirkh.ru>, www.azniirkh.ru
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online

Экологические проблемы и состояние водной среды

УДК 551.464:551.16:551.583(262.54)

https://doi.org/10.47921/2619-1024_2023_6_4_7

EDN: WQWANX



ВОЗМОЖНЫЕ СЦЕНАРИИ ФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИКОВОГО СТОКА И СОЛЕННОСТИ ВОД АЗОВСКОГО МОРЯ С УЧЕТОМ СОВРЕМЕННЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕНДЕНЦИЙ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

С. В. Жукова^{1*}, А. В. Мирзоян^{1,2}, **В. М. Шишкин**¹, Т. И. Подмарева¹,
Л. А. Лутынская¹, Е. А. Тарадина¹, Д. С. Бурлачко¹, В. Г. Карманов¹

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»),

¹*Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»), Ростов-на-Дону 344002, Россия*

²*Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»),
Москва 105187, Россия*

*E-mail: zhukovasv@azniirkh.vniro.ru

Аннотация

Введение. Происходящие изменения климата оказывают существенное влияние на формирование условий среды обитания водных биологических ресурсов Азовского моря. Особенно ощутимые преобразования коснулись солености азовоморских вод и материкового стока, роль которых в поддержании экологического благополучия среды обитания водных биологических ресурсов первостепенна. **Актуальность.** Оценка степени влияния происходящих и ожидаемых изменений климата на формирование абиотических параметров экосистемы моря является необходимым условием для планирования успешного развития рыбохозяйственного комплекса бассейна Азовского моря. **Цель** данной работы — оценить современные и ожидаемые изменения гидрометеорологических параметров экосистемы Азовского моря, а также определить наиболее вероятные сценарии изменения солености Азовского моря в зависимости от годовых объемов материкового стока. **Методы.** Используются материалы экспедиционных исследований гидрологического режима Азовского моря за период 1960–2020 гг. из базы данных АзНИИРХ и данные опорной сети Росгидромета. Для анализа данных применены методы математической статистики, графоаналитического построения, картирования и методы аналогии. **Результаты.** В работе дана оценка происшедших изменений гидрологического режима Азовского моря по данным ежегодного мониторинга среды обитания водных биологических ресурсов. Выполнены

предварительные расчеты и представлены новые данные по изменению не охваченных мониторингом параметров уравнения водного баланса моря за последние сорок пять лет. Рассмотрены наиболее вероятные сценарии формирования материкового стока и солёности вод Азовского моря на перспективу до 2030 г. с учетом наблюдаемой тенденции потепления климата. **Выводы.** Влияние климатических и антропогенных факторов способствовало существенным изменениям современного гидрометеорологического режима Азовского моря. Эти изменения в наибольшей степени проявились в повышении температуры воздуха и водной среды, снижении ветровой активности и уменьшении материкового стока, в формировании которого начиная с 2006 г. отмечается затянувшийся маловодный цикл. Дефицит речного стока и возросшие расходы воды на испарение, наряду с прочими факторами, спровоцировали беспрецедентный рост солёности вод Азовского моря, среднегодовое значение которой в 2021 г. достигло рекордно высокого уровня (14,97 ‰). При наиболее вероятном сценарии (60 %) с сохранением маловодного периода и материковым стоком в Азовское море объемом около 22 км³ среднегодовая солёность Азовского моря, включая Таганрогский залив, может достичь значений 15±0,40 ‰ с диапазоном колебаний в собственно море в интервале от 14,5 до 16,5 ‰. Годом-аналогом формирования такой солёности и ее пространственного распределения может служить 2021 г.

Ключевые слова: Азовское море, изменения климата, температура воздуха, температура поверхности моря, испарение с водной поверхности, материковый сток, солёность, водный баланс, уравнение тренда

POSSIBLE SCENARIOS FOR THE FORMATION OF THE CONTINENTAL RUNOFF AND THE SALINITY OF THE AZOV SEA, TAKING INTO ACCOUNT THE CURRENT AND FUTURE TRENDS IN CLIMATE CHANGE

S. V. Zhukova^{1*}, A. V. Mirzoyan^{1,2}, V. M. Shishkin¹, T. I. Podmareva¹,
L. A. Lutynskaya¹, E. A. Taradina¹, D. S. Burlachko¹, V. G. Karmanov¹

Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (FSBSI "VNIRO"),

¹*Azov-Black Sea Branch of the FSBSI "VNIRO" ("AzNIIRKH"), Rostov-on-Don 344002, Russia*

²*Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (FSBSI "VNIRO"), Moscow 105187, Russia*

**E-mail: zhukovasyv@azniirkh.vniro.ru*

Abstract

Introduction. The ongoing climate changes have a significant impact on the formation of the habitat conditions for the aquatic biological resources of the Azov Sea. Salinity of the Azov Sea waters and continental runoff, which role in maintaining the ecological well-being of the habitat of aquatic biological resources is paramount, has underwent particularly noticeable transformations. **Relevance.** Assessment of the degree of influence of ongoing and expected climate changes on the formation of abiotic parameters of the marine ecosystem is a prerequisite for planning the successful development of the fisheries industry of the Azov Sea Basin. The **aim** of this work is to assess the current and expected changes in the hydrometeorological parameters of the Azov Sea ecosystem, as well as to identify the most probable scenarios of changes in the Azov Sea salinity depending on the annual volume of continental runoff. **Methods.** The study is based on the data from AzNIIRKH database for the time range 1960–2020 collected over the course of the expedition surveys examining the Azov Sea hydrological regime and the data of the reference observation network of the Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet). Methods of mathematical statistics, graphoanalytical construction, mapping and analogy have been used for the data analysis. **Results.** This paper assesses the changes in the hydrological regime of the Azov Sea based on the annual monitoring of the habitat of aquatic biological resources. Preliminary calculations have been performed, and new data on the changes in the parameters of the sea water balance equation not covered by monitoring over the past forty-five years have been presented. The most probable formation scenarios for the continental runoff and the Azov Sea water salinity for the future up to 2030 are considered, with the observed trend of climate warming taken into account. **Conclusions.** Both the climatic and anthropogenic factors have contributed to considerable changes in the current hydrometeorological regime of the Azov Sea. These changes have mainly been manifested in an increase in air and water temperatures,

a decrease in wind activity, and in a reduced continental runoff, in the formation of which, since 2006, a prolonged low water content cycle has been observed. The shortage of river runoff and increased water evaporation rate, along with other factors, have induced an unprecedented increase in the Azov Sea salinity, the average annual value of which in 2021 reached a record high (14.97 ‰). In the most probable scenario (60 %) with the continuation of the low water content period and the continental runoff into the Azov Sea of about 22 km³ in volume, the average annual salinity of the Azov Sea, including Taganrog Bay, can reach 15±0.40 ‰ with a variation range from 14.5 to 16.5 ‰ in the sea itself (excluding Taganrog Bay). 2021 can serve as an analogous year in terms of salinity formation and its spatial distribution.

Keywords: Azov Sea, climate change, air temperature, sea surface temperature, evaporation from the water surface, continental runoff, salinity, water balance, trend equation

ВВЕДЕНИЕ

Анализ современных климатических изменений на территории России, связанных, прежде всего, с ростом приземной температуры воздуха, а также оценка их воздействия, в т. ч. на экосистемы южных морей России, даны в Третьем оценочном докладе [1]. Касательно Азовского и Черного морей в этом документе отмечается, что «...увеличение температуры поверхности морей ведет к росту продукции фитопланктона, в том числе его вредоносных видов, и связанных с ними неблагоприятных последствий. На фоне сохраняющейся тенденции регионального потепления происходят изменения в биологических сообществах, сдвиги в структуре пищевых цепей и продуктивности. В настоящее время (период 1991–2020 гг.) повысилась и вероятность экологических неопределенностей и рисков, связанных с использованием водных биологических ресурсов. Согласно климатическим прогнозам, ожидается улучшение условий для доминирования теплолюбивых эвригалинных видов. Мощным драйвером современных изменений экосистем Азовского и Черного морей являются инвазии чужеродных видов. Рост температуры воды в Черном море негативно сказался на состоянии запасов холодолюбивых видов, в том числе шпрота, а после 2011 г. численность базовых промысловых объектов Азовского и Черного морей — бычков, тюльки, азовской хамсы и шпрота — резко сократилась, что негативно сказалось на объеме уловов и состоянии рыбодобычи» [1]. Следует особо отметить, что в условиях установившегося с 2006 г. маловодного цикла в формировании материкового стока Азовского моря, обусловленного действием климатических и антропогенных факторов, активизации процессов испарения (в т. ч. и с водного зеркала Азовского моря) и возникающих сложностей в управлении водными ресурсами Цимлянского и Краснодарского водохранилищ, среднегодовая соленость Азовского мо-

ря достигла рекордно высокого значения (14,97 ‰ в 2021 г.), не имеющего аналогов за весь период документированных определений. Процесс современного осолонения Азовского моря угрожает подорвать устойчивость экосистемы моря, наиболее ценные рыбопромысловые объекты которого не приспособлены к столь серьезным нарушениям условий среды обитания.

В констатирующей части доклада [1] сообщается, что «...при всех рассмотренных межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) сценариях тенденция повышения приземной температуры воздуха будет продолжаться по крайней мере до середины XXI века». Этот вывод учтен при проведении экспертной оценки возможных изменений в режимах формирования материкового стока и солености на перспективу до 2030 г.

Изучению экосистемы Азовского моря посвящено большое количество научных публикаций, подготовленных специалистами Российской академии наук, Росгидромета, Министерства природных ресурсов экологии, Федерального агентства по рыболовству и др. Результаты этих исследований были использованы при подготовке ряда Справочников по гидрометеорологическому режиму [2–6].

Цель настоящей работы — оценить современные и ожидаемые изменения гидрометеорологических параметров экосистемы Азовского моря, а также определить наиболее вероятные сценарии изменения солености Азовского моря в зависимости от годовых объемов материкового стока.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для характеристики современных климатических изменений в бассейне Азовского моря использованы данные экспедиционных исследований Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ») (далее АзНИИРХ) за период 1960–2020 гг., которые проводятся в рамках выполнения

Государственного задания Федерального агентства по рыболовству (ФАР) с целью осуществления мониторинга условий среды обитания водных биологических ресурсов Азовского моря. Ежегодные экспедиционные исследования выполняются весной (апрель), летом (июль–август) и осенью (октябрь) по 34 стандартным станциям. Данные мониторинга температуры воздуха и воды, атмосферных осадков, скорости ветра, упругости водяного пара, стока рек Дон и Кубань, осуществляемого береговыми гидрометеорологическими станциями (ГМС) Азовского моря и гидрологическими постами (р. Дон — станция Раздорская и р. Кубань — г. Краснодар), получены в соответствии с двусторонними договорами с подразделениями Северо-Кавказского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СК УГМС). Также использованы общедоступные данные интернет-ресурсов [7, 8]. Методические аспекты проведения гидрологических работ в морях, определения солености воды и расчета ее значений средневзвешенным методом (с учетом весовых районных коэффициентов объемов Таганрогского залива и собственно моря) изложены в работах [9–11].

Расчеты элементов уравнения водного баланса Азовского моря произведены в основном с сохранением методической преемственности в соответствии с [12, 13].

Учитывая, что последствия повышения температуры приземного слоя атмосферы в наибольшей степени проявились в период 1976–2020 гг. [1], на указанный период сделаны отдельные акценты при оценке изменчивости атмосферных осадков, температуры воздуха и воды. Для анализа и визуализации данных использованы графоаналитические, математико-статистические методы и методы аналогии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Современные тенденции изменения климата в бассейне Азовского моря

Температуры воздуха и поверхности моря. Ледовые условия

Об изменении температуры воздуха в бассейне Азовского моря за период 1976–2020 гг. позволяют судить графики ее среднегодового хода, построенные по данным береговых ГМС (рис. 1). Тенденции роста температуры воздуха в бассейне Азовского моря описываются уравнениями (табл. 1),

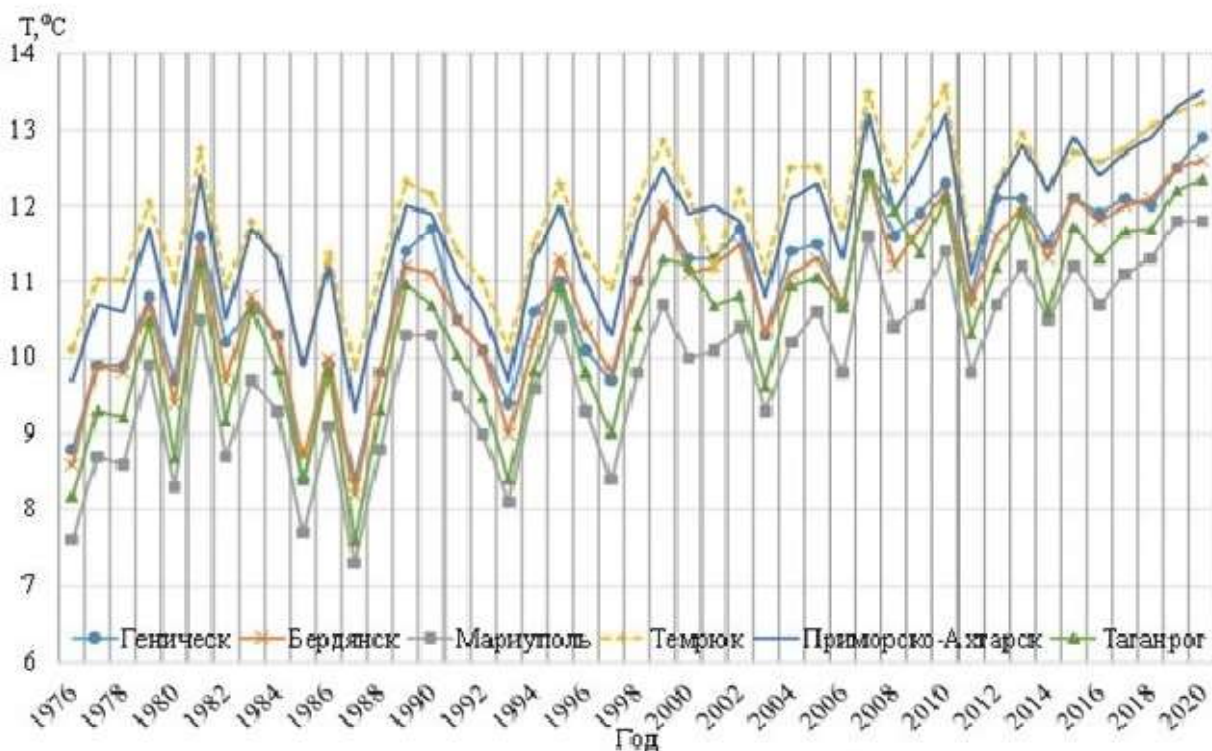


Рис. 1. Изменение среднегодовой температуры воздуха по данным прибрежных ГМС Азовского моря за период 1976–2020 гг.

