

УДК 551.465

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧЕРНОГО И АЗОВСКОГО МОРЕЙ (1980–2020 гг.)

© 2021 г. А. И. Гинзбург^{1, *}, А. Г. Костяной^{1, 2, 3}, И. В. Серых^{1, 2}, С. А. Лебедев²¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия²Геофизический центр РАН, Москва, Россия³Московский университет им. С.Ю. Витте, Москва, Россия

*e-mail: Ginzburg@ocean.ru

Поступила в редакцию 15.06.2021 г.

После доработки 28.06.2021 г.

Принята к публикации 17.08.2021 г.

Для исследования характера климатических изменений гидрометеорологических параметров Черного и Азовского морей – приповерхностной температуры воздуха (ТВП), температуры поверхности моря (ТПМ), ледовитости и уровня – в условиях продолжающегося глобального потепления использованы данные реанализов и дистанционного зондирования Земли, а также сведения из известных публикаций последних лет. Установлено, что на фоне роста ТВП над Черноморско-Азовским регионом ($+0.053^{\circ}\text{C}/\text{год}$ в 1980–2020 гг.) и ТПМ Черного моря ($+0.052^{\circ}\text{C}/\text{год}$ в 1982–2020 гг.) значения этих параметров в 2000-е гг. заметно отличаются от таковых в 1980-е–1990-е гг.: увеличились максимальные среднемесячные летние и минимальные среднемесячные зимние значения температуры, увеличилось количество мягких зим. Среднегодовая ТПМ Черного моря, практически не превышавшая в 1980-х–начале 1990-х гг. 15°C , с 2010 г. в большинстве случаев превысила 16°C (максимум – 16.71°C в 2018 г.). Во второй декаде 2000-х гг. среднемесячные зимние минимумы, за исключением зим 2011/2012 и 2016/2017 гг., не опускались ниже 8°C . Следствием роста зимних значений температуры явилось уменьшение концентрации льда в Азовском море (тренд среднемесячной концентрации – $-1.2\%/10$ лет). Примерно с 2004–2010 гг. в Черном море и с 2004 г. в Азовском тенденция повышения их уровней (в среднем) сменилась некоторым понижением, так что средние положительные тренды за период 1993–2020 гг. ($+0.32 \pm 0.16$ см/год в Черном и $+0.21 \pm 0.05$ см/год в Азовском морях) оказались примерно в 2.5 раза меньшими, чем в 1993–2012 гг. Причиной этого понижения уровней (в среднем) в последние 10–15 лет явилось, по-видимому, уменьшение приходной части пресноводного баланса обоих морей, косвенным подтверждением которого является наблюдаемое повышение солености их вод.

Ключевые слова: Черное море, Азовское море, региональные изменения климата, температура воздуха у поверхности, температура поверхности моря, ледовитость, уровень моря

DOI: 10.31857/S003015742106006X

ВВЕДЕНИЕ

Полузамкнутые Черное и Азовское моря, связанные между собой Керченским проливом и через систему турецких проливов – со Средиземным морем и далее через Гибралтарский пролив с Атлантическим океаном, характеризуются существенной межгодовой изменчивостью гидрометеорологических параметров. Важные народнохозяйственное и военно-стратегическое значения этих южных морей России, в частности, задачи экологии, туризма, рыболовства, инфраструктуры на берегах и судоходства, делают, с учетом этой изменчивости, чрезвычайно важным непрерывный мониторинг таких гидрометеорологических параметров этих морей, как температура воды и воздуха, ледовитость (площадь, по-

крытая льдом любой сплоченности, в процентах от общей площади моря), уровень моря и определяющие их факторы.

Долговременной изменчивости этих гидрометеорологических параметров в разные временные периоды посвящено немало работ, основанных на доступных натуральных данных и спутниковых измерениях. Обобщение известных результатов исследований по данной проблеме, ограниченных в основном 2012 г., содержится в работе [14]. Показано, в частности, что в период 1982–2009 гг. среднегодовая температура