Fig. 1. Change in the average annual air temperature based on the data collected at the coastal hydrometeorological stations in the Azov Sea, 1976–2020

Таблица 1. Уравнения трендов среднегодовой температуры воздуха. Сравнение среднемноголетних величин среднегодовой температуры воздуха по периодам — до 1975 г. и в 1976–2020 гг. — по данным прибрежных ГМС Азовского моря, °С

Table 1. Trend equations for the average annual air temperature. Comparison of the average annual values of the average annual air temperature by two time ranges—before 1975 and in 1976–2020—based on the data collected at the coastal hydrometeorological stations in the Azov Sea, °C

ГМС HMS	Уравнение тренда Trend equation	R ²	Периоды наблюдений за температурой воздуха Time ranges of the air temperature observations	Средние значения температуры по периодам Average temperature values by time ranges	Прирост температуры Temperature increase
Геническ Henichesk	$y=0,06x+9,5$	0,56	1884–1975 1976–2020	10,1 10,9	0,8
Бердянск Verdyansk	$y=0,06x+9,4$	0,56	1951–1975 1976–2020	10,1 10,8	0,7
Мариуполь Mariupol	$y = 0,07x+8,3$	0,58	1900–1975 1976–2020	11,1 11,9	1,0
Темрюк Temryuk	$y=0,05x+0,7$	0,45	1921–1975 1976–2020	11,1 11,9	0,8
Приморско-Ахтарск Primorsko-Akhtarsk	$y=0,06x+10,3$	0,50	1928–1975 1976–2020	11,1 11,9	0,8
Таганрог Taganrog	$y=0,07x+8,9$	0,52	1883–1975 1976–2020	9,3 10,5	1,2

из которых следует, что темпы ее повышения за период 1976–2020 гг. варьировали от 0,05 (Темрюк) до 0,07 °С/год (Таганрог и Мариуполь). В этой же таблице приведены оценки роста температуры воздуха (0,7–1,2 °С) относительно предшествующего (до 1976 г.) периода. При анализе сезонной изменчивости среднемесячных температур воздуха за указанный период (по данным прибрежных ГМС) установлено, что наибольший рост температур отмечался в зимние и весенние месяцы.

С повышением температуры воздуха хорошо согласуется рост температуры поверхности моря (ТПМ). Отмеченное по данным экспедиционных исследований АзНИИРХ повышение средней температуры воды Азовского моря в период 1960–2022 гг. характеризуется темпами роста 0,04 °С/год (апрель и июль–август) и 0,05 °С/год (октябрь). За более короткий временной интервал 1976–2020 гг. угловые коэффициенты уравнений трендов возросли до 0,07–0,08 °С/год (соответственно, апрель и октябрь) и 0,05 °С/год в летний период.

Отмеченный рост среднегодовой температуры воды в прибрежных районах моря (за период 1976–2020 гг.) в соответствии с уравнениями трен-

дов (рис. 2) составлял 0,05 °С/год в Таганрогском заливе и на юге моря (ГМС Таганрог и Темрюк) и 0,06 °С/год в восточной части моря (ГМС Приморско-Ахтарск). Эти выводы согласуются с оценками изменений температуры воздуха и воды, данными в работах [14–16].

Визуализация среднемесячных значений температуры воды по данным ГМС Темрюк за период 1924–2022 гг., представляющая «поле» внутригодового распределения температуры (рис. 3), демонстрирует изменение сроков начала и продолжительности временных интервалов с относительно высокой температурой. Так, если в период 1920–1960 гг. ТПМ со значениями 21–24 °С (и выше) отмечалась, как правило, с третьей декады мая по третью декаду августа, то, начиная с 70-х гг. XX в., указанный температурный диапазон наблюдался с середины мая по первую декаду сентября. За последние сорок лет на 2–3 недели возросла продолжительность временного интервала с ТПМ в диапазоне 24–27 °С (с конца мая – начала июня до второй декады августа), а в период осеннего охлаждения Азовского моря расширились до конца ноября границы «ареала» температуры в градациях 18–12 °С (рис. 3).

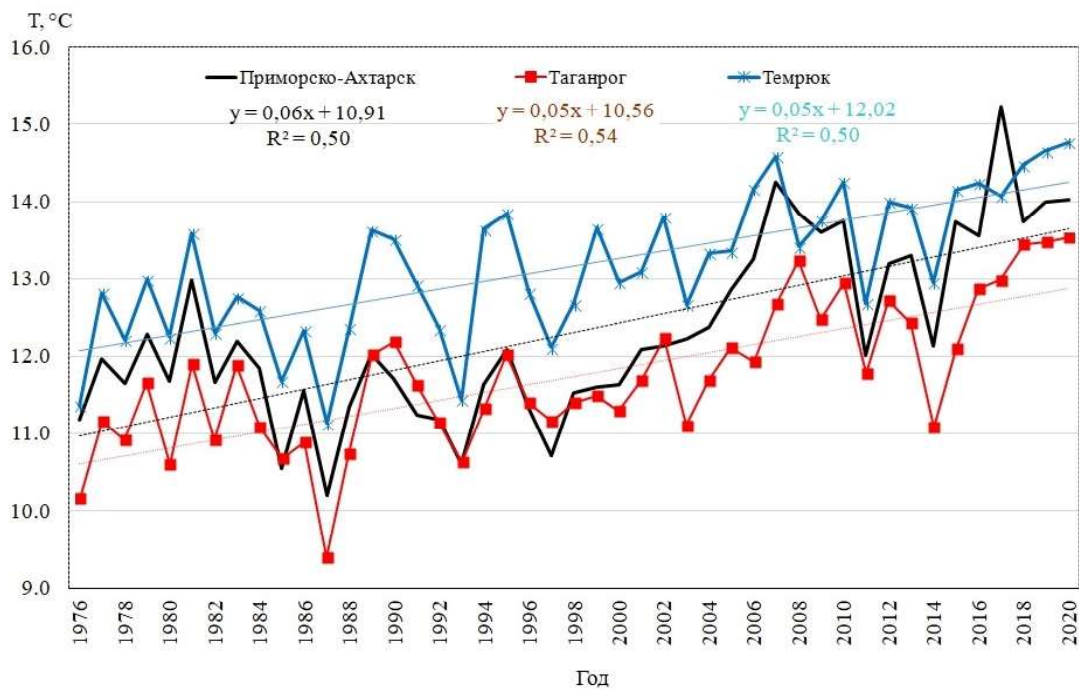


Рис. 2. Изменение среднегодовой температуры воды по данным прибрежных ГМС Азовского моря за период 1976–2020 гг.

Fig. 2. Change in the average annual water temperature based on the data collected at the coastal hydrometeorological stations in the Azov Sea, 1976–2020

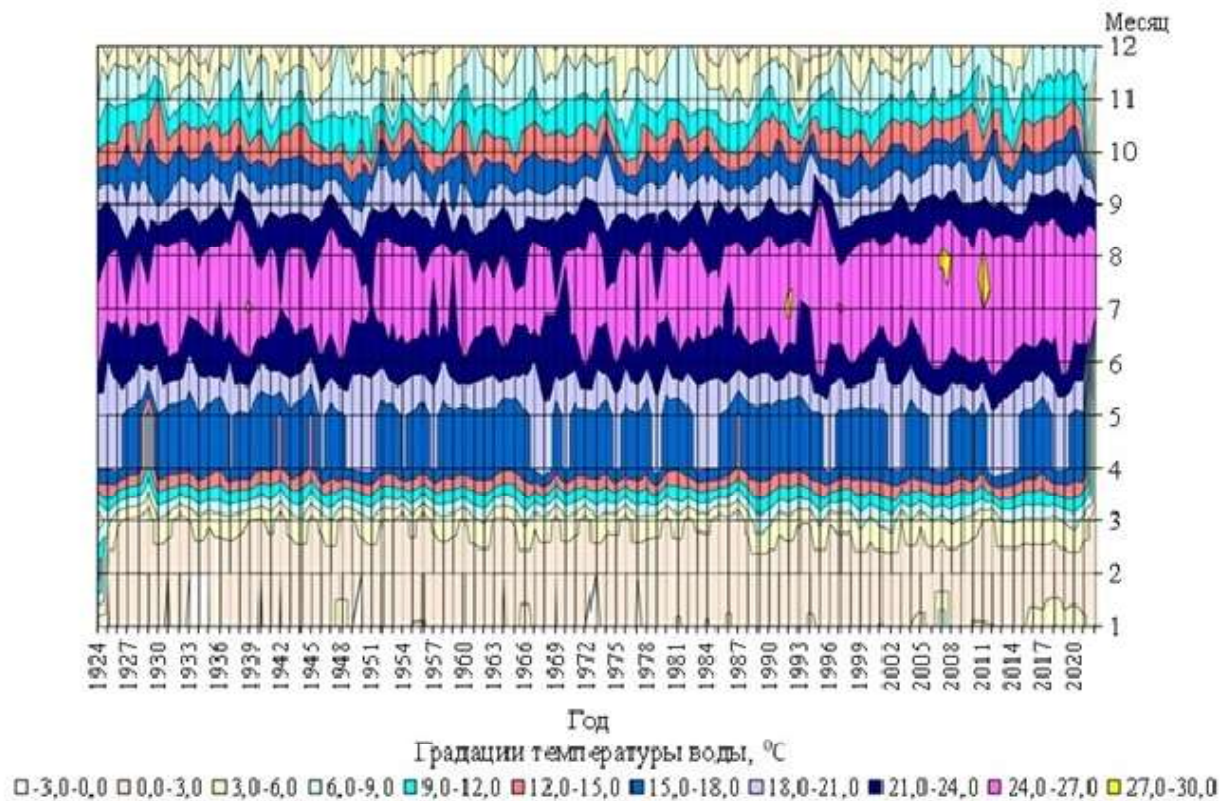


Рис. 3. «Поле» среднемесячных температур воды по данным ГМС Темрюк за период 1924–2022 гг.

Fig. 3. “Field” of the average monthly water temperatures based on the data collected at the coastal hydrometeorological station “Temryuk”, 1924–2022

Следствием повышения температуры воздуха и воды, в т. ч. в зимний период, является изменение характеристик ледового режима Азовского моря. По данным ряда авторов, с середины 80-х гг. прошлого столетия отмечается сдвиг средних дат начала ледообразования (на более поздний период) и распаления льда (на более ранний). По наблюдениям прибрежных ГМС, сократилась средняя продолжительность ледового сезона (на 2–4 недели), особенно в районах Ейска, Мариуполя, Должанской, Таганрога; в меньшей степени — у Керчи, Генчическа, Стрелкового [4, 14, 15]. В работах [16, 17] отмечается, что наряду с ростом температуры воздушной среды в период 1980–2020 гг. наметилась тенденция снижения ледовитости Азовского моря (тренд среднемесячной концентрации составляет 1,2 %/10 лет).

Атмосферные осадки

Анализ изменчивости годовых сумм осадков в бассейне Азовского моря (по данным береговых

ГМС) за период 1976–2020 гг. свидетельствует о незначительном снижении увлажненности (рис. 4). Отрицательные тренды изменения годовых сумм атмосферных осадков характеризуются угловыми коэффициентами уравнений, изменяющимися от 2 (ГМС Керчь) – 3 (Приморско-Ахтарск) мм/год до 1,5–1,0 мм/год (Таганрог и Генчическ).

Региональная неоднородность в изменении атмосферных осадков установлена при исследовании месячных и сезонных характеристик ГМС Азово-Черноморского бассейна за период 1976–2020 гг. Так, видимый рост увлажнения территории атмосферными осадками отмечался по данным ГМС (Туапсе, Керчь) в июле и октябре, в то время как менее выраженный рост суммы осадков зафиксирован во все остальные месяцы года, кроме апреля и декабря (когда тенденции роста или снижения отсутствовали). В августе и ноябре выявлено уменьшение количества осадков (соответственно, 0,94 и 0,25 мм/год).

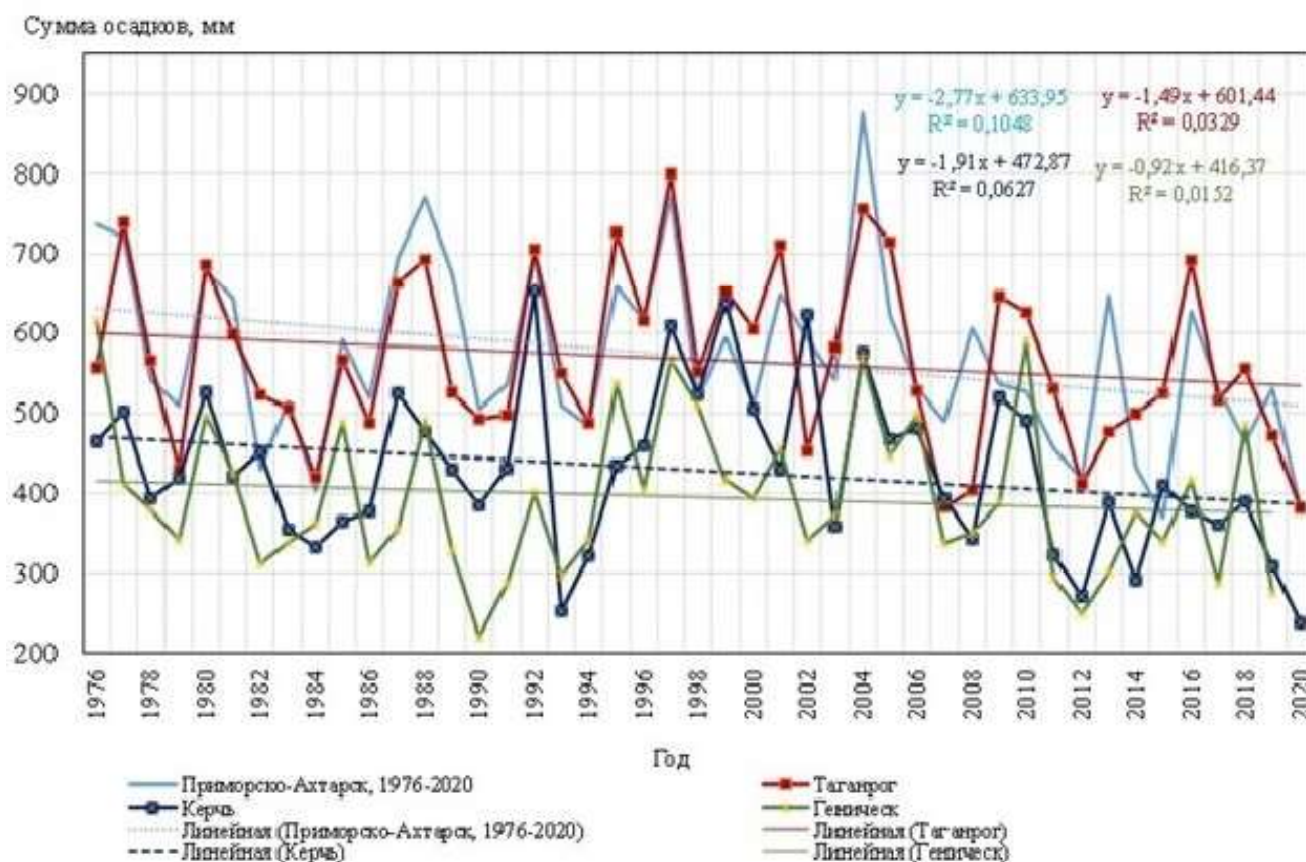


Рис. 4. Изменение годового количества атмосферных осадков по данным прибрежных ГМС Азовского моря, 1976–2020 гг.

Fig. 4. Change in the annual amount of atmospheric precipitation based on the data collected at the coastal hydrometeorological stations in the Azov Sea, 1976–2020

Ветровой режим

В исследовании ветровой активности в бассейне Азовского моря, приведенном в работах [14, 15, 18], сообщается, что с конца 40-х до середины 80-х гг. XX в. ветровая активность снизилась, проявившись в уменьшении среднесезонных и среднегодовых значений скорости ветра. В последующие годы тенденция пониженной ветровой активности на азовском побережье сохранилась и даже усилилась в начале XXI в. [14, 19]. Среди причин снижения скорости ветра авторами называются увеличение плотности застройки прилегающих к ГМС территорий и изменение инструментария для измерения скоростей ветра, а также влияние климатической составляющей [14, 15, 20]. По данным [18] с начала 2000-х гг. на большей части ЕТР возросла повторяемость слабых ветров (до 3 м/с) и снизилась повторяемость более сильных (6–7 м/с и более). В последние десятилетия минимальные скорости ветра наблюдаются в летнее время. На юге ЕТР уменьшение скоростей ветра в летний сезон составляет 0,08 (м/с)/10 лет [21, 22].

Материковый сток

Материковый сток в Азовское море относится к ведущим факторам формирования условий среды обитания водных биологических ресурсов.

Инструментальные наблюдения за стоком рек Дон в створе станицы Раздорской и Кубань у г. Краснодара производятся на гидрологических постах СКУГМС с 1912 г. С созданием двух крупных водохранилищ, Цимлянского на р. Дон (1952 г.) и Краснодарского на р. Кубань (1972 г.),

гидрологический режим этих рек претерпел изменения, связанные с регулирующим влиянием водохранилищ, а также последствиями развития в бассейнах (особенно в бассейне р. Дон) таких отраслей экономики, как гидроэнергетика, промышленность, водный транспорт, сельское и коммунальные хозяйства, интенсивно использующие водные ресурсы, в том числе с их безвозвратным изъятием [23, 24].

Период учета стока этих рек до создания водохранилищ принято считать «условно-естественным» режимом формирования стока (1912–1951 гг.), а данные по стоку последующих лет, начиная с 1952 г., относят к периоду «зарегулированного режима». Краткий анализ режима речного стока в контексте рассматриваемых изменений климата и последующей оценки многолетней динамики солености вод Азовского моря выполнен за период 1952–2022 гг.

Годовой объем материкового стока определяется суммарными объемами стока рек Дон в замыкающем створе станицы Раздорской и Кубань — у г. Краснодара. За период зарегулированного режима в Азовское море поступало в среднем за год около 32,5 км³ речных вод. Максимальный годовой сток составлял 52,75 км³ и отмечался в 1963 г., минимальный (16,21 км³) — в 2020 г. (табл. 2). Основной вклад в формирование материкового стока в Азовское море (около 70 %), как правило, обеспечивается стоком р. Дон, значения которого за указанный период отличались наибольшей вариабельностью (коэффициент вариации C_v

Таблица 2. Статистические характеристики годовых объемов материкового стока (км³) в Азовское море за период 1952–2022 гг.

Table 2. Statistical characteristics of the annual continental runoff (km³) into the Azov Sea, 1952–2022

Статистический параметр Statistical parameter	Материковый сток Continental runoff	Р. Дон Don River	Р. Кубань Kuban River
Среднее Average	32,52	20,24	12,27
Максимальное Maximum	52,75	38,27	17,41
Год наблюдения Year of observation	1963	1979	1997
Минимальное Minimum	16,21	9,47	6,48
Год наблюдения Year of observation	2020	1972, 2020	2020
C_v	0,22	0,32	0,20

составляет 0,32). Годовой сток р. Кубань и материковый сток в Азовское море характеризуются меньшей изменчивостью (C_v , соответственно, 0,20 и 0,22) (табл. 2).

В изменении показателей годового стока в условиях зарегулированного режима прослеживается снижение годовых значений материкового и стока р. Дон, оцениваемое по уравнениям трендов в $0,1 \text{ км}^3/\text{год}$. В изменении кубанской составляющей тренды не выявлены (рис. 5).

Для изучения цикличности в колебаниях стока за указанный период построены разностные интегральные кривые модульных коэффициентов годовых объемов материкового и стока рек Дон и Кубань, ход которых позволяет определить периоды многоводного (ветвь подъема кривой) и маловодного (ветвь спада) режимов стока (рис. 6). Вследствие того, что определяющее значение в формировании материкового стока имеет донская составляющая, положения разностных интегральных кривых стока р. Дон и материкового стока

синхронны. Отличающиеся (временами противофазные) циклические колебания стока р. Кубань объясняются физико-географическими особенностями положения ее водосбора, включающего горную и высокогорные области, за счет которых сток реки получает снеговое и ледниковое питание. В современный период, начиная с 2006 г., в формировании материкового стока отмечается маловодный цикл, составляющий по продолжительности 17 лет (рис. 6).

Величина стока рек определяется общей увлажненностью в бассейне и интенсивностью хозяйственной деятельности. При установлении причин снижения или повышения стока под влиянием климатических и антропогенных факторов особый интерес представляет оценка воздействия каждого из этих факторов в отдельности. Анализ соотношений вклада природно-климатических и антропогенных факторов в многолетние изменения годового и сезонного стока р. Дон посвящены исследования А.М. Бронфмана, В.Г. Дубининой,

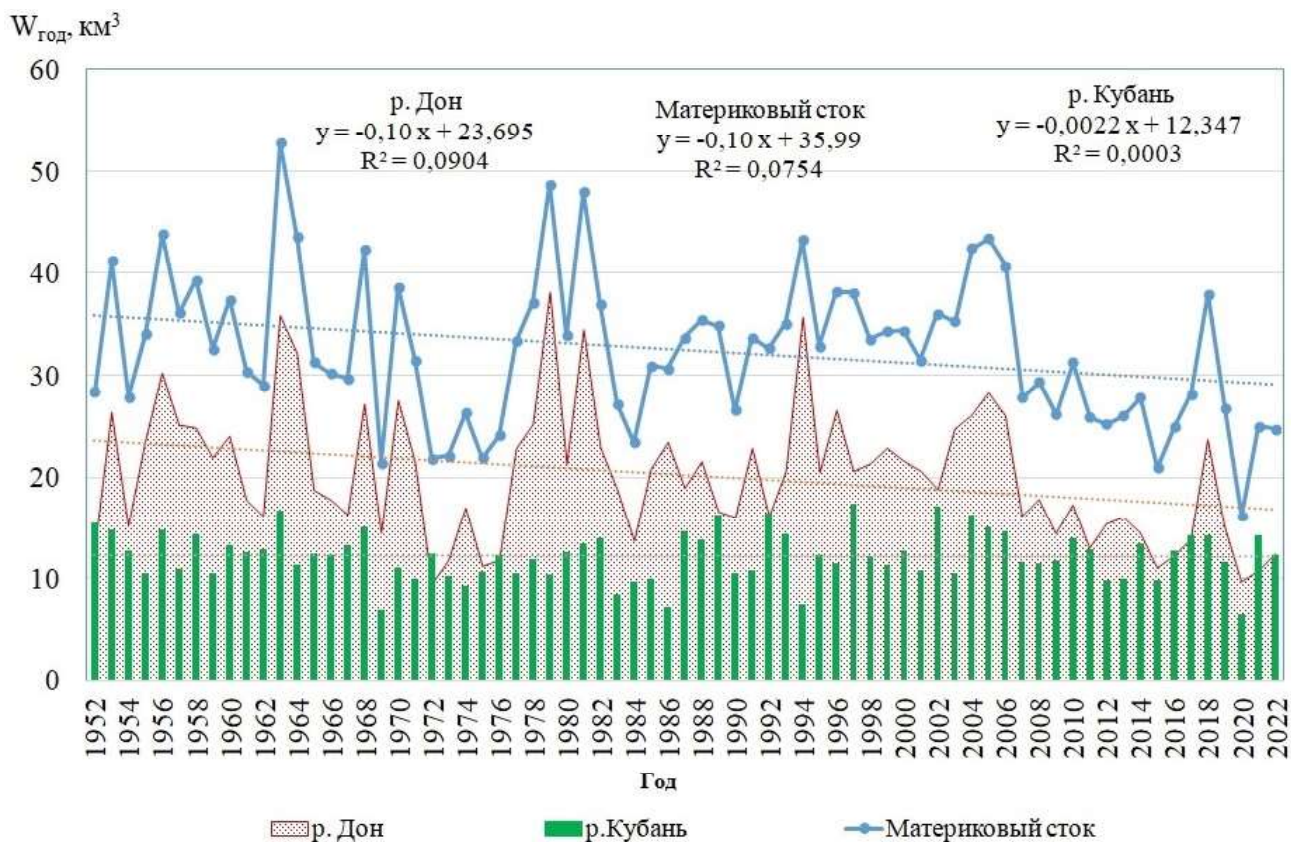


Рис. 5. Изменение годового стока рек Дон, Кубань и материкового стока в Азовское море за период 1952–2022 гг.

Fig. 5. Change in the annual runoff of the Don and Kuban Rivers and the continental runoff into the Azov Sea, 1952–2022

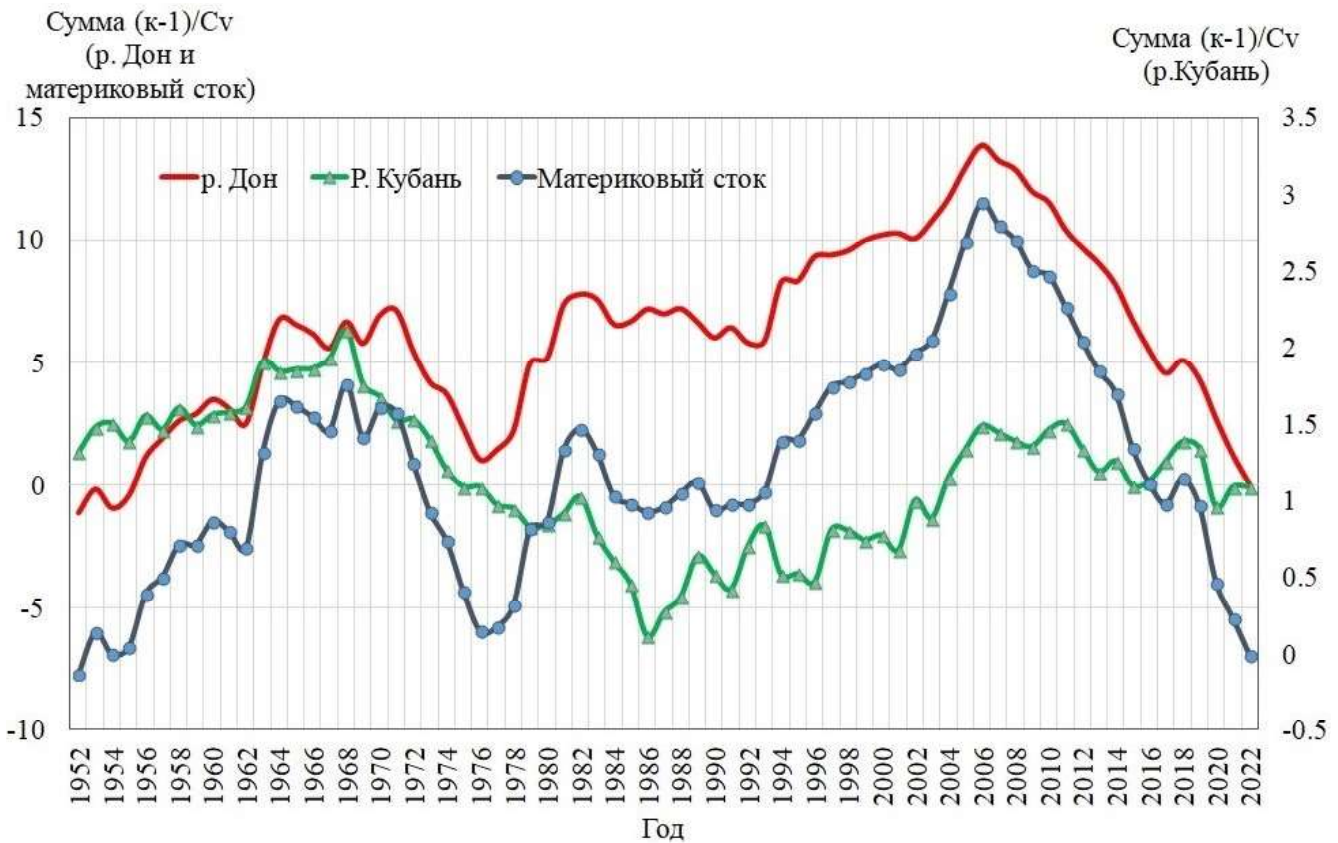


Рис. 6. Разностные интегральные кривые модульных коэффициентов годовых значений материкового стока в Азовское море, стока рек Дон и Кубань за период 1952–2022 г.

Fig. 6. Differential integral curves of modular coefficients of the annual values of the continental runoff into the Azov Sea, as well as the runoff of the Don and Kuban Rivers, 1952–2022

Г.Д. Макаровой [13], А.Г. Георгиади и др. [25], Н.В. Коронкевича и др. [26], однако раздельная оценка вклада до сих пор остается одной из актуальных проблем современной гидрологии. Как считают авторы [25], существующая сложность разделения вкладов обусловлена тем, что «оба фактора зачастую действуют одновременно и тесно переплетены между собой». В работах [25, 26] на основе учета долговременных повышений и понижений стока показано, что антропогенное воздействие на сток Дона в отдельные периоды соизмеримо с природно-климатическим или даже превосходит его. Сравнение фактического стока р. Дон за 1891–1929 гг. и стока за периоды с выраженным антропогенным воздействием, восстановленного по уравнениям регрессии, позволило авторам разделить «сферы влияния» факторов. Так, в 1930–2006 гг. и в период снижения среднегодовой температуры воздуха и годовой суммы атмосферных осадков с 1930 по 1980 г. в изменениях стока всех сезонов вклад антропогенного

фактора превышал вклад климата. На фоне повышения среднегодовой температуры воздуха и годовой суммы атмосферных осадков в 1981–2006 гг. преобладающее влияние на изменения стока приобрел климатический фактор. Получены значения среднего суммарного антропогенного уменьшения годового стока Дона у ст. Раздорской за период 1930–2005 гг., равные $3,3 \text{ км}^3$ и $2,6 \text{ км}^3$ (влияние климата), что составляет соответственно 12,0 и 9,5 % от среднего многолетнего годового стока условно-естественного периода 1891–1929 гг. [25]. В соответствии с выводами, сделанными в работах [25, 26], современное маловодье в формировании стока р. Дон и материкового стока в Азовское море обусловлено преобладающим влиянием климатических факторов.

Анализ изменчивости материкового стока за период двух крупных маловодных циклов последнего семидесятилетия продолжительностью 9 (1968–1976 гг.) и 17 (2006–2022 гг.) лет показал, что за указанные периоды Азовское море недополу-

чило, соответственно, более 40 (в первом случае) и около 90 (в современный период) км³ речных вод (табл. 3), что стало основной причиной повышения солености вод Азовского моря до 13,76 ‰ в 1976 г. (предыдущий рекорд) и 14,97 ‰ в 2021 г. (обновленный рекорд).

Сравнение темпов повышения солености в настоящий и предшествующий маловодные циклы показало, что скорость современного осолонения моря составляет 0,35 ‰/год, на 0,05 ‰/год превышая темпы осолонения моря за предшествующий маловодный цикл (1968–1976 гг.).

Соленость вод Азовского моря

Вследствие эвригалинности обитателей Азовского моря соленость является одним из важнейших показателей условий их существования. Уместно подчеркнуть, что Азовское море вместе с низовьями Дона и Кубани составляет единый рыбопромысловый район, основными объектами рыбодобычи которого традиционно являются ценные виды проходных и полупроходных рыб. Естественное воспроизводство указанных видов рыб происходит на пойменных нерестилищах рек и в азовских лиманах Краснодарского края. Для нагула и адаптации скатывающейся с нерестилищ молоди используются «опресненные» участки Таганрогского залива и кубанского устьевого взморья с соленостью вод до 4–7 ‰. Граница акваторий с режимом солености Азовского моря, оптимальным для взрослой части популяции, как правило, определяется изолинией солености 11,5 ‰ [11, 27]. Таким образом, благополучие условий среды обитания водных биологических ресурсов Азовского моря во многом зависит от величин солености, а также размеров и положения зон с различной соленостью.

Ведущим фактором при формировании режима солености Азовского моря является материковый сток. Соленость Таганрогского залива и юго-восточных прибрежных районов находится под значительным влиянием стока рек Дон и Кубань, а

южный предпроливный район испытывает значительное воздействие черноморских вод.

За период 1960–2022 гг. значения среднегодовой солености воды варьировали от 9,29 ‰ в 2006 г. до (как уже упоминалось) рекордного значения 14,97 ‰ в 2021 г. В 2021 г. отмечались еще более высокие, также являющиеся рекордными, показатели среднегодовой солености собственно моря (15,29 ‰) (рис. 7а). Максимальная (за 1960–2022 гг.) соленость Таганрогского залива отмечалась в 2020 г. и составляла 11,78 ‰.

На наличие зависимости солености от материкового стока указывает асинхронность изменений солености и годового объема материкового стока в Азовское море в многолетней динамике этих параметров (рис. 7а).

По ходу нормированных разностных интегральных кривых модульных коэффициентов стока и солености, находящихся в противофазах (рис. 7б), можно установить, что современный маловодный цикл годового материкового стока отмечается начиная с 2006 г., а начальная фаза роста солености (ветвь подъема) приходится на 2012 г. В данном случае «реакция» солености на снижение стока проявилась с запозданием на 6–7 лет. Этим объясняется наличие наиболее тесной корреляционной связи (за период 1922–2012 гг.) между соленостью текущего года и величиной годового материкового стока за предшествующие 5–7 лет [11].

Особенностям режима солености вод Азовского моря, закономерностям пространственно-временной изменчивости этого параметра по районам моря, многолетней динамике этого параметра, описанию причинно-следственных закономерностей формирования периодических колебаний среднегодовых и среднесезонных значений солености и изменению площадей опресненных зон посвящено большое количество публикаций, в т. ч. по материалам исследований АзНИИРХ [13, 18, 28–32].

Таблица 3. Формирование материкового стока в периоды маловодных фаз

Table 3. Formation of continental runoff during low water content phases

Период маловодья Time range of the low water content phase	Число лет (продолжительность) Number of years (duration)	Средний сток за период маловодья, км ³ Average runoff for the low water content phase, km ³	Отклонение от среднего значения за период, км ³ Deviation from the average value for the time range, km ³	Недополученный сток, км ³ Runoff shortfall, km ³
1968–1976	9	27,80	4,92	42,48
2006–2022	17	27,36	5,16	87,72

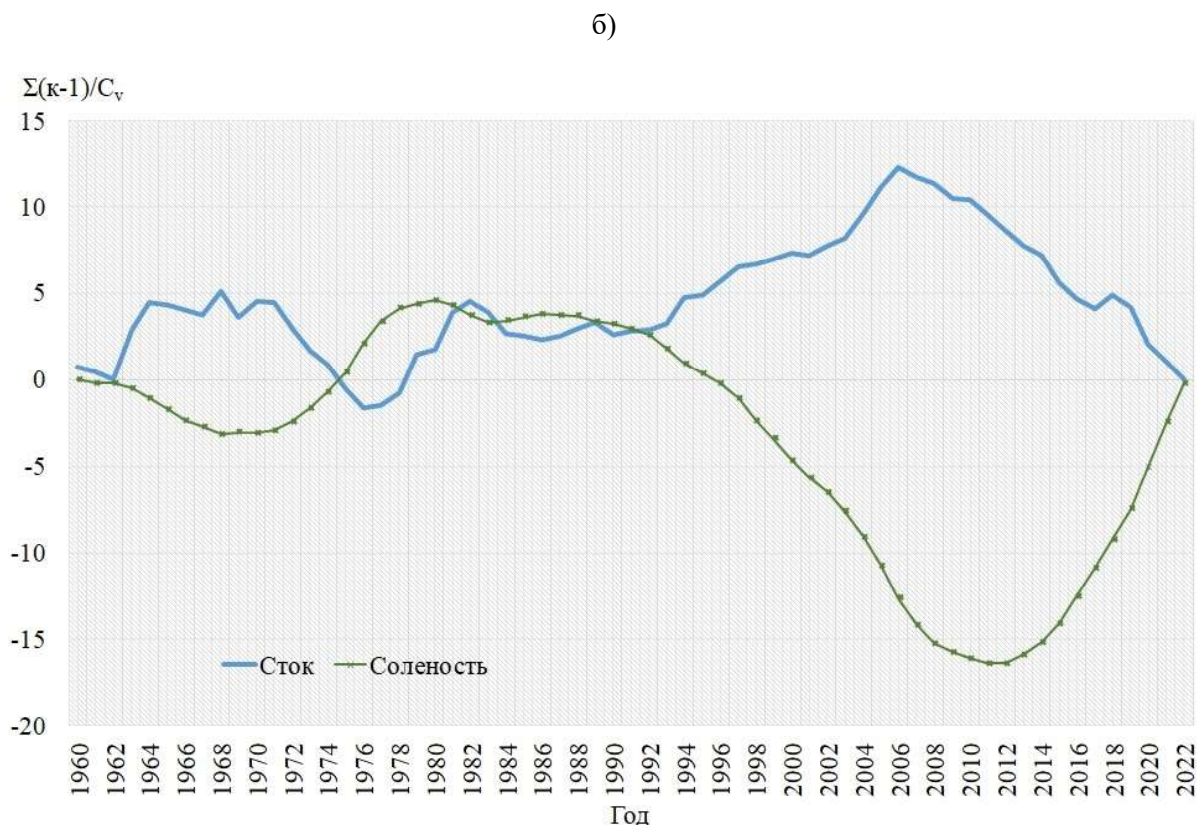
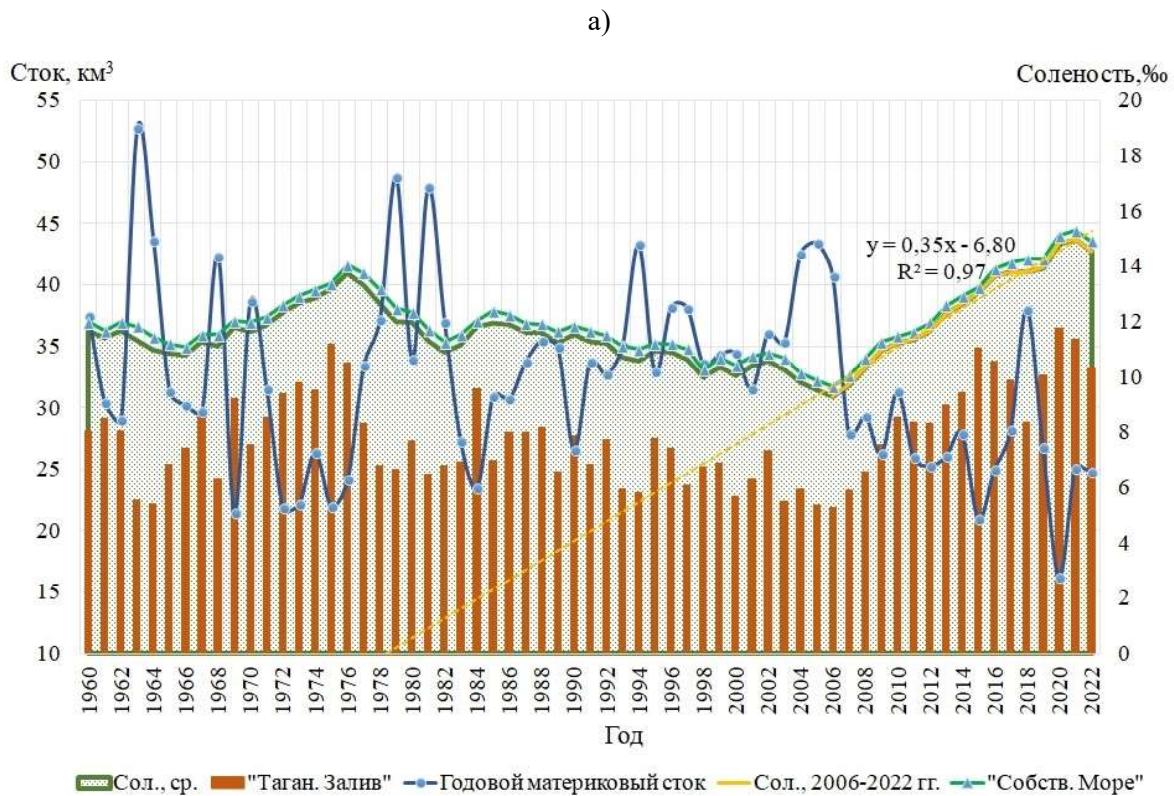


Рис. 7. а) Динамика изменения среднегодовой солености и годовых объемов материкового стока Азовского моря за период 1960–2022 гг.; б) Разностные интегральные кривые модульных коэффициентов материкового стока и солености за период 1960–2022 гг.

Fig. 7. а) Dynamics of changes in the average annual salinity and the annual continental runoff into the Azov Sea, 1960–2022; б) Differential integral curves of modular coefficients of the continental runoff and salinity, 1960–2022

Пресная составляющая водного баланса Азовского моря

Водный баланс Азовского моря складывается из приходных (поступление речного стока и атмосферных осадков, выпадающих на водную поверхность, приток вод из Черного моря, приток из залива Сиваш) и расходных (испарение с водной поверхности, отток азовских вод в Черное море и залив Сиваш) статей, инструментальные измерения которых (за исключением материкового стока) не проводятся, в связи с чем оценка ряда приходных и расходных статей производится расчетным путем. Недостаточная изученность водного баланса Азовского моря, особенно в современный период, объясняется отсутствием необходимой информации для проведения расчетов. Наиболее полные данные по воднобалансовым исследованиям Азовского моря содержатся в работах [12, 13, 33], в которых опубликованы ряды данных по расчетам годового водного баланса периодов 1923–1940, 1946–1970 гг. [12] и 1923–1976 гг. [13].

Приведенная ниже оценка составляющих уравнения водного баланса в основном касается расчета так называемой «пресной составляющей» баланса, суммарно учитывающей приток речных вод (по величинам объемов стока рек Дон и Кубань), объемы атмосферных осадков, выпадающих на водное зеркало моря, и расходы воды на испарение с водной поверхности. Для удлинения опубликованных рядов данных [12, 13] расчет элементов водного баланса произведен за период 1977–2020 гг. В выполненных расчетах в связи с отсутствием необходимой информации содержится ряд допущений (площадь водного зеркала Азовского моря принята равной 37,8 км² без учета изменения уровня; расчеты объемов атмосферных осадков и испарения выполнены с использованием данных только трех прибрежных ГМС: Приморско-Ахтарск, Керчь и Таганрог). Несмотря на то, что полученные нами результаты на данном этапе рассматриваются как предварительные, они позволяют получить общее представление о формировании баланса пресных вод, от результирующей величины которого зависит формирование солености вод Азовского моря.

Для анализа изменения элементов водного баланса произведена компоновка данных «пресной составляющей» уравнения водного баланса по периодам (табл. 4).

За период 1923–2020 гг. наибольший вклад (около 70 %) в приходную часть пресной составляющей баланса привносит материковый сток, изменяющийся от 61,5 км³ в 1932 г. до 16,2 км³ в 2020 г. (табл. 4). Атмосферные осадки, годовой объем которых менялся от 9,2 км³ (1962 г.) до 26,2 км³ (2004 г.), составляют в среднем около 30 % приходной части. По изменению среднееголетних характеристик установлено, что в периоды 1923–2020 и 1923–1975 гг. отмечалось примерное равенство значений притока речных вод и расходов на испарение. При этом объем пресной составляющей фактически соответствовал объему атмосферных осадков [12, 13].

Совершенно иное соотношение среднееголетних характеристик водного баланса сложилось в период 1976–2020 гг. По сравнению с предыдущим периодом (1923–1975 гг.), отмечено снижение объема материкового стока и повышение объемов атмосферных осадков и испарения, причем объем испарения оказался в среднем на 2,6 км³ выше объема притока речных вод. За счет роста объемов притока атмосферных осадков пресная составляющая почти на 2 км³ превысила среднее значение предшествующего периода. Сравнивая значения коэффициентов вариации и стандартных отклонений периода 1976–2020 гг. с их величинами за предыдущие периоды (табл. 4), можно сделать вывод об увеличении изменчивости величины испарения и снижении вариабельности остальных статей баланса.

Динамика элементов пресной составляющей водного баланса Азовского моря за период 1923–2020 гг. представлена на рис. 8. В изменении составляющих уравнения водного баланса за указанный период в соответствии с уравнениями трендов установлена следующая тенденция: на фоне снижения материкового стока (0,1 км³/год) и пресной составляющей (0,09 км³/год) прослеживается рост объемов атмосферных осадков (0,06 км³/год) и испарения (0,03 км³/год). Особенно очевидный рост испарения с водной поверхности отмечался в последнем двадцатилетии, когда объемы испаряющейся воды в отдельные годы периода 2009–2020 гг. достигая значений 35–40 км³, превышали объемы материкового стока (рис. 8). Для более наглядного отображения тенденции роста испарения на временном отрезке 1999–2020 гг. (последние 22 года) изменение этого элемента водного баланса представлено с введением дополнительной

Таблица 4. Статистические характеристики расчетных значений «пресной составляющей» уравнения водного баланса Азовского моря по периодам 1923–2020, 1923–1975 и 1976–2020 гг.**Table 4.** Statistical characteristics of the calculated values for the “freshwater component” of the Azov Sea water balance equation for 1923–2020, 1923–1975 and 1976–2020 time ranges

Параметр Parameter	Период Time range	Объем материкового стока, км ³ Continental runoff, km ³	Объем атмосферных осадков, км ³ Atmospheric precipitation, km ³	Объем испарения, км ³ Evaporation, km ³	Пресная составляющая, км ³ Freshwater component, km ³
Среднее Average	1923–2020	34,1	16,3	34,7	16,3
	1923–1975	35,5	14,2	34,3	15,4
	1976–2020	32,5	18,4	35,1	17,2
Макс. Max.	1923–2020	61,5 (1932)*	26,2 (2004)*	41,5 (2014, 2018)*	45,7 (1932)*
	1923–1975	61,5	20,7	38,1	45,7
	1976–2020	48,7	26,2	41,5	36,0
Мин. Min.	1923–2020	16,2 (2020)*	9,2 (1962)*	28,1 (1998, 1999)*	-8,3 (2020)*
	1923–1975	20,4	9,2	29,1	-1,7
	1976–2020	16,2	11,8	28,1	-8,3
δ (ст. откл.) δ (standard deviation)	1923–2020	8,6	3,8	2,6	10,5
	1923–1975	9,9	3,1	1,9	11,3
	1976–2020	6,8	3,3	3,2	9,8
Cv	1923–2020	0,25	0,23	0,08	0,65
	1923–1975	0,28	0,22	0,05	0,72
	1976–2020	0,21	0,18	0,09	0,57

Примечание: * Год наблюдения указанной величины

Note: * Year of observation of the given value

оси. Стремительный рост испарения за указанный период характеризуется скоростью 0,52 км³/год (уравнение — рис. 8), что, по сравнению со среднесуточными темпами роста периода 1923–2020 гг. (0,03 км³/год), указывает на 17-кратное их повышение. Безусловно, уточнение расчетных данных по испарению станет предметом будущих исследований, однако уместно отметить, что активизация такого «чисто климатического» процесса, как испарение с водной поверхности Азовского моря, является подтверждением значительно возросшего влияния климатических факторов на формирование водно-солевого режима Азовского моря.

Современные количественные оценки испарения в Азовском море (за исключением констатаций общей тенденции роста) в литературных данных отсутствуют. Поэтому, говоря о столь значительном повышении испарения с водной поверхности Азовского моря, можно усомниться в точности проведенных расчетов, но не в оценке тенденции в целом. На значительное повышение испарения с поверхности водных объектов бассейна Азовского моря в современных условиях, в частности в

Цимлянском водохранилище, обращено внимание в работах [34, 35]. По приведенным оценкам, по сравнению с 2000 г., отмечается полутора кратный рост испарения с водной поверхности Цимлянского водохранилища, особенно в весенние месяцы. Аналогичная оценка дана в работе А.Д. Ахмедова, Е.А. Ветренко и И.Н. Колотухина [36], в которой сообщается, что «...доля испаряющейся с поверхности воды по отношению к приходной части баланса возросла за последние 20 лет в полтора раза».

Следует отметить еще одно обстоятельство, выявленное при анализе изменчивости элементов водного баланса моря. За период 1923–2020 гг. отрицательный водный баланс (т. е. ситуация, при которой расход воды на испарение превышал суммарный объем поступления в море речного стока и атмосферных осадков) отмечалась четырежды: в 1935, 1950, 1975 и 2020 гг. (рис. 8). При этом в первых трех случаях превышение расхода над поступлением воды составляло 0,8–1,7 км³, а в 2020 г. (когда катастрофическое маловодье отмечалось на Дону и Кубани одновременно, и величина материкового стока в 2020 г. попала в разряд ми-

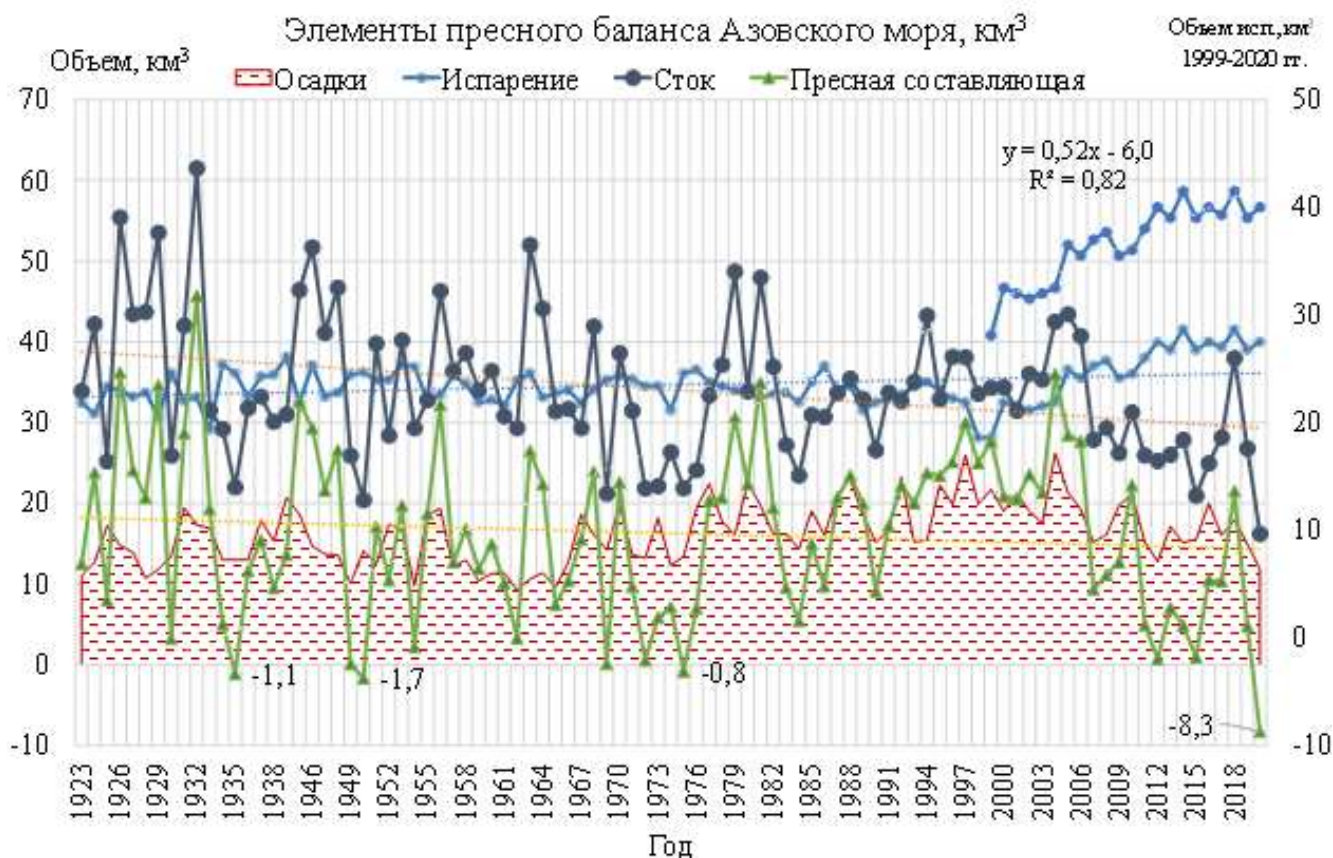


Рис. 8. Изменение элементов «пресной составляющей» водного баланса Азовского моря за период 1923–2020 гг. (по вспомогательной оси построено изменение испарения за период 1999–2020 гг.)

Fig. 8. Changes in the “freshwater components” of the Azov Sea water balance, 1923–2020 (the evaporation change for 1999–2020 is plotted along the auxiliary axis)

нимальных за весь период наблюдений), пресная составляющая водного баланса достигла отрицательного значения $8,3 \text{ км}^3$. Повторяемость событий с формированием отрицательного баланса имеет последовательность: 15, 25 и 45 лет. Не выясняя причину этой случайности или закономерности, стоит отметить, что год формирования отрицательного баланса пресной составляющей является «предвестником» последующего резкого повышения солёности Азовского моря, как это отмечалось в 1976 и 2021 гг.

Водообмен между Азовским и Черным морями

При проведении воднобалансовых расчетов для Азовского моря наиболее сложной является оценка притока вод из Черного моря и оттока вод из Азовского моря в Черное, т. к. регулярные инструментальные наблюдения в Керченском проливе (ввиду чрезвычайной трудоемкости и ряда причин, обусловленных стратегическим статусом пролива) до сих пор не производятся.

В качестве расчетных формул использованы корреляционные зависимости объемов притока и оттока черноморских ($V_{ч}$) и азовоморских ($V_{а}$) вод от величины пресной составляющей (F) водного баланса Азовского моря [12]:

$$V_{ч} = -0,205 F + 37,2$$

$$V_{а} = 0,614 F + 33,9.$$

Проведенный сравнительный анализ изменения составляющих водообмена между Азовским и Черным морями за периоды 1923–1975 и 1976–2020 гг. (табл. 5) показал, что средние значения объемов притока черноморских вод близки по значениям ($33,8$ и $33,9 \text{ км}^3$, соответственно). Объем оттока вод из Азовского моря в Черное снизился всего на $0,5 \text{ км}^3$. На $0,7 \text{ км}^3$ уменьшилась результирующая величина водообмена (определяемая по разнице $V_{а} - V_{ч}$). Более существенные изменения фиксируются на временном отрезке 2000–2020 гг., где, по сравнению со средней величиной периода 1923–1975 гг., отмечается рост притока черноморских

вод (0,6 км³), снижение объема оттока вод из Азовского моря (1,8 км³) и результирующей величины водообмена (2,3 км³). При этом следует отметить, что в 2020 г. впервые за весь период наблюдения (1923–2020 гг.) отток вод из Азовского моря снизился до 33,9 км³ (что на 15,1 км³ ниже среднемноголетней величины), а приток черноморских вод возрос до 38,9 км³, на 5 км³ превысив среднее значение ряда. Также впервые за период наблю-

дений результирующая величина водообмена достигла отрицательного значения (-5,0 км³). Все эти три величины попали в разряд экстремальных значений ряда (табл. 5). Значительные снижения результирующих величин водообмена отмечались еще в 1935 (0,9 км³), 1950 (0,4 км³) и 1975 г. (1,1 км³), что по срокам совпадает с периодами формирования отрицательного баланса пресной составляющей.

Таблица 5. Статистические характеристики расчетных значений водообмена между Азовским и Черным морями по периодам

Table 5. Statistical characteristics of the calculated values of the water exchange between the Azov and Black Seas by time ranges

Параметр Parameter	Период Time range	Объем притока вод Vч, км ³ Water inflow Vb, км ³	Объем оттока Va, км ³ Water outflow Va, км ³	Результирующая величина водообмена, км ³ Resulting water exchange, км ³
Среднее Average	1923–2020	33,9	49,0	15,1
	1923–1975	33,8	49,3	15,5
	1976–2020	33,9	48,8	14,8
	2000–2020	34,4	47,5	13,2
Макс. Max.	1923–2020	38,9 (2020)*	67,1 (1932)*	39,2 (1932)*
	1923–1975	37,5 (1950)*	67,1 (1932)*	39,2 (1932)*
	1976–2020	38,9 (2020)*	61,1 (2004)*	31,3 (2004)*
Мин. Min.	1923–2020	27,8 (1932)	33,9 (2020)	-5,0 (2020)
	1923–1975	27,8 (1932)	38,0 (1950)	0,4 (1950)
	1976–2020	29,8 (2004)	33,90 (2020)	-5,0 (2020)
δ (ст. откл.) δ (standard deviation)	1923–2020	2,16	6,47	8,63
	1923–1975	2,30	6,88	9,18
	1976–2020	2,09	6,26	8,35

Примечание: * Год наблюдения указанной величины
Note: * Year of observation of the given value

Экспертная оценка возможных изменений материкового стока и солености Азовского моря на перспективу до 2030 г.

Экспертная оценка возможных изменений климатических характеристик в бассейне Азовского моря, проведенная в соответствии с данными [1, 37, 38], показала, что на период до 2030–2050 гг. ожидаются следующие климатические изменения:

1. Повышение средней температуры приземного воздуха во все сезоны года; рост интенсивности и продолжительности волн тепла и жары, увеличение повторяемости эпизодов экстремальной жары.
2. Уменьшение продолжительности и интенсивности волн холода; сокращение числа мороз-

- ных суток, изменение критериев суровости зим, потепление зимнего периода.
3. Небольшой рост количества осадков зимнего периода, их уменьшение в летний сезон.
4. Развитие засушливых условий, увеличение продолжительности периодов без осадков, увеличение повторяемости и продолжительности засух.
5. Одновременно будет возрастать число случаев с экстремальными осадками и сопутствующими неблагоприятными и опасными явлениями погоды (шквалы, град, грозы).
6. В бассейне р. Дон продолжится тенденция снижения объемов речного стока вследствие уменьшения годовых осадков и увеличения испарения в теплый сезон.

7. Сокращение снежного покрова будет способствовать изменению внутrigодового распределения стока р. Дон: уменьшится весенне-летняя составляющая годового стока и увеличится сток зимнего периода.
8. Период снеготаяния (начала весеннего половодья) сместится на более ранние сроки, возрастет риск наводнения на малых реках.
9. Сток рек в южных регионах России снизится на 3 % до 2030 г. и на 4 % до 2041–2060 и 2080–2099 гг. (табл. 3.2.6 в [37]).

Экспертная оценка возможных изменений материкового стока и солёности моря на период до 2030 г. выполнена по данным АЗНИИРХ, включающим ряды значений солёности и материкового стока за период 1960–2022 гг. Учтены указанные климатические тенденции снижения стока и рассмотрены сценарии возможного формирования стока.

В основу прогноза положено уравнение зависимости солёности воды от материкового стока [31], полученное по данным мониторинга этих параметров (АЗНИИРХ) за период 1960–2014 гг.

Прогноз формирования солёности воды Азовского моря в зависимости от материкового стока разработан по трем следующим сценариям:

1. Материковый сток в среднем за период до 2030 г. будет находиться на уровне 90–95%-ной обеспеченности, определенной по ряду годового материкового стока за период 1960–2022 гг. При этом предполагается сохранение маловодного периода с формированием суммарного стока рек Дон и Кубань на уровне около 22 км³. Этот сценарий является наиболее вероятным с точки зрения существующего долгосрочного прогноза Гидрометцентра, согласно которому в период до 2030 г. ожидается снижение стока рек юга России на 3 % (табл. 3.2.6 в [37]). При этом среднегодовая солёность воды в Азовском море, включая Таганрогский залив, может достигнуть значений 15±0,40 ‰ с диапазоном колебаний солёности воды в собственно море в интервале от 14,5 до 16,5 ‰. Годом-аналогом формирования такой солёности может служить 2021 г. *Вероятность этого прогноза составляет около 60 %.*
2. Тенденция снижения объемов материкового стока в период до 2030 г. будет сохраняться за счет климатических изменений (в т. ч. рос-

та испарения с водной поверхности), а также увеличения безвозвратного водопотребления. Современная тенденция роста солёности (в основном за счет уменьшения донской составляющей материкового стока, роста испарения с водной поверхности и увеличения объемов притока вод из Черного моря) в период 2006–2022 г. оценивается, согласно уравнению тренда роста солёности, величиной 0,35 ‰ в год. Исходя из этого, можно заключить, что при таких темпах к 2030 г. при объемах материкового стока, составляющих 22 км³, солёность Азовского моря может достичь величины 17,34 ‰, приблизившись к значениям солёности поверхностных вод Черного моря (17–18 ‰) и подтверждая предположение, что термохалинная структура вод Азовского моря по своим показателям обнаруживает все большее сходство с водами Черного моря, в залив которого оно постепенно превращается [39]. Эти значения солёности будут рекордными для современного исторического этапа, не имея аналогов с момента начала документированных измерений (начало XX века). *Данный прогноз отнесен к разряду менее вероятных (34 %).*

3. Материковый сток будет формироваться на уровне среднегодовой величины периода 1960–2022 гг., равной 32 км³ и соответствующей 50%-ной обеспеченности. В таких условиях среднегодовая солёность воды к 1930 г. может понизиться до уровня 14,8±0,22 ‰. Годом-аналогом пространственного распределения солёности может служить 2020 г. *Вероятность прогноза составляет около 5 %.*
4. Материковый сток возрастет до уровня 37 км³ (25%-ная обеспеченность), что будет способствовать снижению среднегодового значения солёности до 11,4±1,76 ‰. Годами-аналогами могут быть избраны, например, 1961 и 2011 гг. *Этот вариант характеризуется наименьшей вероятностью (1 %).*

Примеры возможного пространственного распределения солёности по трем из рассмотренных 4 сценариев (1-й, 3-й и 4-й варианты) представлены на рис. 9. В соответствии с наиболее вероятным сценарием (1-й), в пространственном распределении солёности в собственно море, скорее всего, будут преобладать значения солёности от 14 до 16 ‰, характерные уже для современного периода (рис. 9, 2020, 2021 гг.).

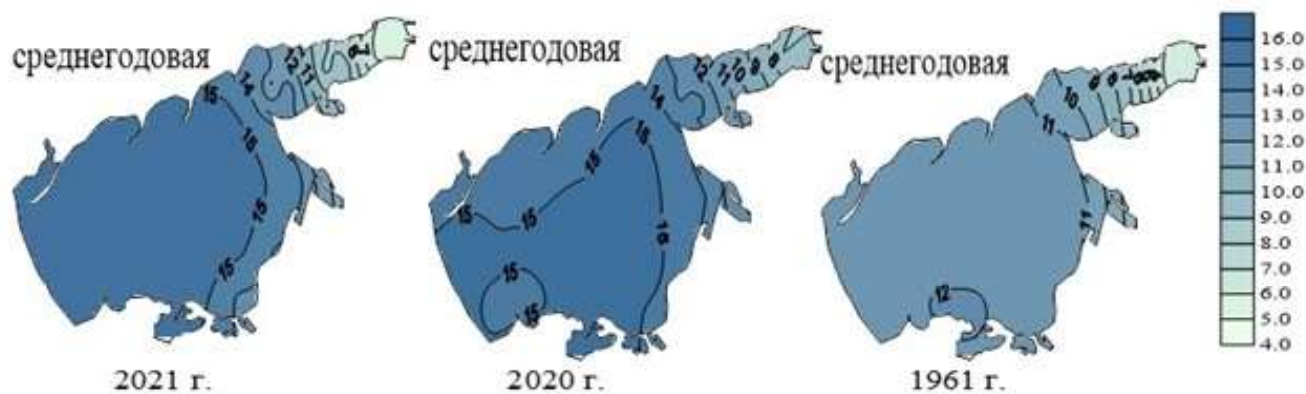


Рис. 9. Пространственное распределение солёности в годы различной обеспеченности годовой величины материкового стока (22, 32 и 37 км³)

Fig. 9. Spatial distribution of salinity in the years of different availability of the annual continental runoff (22, 32 and 37 km³)

ВЫВОДЫ

Анализ современных климатических и антропогенных преобразований в бассейне Азовского моря выявил тенденции, связанные с повышением температур приземного слоя атмосферы и воды, ростом испарения с поверхности моря, увеличением объема притока черноморских вод и повышением солёности вод Азовского моря. В то же время в изменениях материкового стока, ветровой активности, ледовитости моря отмечаются тенденции к снижению. Согласно выполненным оценкам роли климатических и антропогенных факторов в изменениях гидрологического режима (на примере бассейна р. Дон) [25], формирование современного продолжительного маловодного цикла в периодических колебаниях стока р. Дон и материкового стока в Азовское море происходит под влиянием климатических факторов в большей степени, чем антропогенных.

Беспрецедентный рост среднегодовой солёности моря до рекордного значения 14,97 ‰ в 2021 г. становится реальной угрозой устойчивости экосистемы Азовского моря. Доказательства активизации этих процессов уже проявляются изменением видового разнообразия, инвазией чужеродных видов, снижением биологической и рыбопромысловой продуктивности моря.

Экспертная оценка климатических изменений и возможной трансформации абиотических параметров экосистемы Азовского моря свидетельствует, что в ближайшей перспективе улучшение условий среды обитания, особенно для традиционных проходных и полупроходных промысловых рыб

Азовского бассейна, маловероятно. Дальнейшее потепление, снижение объемов материкового стока, рост или даже стабилизация солёности Азовского моря на современном уровне (14–15 ‰) не создают предпосылок для оптимизации процессов естественного воспроизводства проходных и полупроходных рыб. В частности, становятся маловероятными эколого-рыбохозяйственные попуски для обводнения в весенний период традиционных нерестилищ в поймах рек, расширения площади относительно распресненных пространств Таганрогского залива и устьевое взморья р. Кубань с целью улучшения условий нагула скатывающейся молоди.

При наиболее вероятном (60 %) сценарии с сохранением маловодного периода с суммарным стоком рек Дон и Кубань объемом около 22 км³ среднегодовая солёность воды в Азовском море, включая Таганрогский залив, в 2030 г. может достигнуть значений $15 \pm 0,40$ ‰ с диапазоном колебаний в собственно море в интервале от 14,5 до 16,5 ‰. Годом-аналогом формирования такой солёности может служить 2021 г.

Ухудшение экологического состояния Азовского моря и рост рисков, связанных с изменением климата, обуславливают необходимость поиска и принятия решений, обеспечивающих сохранение и наиболее эффективное использование его водно-биологических ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федера-

- ции. Общее резюме / под ред. И.А. Шумакова. СПб: Научное издание, 2022. 124 с.
2. Гидрометеорологический справочник Азовского моря / под ред. А.А. Аксенова. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 856 с.
 3. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 3. Азовское море / под ред. М.Н. Книповича. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 218 с.
 4. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 5. Азовское море / под ред. Н.П. Гоптарева. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 237 с.
 5. Climatic atlas of the Sea of Azov, 2008. G.G. Matishov, S. Levitus, D.G. Matishov, Yu. Gargopa, S.V. Berdnikov, V. Kulyagin, O. Arkhipova, A. Chikin, I. Shabas, O.K. Baranova, I. Smolyar (eds.). *NOAA Atlas NESDIS*. 2008. Issue 65. 148 p.
 6. Ильин Ю.П., Фомин В.В., Дьяков Н.Н., Горбач С.Б. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 1. Азовское море. Севастополь: Изд-во Морского отделения Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института, 2009. 400 с.
 7. Погода и климат. Метеоновости, прогнозы погоды, климатический монитор, архивы погоды. URL: <https://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения 10.08.2023).
 8. ЕСИМО. Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане : информационный портал. Данные за 1999–2023 гг. URL: <http://esimo.ru> (дата обращения 07.09.2023).
 9. Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях / под ред. В.М. Грузинова, А.В. Сокова. М.: Изд-во Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова, 2016. 538 с.
 10. Методы рыбохозяйственных и природоохранных исследований в Азово-Черноморском бассейне : сб. науч.-метод. работ / под ред. С.П. Воловика, И.Г. Корпаковой. Краснодар: Изд-во АЗНИИРХ, Просвещение-Юг, 2005. 352 с.
 11. Куропаткин А.П., Жукова С.В., Шишкин В.М., Бурлачко Д.С., Карманов В.Г., Лутынская Л.А., Фоменко И.Ф., Подмарева Т.И. Изменение солёности Азовского моря. *Вопросы рыболовства*. 2013. Т. 14, № 4 (56): 666–673.
 12. Современный и перспективный водный и солевой баланс южных морей СССР / под ред. А.И. Симонина, Н.П. Гоптарева. М.: Гидрометеиздат, 1972. 236 с.
 13. Бронфман А.М., Дубинина В.Г., Макарова Г.Д. Гидрологические и гидрохимические основы продуктивности Азовского моря. М.: Пищевая промышленность, 1979. 288 с.
 14. Бердников С.В., Дашкевич Л.В., Кулыгин В.В. Климатические условия и гидрологический режим Азовского моря в XX – начале XXI вв. *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2019. Т. 2, № 2: 7–19. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2019_2_2_7.
 15. 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, № 1: 112–120. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-2-25-112-120>.
 16. Гинзбург Г.И., Костяной А.Г., Серых И.В., Лебедев С.А. Климатические изменения гидрометеорологических параметров Черного и Азовского морей (1980–2020 гг.). *Океанология*. 2021. Т. 61, № 6: 900–912. <https://doi.org/10.31857/S003015742106006X>.
 17. Боровская Р.В. Исследование ледовых условий Азовского моря и Керченского пролива в зимний период 2015–2016 гг. и оценка их влияния на промысловую обстановку и процесс миграции и нагул рыбы. *Труды ЮгНИРО*. 2017. Т. 54: 35–41.
 18. Гаргопа Ю.М. Крупномасштабные изменения гидрометеорологических условий формирования биопродуктивности Азовского моря : автореф. дис. докт. геогр. наук. Мурманск: Изд-во Мурманского морского биологического института Кольского научного центра Российской академии наук, 2003. 47 с.
 19. Дьяков Н.Н., Иванов В.А., Горбач С.Б. Сезонная и межгодовая изменчивость гидрологических характеристик прибрежной зоны Азовского моря. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2002. Вып. 1 (6): 39–46.
 20. Лурье П.М., Панов В.Д. Влияние изменений климата на гидрологический режим р. Дон в начале XXI века. *Метеорология и гидрология*. 1999. № 4: 90–97.
 21. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 г. М.: Изд-во Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 2020. 97 с.
 22. Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н. Изменения режима ветра на территории России в последние десятилетия. *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. 2013. Вып. 568: 156–172.
 23. Жукова С.В. Обеспеченность водными ресурсами рыбного хозяйства Нижнего Дона. *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2020. Т. 3, № 1: 7–19. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2020_3_1_7.
 24. Жукова С.В. Оценка влияния на водные биоресурсы и среду их обитания при эксплуатации Цимлянского и Манычских водохранилищ. *Рыбохозяйственные проблемы строительства и эксплуатации плотин и пути их решения : матер. заседания тематического сообщества по проблемам больших плотин и Научного консультативного совета Межведомственной ихтиологической комиссии (г. Москва, 25 февраля 2010 г.)* / под ред. А.С. Мартынова, Ю.А. Книжникова. М.: Изд-во WWF России, 2010: 47–67.

25. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 2. Бассейны рек Волги и Дона. М.: МАКС Пресс, 2014. 214 с.
26. Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Георгиади А.Г., Долгов С.В., Зайцева И.С., Кашутина Е.А., Мельник К.С. Гидрология антропогенного направления: становление, методы, результаты. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2017. № 2: 8–23. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2017-2-8-23>.
27. Шишкин В.М. Эколого-рыбохозяйственное значение зон смещения речных и морских вод Азовского моря : автореф. дис. канд. биол. наук. Ростов-н/Д.: Изд-во АЗНИИРХ, 2004. 30 с.
28. Бронфман А.М., Хлебников Е.П. Азовское море: основы реконструкции. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 271 с.
29. Жукова С.В., Шишкин В.М., Куропаткин А.П., Фоменко И.Ф., Лутынская Л.А., Стрельченко О.В., Подмарева Т.И., Ильяхина Т.И. Закономерности современного гидрометеорологического режима Темрюкско-Ахтарского района Азовского моря. *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2006. № 9: 47–53.
30. Воловик С.П., Корпакова И.Г., Лавренова Е.А., Темердашев З.А. Экосистема Азовского моря: режим, продуктивность, проблемы управления. Ч. 1. Режим и продуктивность в период до зарегулирования стока рек. Краснодар: Изд-во Кубанского государственного университета, 2008. 347 с.
31. Куропаткин А.П., Шишкин В.М., Бурлачко Д.С., Карманов В.Г., Жукова С.В., Подмарева Т.И., Фоменко И.Ф., Лутынская Л.А. Современные и перспективные изменения солености Азовского моря. *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2015. № 11: 7–16.
32. Дашкевич Л.В., Бердников С.В., Кулыгин В.В. Многолетнее изменение средней солености Азовского моря. *Водные ресурсы*. 2017. Т. 44, № 5: 563–572. <https://doi.org/10.7868/S0321059617040046>.
33. Ремизова С.С. Водный баланс Азовского моря. *Водные ресурсы*. 1984. № 1: 104–121.
34. Многолетние изменения испарения на Европейской территории России по данным водноиспарительной сети : научно-прикладной справочник / под ред. В.С. Вуглинского. СПб: РИАЛ, 2021. 64 с.
35. Георгиевский В.Ю., Алексеев Л.П., Грек Е.А., Дубровская К.А., Молчанова Т.Г., Фуксова Т.В. Многолетние изменения составляющих водного баланса Цимлянского водохранилища. *Лесная мелиорация и эколого-гидрологические проблемы Донского водосборного бассейна : матер. Нац. науч. конф. (г. Волгоград, 29–30 октября 2020 г.)*. Волгоград: Изд-во Федерального научного центра агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук, 2020: 502–505.
36. Ахмедов А.Д., Ветренко Е.А., Колотухин И.Н. Модель управления водными ресурсами Цимлянского водохранилища. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2020. № 1 (57): 368–380. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2020-01-36>.
37. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме / под ред. А.В. Фролова. М.: Изд-во Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 2014. 58 с.
38. Жукова С.В., Шишкин В.М., Карманов В.Г., Подмарева Т.И., Безрукавая Е.А., Лутынская Л.А., Бурлачко Д.С. Основные климатические тенденции в бассейне Азовского моря на перспективу 2030 г. *Актуальные проблемы изучения черноморских экосистем — 2020 : тезисы докл. Всерос. онлайн-конф. (г. Севастополь, 19–22 октября 2020 г.)*. Севастополь: Изд-во Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», 2020: 43–45. <https://doi.org/10.21072/978-5-6044865-4-2>.
39. Шишкин В.М., Жукова С.В., Карманов В.Г., Лутынская Л.А., Бурлачко Д.С., Подмарева Т.И., Тарадина Е.А. Использование термохалинного способа для определения квазиоднородности водных масс Азовского моря. *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2022. Т. 5, № 1: 33–44. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2022_5_1_33.

REFERENCES

1. Tretiy otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. Obshchee rezyume [The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General summary]. I.A. Shumakov (ed.). Saint Petersburg: Naukoemkie tekhnologii [Science Intensive Technologies], 2022. 124 p. (In Russian).
2. Gidrometeorologicheskii spravochnik Azovskogo morya [Hydrometeorological directory of the Sea of Azov]. A.A. Aksenov (ed.). Leningrad: Gidrometeoizdat [Hydrometeorological Publishing House], 1962. 856 p. (In Russian).
3. Gidrometeorologicheskie usloviya shel'fovoy zony morey SSSR. T. 3. Azovskoe more [Hydrometeorological conditions of a shelf zone of the USSR Seas. Vol. 3. The Sea of Azov]. M.N. Knipovich (ed.). Leningrad: Gidrometeoizdat [Hydrometeorological Publishing House], 1986. 218 p.
4. Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey SSSR. T. 5. Azovskoe more [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Vol. 5. The Sea of

- Azov]. N.P. Goptarev (ed.). Leningrad: Gidrometeoizdat [Hydrometeorological Publishing House], 1991. 237 p. (In Russian).
5. Climatic atlas of the Sea of Azov, 2008. G.G. Matishov, S. Levitus, D.G. Matishov, Yu. Gargopa, S.V. Berdnikov, V. Kulyagin, O. Arkhipova, A. Chikin, I. Shabas, O.K. Baranova, I. Smolyar (eds.). *NOAA Atlas NESDIS*. 2008. Issue 65. 148 p.
 6. Ilyin Yu.P., Fomin V.V., Dyakov N.N., Gorbach S.B. Gidrometeorologicheskie usloviya morey Ukrainy. T. 1. Azovskoe more [Hydrometeorological conditions of the Ukrainian seas. Vol. 1. The Sea of Azov]. Sevastopol: Morskoe otdelenie Ukrainskogo nauchno-issledovatel'skogo gidrometeorologicheskogo instituta [Marine Branch of the Ukrainian Research Hydrometeorological Institute] Publ., 2009. 400 p. (In Russian).
 7. Pogoda i klimat. Meteonovosti, prognozy pogody, klimaticheskiy monitor, arkhivy pogody [Weather and climate. Meteorological news, weather forecast, climate monitoring, weather archives]. Available at: <https://www.pogodaiklimat.ru/> (accessed 10.08.2023). (In Russian).
 8. ESIMO. Edinaya gosudarstvennaya sistema informatsii ob obstanovke v Mirovom okeane : informatsionnyy portal. Dannye za 1999–2023 gg. [ESIMO. Unified State System of Information on the Global Ocean. Information system. Data for 1999–2023]. Available at: <http://esimo.ru> (accessed 07.09.2023). (In Russian).
 9. Rukovodstvo po gidrologicheskim rabotam v okeanakh i moryakh [Handbook of hydrological studies in oceans and seas]. V.M. Gruzinov, A.V. Sokov (eds.). Moscow: Gosudarstvennyy okeanograficheskiy institut im. N.N. Zubova [N.N. Zubov State Oceanographic Institute] Publ., 2016. 538 p. (In Russian).
 10. Metody rybokhozyaystvennykh i prirodookhrannykh issledovaniy v Azovo-Chernomorskom bassejne : sbornik nauchno-metodicheskikh rabot [Methods of fishery and nature protection research in the Azov-Black Sea Basin. Collection of research and methodological works]. S.P. Volovik, I.G. Korpakova (eds.). Krasnodar: AzNIIRKH Publ., Prosveshchenie-Yug [Awareness-South], 2005. 352 p. (In Russian).
 11. Kuropatkin A.P., Zhukova S.V., Shishkin V.M., Burlachko D.S., Karmanov V.G., Lutynskaya L.A., Fomenko I.F., Podmareva T.I. Izmenenie solenosti Azovskogo morya [Changes in salinity of the Azov Sea]. *Voprosy rybolovstva [Problems of Fisheries]*. 2013. Vol. 14, no. 4 (56): 666–673. (In Russian).
 12. Sovremennyy i perspektivnyy vodnyy i soleyoy balans yuzhnykh morey SSSR [Present and future water and salt balances of southern seas in the USSR]. A.I. Simonov, N.P. Goptarev (eds.). Moscow: Gidrometeoizdat [Hydrometeorological Publishing House], 1972. 236 p. (In Russian).
 13. Bronfman A.M., Dubinina V.G., Makarova G.D. Gidrologicheskie i gidrokhimicheskie osnovy produktivnosti Azovskogo morya [Hydrological and hydrochemical basis for the productivity of the Sea of Azov]. Moscow: Pishchevaya promyshlennost' [Food Industry], 1979. 288 p. (In Russian).
 14. Berdnikov S.V., Dashkevich L.V., Kulygin V.V. Klimaticheskie usloviya i gidrologicheskiy rezhim Azovskogo morya v XX – nachale XXI vv. [Climatic conditions and hydrological regime of the Sea of Azov in the XX – early XXI centuries]. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya [Aquatic Bioresources & Environment]*. 2019. Vol. 2, no. 2: 7–19. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2019_2_2_7. (In Russian).
 15. Dashkevich L.V., Kulygin V.V. Otsenka sredney temperatury poverkhnostnogo sloya Azovskogo morya na osnove dannykh sputnikovoy s"emki i nablyudeniy pribrezhnykh gidrometeostantsiy [The average temperature assessment of the surface layer of the Sea of Azov based on satellite imagery and observations at coastal hydrometeorological stations]. *InterKarto. InterGIS [InterCarto. InterGIS]*. 2019. Vol. 25, no. 1: 112–120. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-2-25-112-120>. (In Russian).
 16. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Serykh I.V., Lebedev S.A. Climate change in the hydrometeorological parameters of the Black and Azov Seas (1980–2020). *Oceanology*. 2021. Vol. 61, no. 6: 900–912. <https://doi.org/10.1134/S0001437021060060>.
 17. Borovskaya R.V. Issledovanie ledovykh usloviy Azovskogo morya i Kerchenskogo proliva v zimniy period 2015–2016 gg. i otsenka ikh vliyaniya na promyslovuyu obstanovku i protsess migratsii i naguly ryby [Studies of ice conditions in the Azov Sea and Kerch Strait in the winter season of 2015–2016, and the assessment of their impact on fishing conditions, fish migration and feeding]. *Trudy YugNIRO [Proceedings of the Southern Scientific Research Institute of Fisheries and Oceanography]*. 2017. Vol. 54: 35–41. (In Russian).
 18. Gargopa Yu.M. Krupnomasshtabnye izmeneniya gidrometeorologicheskikh usloviy formirovaniya bioproduktivnosti Azovskogo morya : avtoref. dis. dokt. geogr. nauk [Wide-scale changes in the hydrometeorological conditions of biological productivity formation in the Sea of Azov. Extended abstract of Doctor's (Geography) Thesis]. Murmansk: Murmanskii morskoy biologicheskiy institut Kol'skogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk [Murmansk Marine Biological Institute, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences] Publ., 2003. 47 p. (In Russian).
 19. Dyakov N.N., Ivanov V.A., Gorbach S.B. Sezonnaya i mezhgodovaya izmenchivost' gidrologicheskikh kharakteristik pribrezhnoy zony Azovskogo morya [Seasonal and inter-annual variability of hydrological characteristics of the coastal waters of the Sea of Azov]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shell'fovoy zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov*

- shel'fa [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]*. 2002. Issue 1 (6): 39–46. (In Russian).
20. Lur'e P.M., Panov V.D. An influence of climate changes on hydrological regime of the Don River in the early 21st century. *Russian Meteorology and Hydrology*. 1999. No. 4: 62–68.
 21. Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2019 g. [A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2019]. Moscow: Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy [Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring], 2020. 97 p. (In Russian).
 22. Bulygina O.N., Korshunova N.N., Razuvaev V.N. Izmeneniya rezhima vetra na territorii Rossii v poslednie desyatiletiya [Changes in the wind regime over Russia in the last decades]. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voeykova [Proceedings of the Voikov Main Geophysical Observatory]*. 2013. Issue 568: 156–172. (In Russian).
 23. Zhukova S.V. Obespechennost' vodnymi resursami rybnogo khozyaystva Nizhnego Dona [Availability of water resources for the fisheries of the Lower Don River]. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya [Aquatic Bioresources & Environment]*. 2020. Vol. 3, no. 1: 7–19. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2020_3_1_7. (In Russian).
 24. Zhukova S.V. Otsenka vliyaniya na vodnye bioresursy i sredu ikh obitaniya pri ekspluatatsii Tsimlyanskogo i Manychskikh vodokhranilishch [Assessment of the influence of the Tsimlyansk and Manych Reservoirs operation on aquatic bioresources and their environment]. In: *Rybkhozyaystvennyye problemy stroitel'stva i ekspluatatsii plotin i puti ikh resheniya : materialy zasedaniya tematicheskogo soobshchestva po problemam bol'shikh plotin i Nauchnogo konsultativnogo soveta Mezhevdomstvennoy ikhtologicheskoy komissii (g. Moskva, 25 fevralya 2010 g.) [The problem of influence of building and operation of dams on water bioresources and means to solve them. Proceedings of the Plenary Session of the Thematic community on problems of the big dams and the Scientific Advisory Council of the Interdepartmental Ichthyological Commission (Moscow, 25 February, 2010)]*. A.S. Martynov, Yu.A. Knizhnikov (eds.). Moscow: World Wildlife Fund Russia Publ., 2010: 47–67. (In Russian).
 25. Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P., Kashutina E.A., Barabanova E.A. Sovremennye i stsennyye izmeneniya rechnogo stoka v basseynakh krupneyshikh rek Rossii. Ch. 2. Basseyny rek Volgi i Dona [Current and prospective changes of the river runoff in the basins of the largest rivers in Russia. Part 2. Volga and Don River basins]. Moscow: MAKSS Press [MAX Press], 2014. 214 p. (In Russian).
 26. Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Georgiadi A.G., Dolgov S.V., Zaytseva I.S., Kashutina E.A., Melnik K.S. Gidrologiya antropogennogo napravleniya: stanovlenie, metody, rezul'taty [Anthropogenic hydrology: formation, methods, results]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographic series]*. 2017. No. 2: 8–23. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2017-2-8-23>. (In Russian).
 27. Shishkin V.M. Ekologo-rybkhozyaystvennoe znachenie zon smesheniya rechnykh i morskikh vod Azovskogo morya : avtoref. dis. kand. biol. nauk [Ecological and fishery importance of the mixing zones for river and Azov Sea waters]. Rostov-on-Don: AzNIIRKH Publ., 2004. 30 p. (In Russian).
 28. Bronfman A.M., Khlebnikov E.P. Azovskoe more: osnovy rekonstruktsii [Sea of Azov: principles of reconstruction]. Leningrad: Gidrometeoizdat [Hydrological Publishing House], 1985. 271 p. (In Russian).
 29. Zhukova S.V., Shishkin V.M., Kuropatkin A.P., Fomenko I.F., Lutynskaya L.A., Strelchenko O.V., Podmareva T.I., Ilyakhina T.I. Zakonomernosti sovremennoy gidrometeorologicheskoy rezhima Temryuksko-Akhtarskogo rayona Azovskogo morya [Regularities of the present-day hydrometeorological regime in the Sea of Azov Temryuksko-Akhtarsk Region]. *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse [Environmental Protection in Oil and Gas Complex]*. 2006. No. 9: 47–53. (In Russian).
 30. Volovik S.P., Korpakova I.G., Lavrenova E.A., Temerdashev Z.A. Ekosistema Azovskogo morya: rezhim, produktivnost', problemy upravleniya. Ch. 1. Rezhim i produktivnost' v period do zaregulirovaniya stoka rek [Ecosystem of the Azov Sea: regime, productivity, management problems. Part 1. Regime and productivity before river flow regulation]. Krasnodar: Kubanskiy gosudarstvennyy universitet [Kuban State University] Publ., 2008. 347 p. (In Russian).
 31. Kuropatkin A.P., Shishkin V.M., Burlachko D.S., Karmanov V.G., Zhukova S.V., Podmareva T.I., Fomenko I.F., Lutynskaya L.A. Sovremennyye i perspektivnyye izmeneniya solenosti Azovskogo morya [Present-day and prospective changes of the Azov Sea salinity]. *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse [Environmental Protection in Oil and Gas Complex]*. 2015. No. 11: 7–16. (In Russian).
 32. Dashkevich L.V., Kulygin V.V., Berdnikov S.V. Manyeletnyye izmeneniya sredney solenosti morya Azov. *Water Resources*. 2017. Vol. 44, no. 5: 749–757. <https://doi.org/10.1134/S0097807817040042>.
 33. Remizova S.S. Vodnyy balans Azovskogo morya [Water budget of the Sea of Azov]. *Vodnye resursy [Water Resources]*. 1984. No. 1: 104–121. (In Russian).
 34. Mnogoletnie izmeneniya ispareniya na Evropeyskoy territorii Rossii po dannym vodnoisparitel'noy seti : nauchno-prikladnoy spravochnik [Long-term variation

- in evaporation in the European Russia based on the data collected with water evaporation monitoring network]. V.S. Vuglinskiy (ed.). Saint Petersburg: RIAL, 2021. 64 p.
35. Georgievskiy V.Yu., Alekseev L.P., Grek E.A., Dubrovskaya K.A., Molchanova T.G., Fuksova T.V. Mnogoletnie izmeneniya sostavlyayushchikh vodnogo balansa Tsimlyanskogo vodokhranilishcha [Long-term variation in the components of the Tsimlyansk Reservoir hydrologic equilibrium]. In: *Lesnaya melioratsiya i ekologo-gidrologicheskie problemy Donskogo vodosbornogo basseyna : materialy Natsional'noy nauchnoy konferentsii (g. Volgograd, 29–30 oktyabrya 2020 g.)* [Forest reclamation and ecologically-hydrological problems of the Don catchment area. Proceedings of the National Scientific Conference (Volgograd, 29–30 October, 2020)]. Volgograd: Federal'nyy nauchnyy tsentr agroekologii, kompleksnykh melioratsiy i zashchitnogo lesorazvedeniya Rossiyskoy akademii nauk [Federal Scientific Center of Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences] Publ., 2020: 502–505. (In Russian).
 36. Akhmedov A.D., Vetrenko E.A., Kolotukhin I.N. Model' upravleniya vodnymi resursami Tsimlyanskogo vodokhranilishcha [Water resources management model of the Tsimlyan Reservoir]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education]. 2020. No. 1 (57): 368–380. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2020-01-36>. (In Russian).
 37. Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. Obshchee rezyume [The second assessment report of the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring of Russia (Roshydromet) on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General summary]. A.V. Frolov (ed.). Moscow: Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring of Russia] Publ., 2014. 58 p. (In Russian).
 38. Zhukova S.V., Shishkin V.M., Karmanov V.G., Podmareva T.I., Bezrukavaya E.A., Lutynskaya L.A., Burlachko D.S. Osnovnye klimaticheskie tendentsii v basseyne Azovskogo morya na perspektivu 2030 g. [Main prospective climatic trends in the Azov Sea Basin by the year 2030]. In: *Aktual'nye problemy izucheniya chernomorskikh ekosistem — 2020 : tezisy dokladov Vserossiyskoy onlayn-konferentsii (g. Sevastopol', 19–22 oktyabrya 2020 g.)* [Pressing issues of the Black Sea ecosystem research — 2020. Abstracts of the All-Russian Online Conference (Sevastopol, 19–22 October, 2020)]. Sevastopol: Federal'nyy issledovatel'skiy tsentr “Institut biologii yuzhnykh morey im. A.O. Kovalenskogo RAN” [Federal Research Center “A.O. Kovalensky Institute of Biology of the Southern Seas”] Publ., 2020: 43–45. <https://doi.org/10.21072/978-5-6044865-4-2>. (In Russian).
 39. Shishkin V.M., Zhukova S.V., Karmanov V.G., Lutynskaya L.A., Burlachko D.S., Podmareva T.I., Taradina E.A. Ispol'zovanie termokhalinnogo sposoba dlya opredeleniya kvaziodnorodnosti vodnykh mass Azovskogo morya [Use of the thermohaline method for determining the quasi-heterogeneity of the water masses in the Azov Sea]. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya* [Aquatic Bioresources & Environment]. 2022. Vol. 5, no. 1: 33–44. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2022_5_1_33. (In Russian).

Для цитирования: Жукова С.В., Мирзоян А.В., Шишкин В.М., Подмарева Т.И., Лутынская Л.А., Тарадина Е.А., Бурлачко Д.С., Карманов В.Г. Возможные сценарии формирования материкового стока и солёности вод Азовского моря с учетом современных и перспективных тенденций изменения климата. Водные биоресурсы и среда обитания. 2023. Т. 6, № 4: 7–30.

Об авторах:

Жукова Светлана Витальевна, кандидат географических наук, доцент, заведующая лабораторией гидрологии Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ») (344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Береговая, 21в), zhukovav@azniirkh.vniro.ru

Мирзоян Арсен Вячеславович, кандидат биологических наук, заместитель директора Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»), руководитель Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ») (105187, г. Москва, Окружной проезд, 19), arsenfish@vniro.ru; mirzoyanav@azniirkh.vniro.ru

Шишкин Валентин Михайлович, кандидат биологических наук, главный специалист Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ») (344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Береговая, 21в), shishkinvm@azniirkh.vniro.ru

Подмарева Татьяна Ивановна, главный специалист Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ») (344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Береговая, 21в), podmarevati@azniirkh.vniro.ru

Лутынская Людмила Анатольевна, главный специалист Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ») (344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Береговая, 21в), lutynskayala@azniirkh.vniro.ru

Тарадина Есения Андреевна, главный специалист Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ») (344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Береговая, 21в), taradinaea@azniirkh.vniro.ru

Бурлачко Дмитрий Сергеевич, главный специалист Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ») (344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Береговая, 21в), burlachkods@azniirkh.vniro.ru

Карманов Вениамин Геннадьевич, главный специалист Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ») (344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Береговая, 21в), karmanovvg@azniirkh.vniro.ru

Поступила в редакцию 06.10.2023

Поступила после рецензии 13.11.2023

Принята к публикации 17.11.2023

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант.

Received 06.10.2023

Revised 13.11.2023

Accepted 17.11.2023

Conflict of interest statement

The authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.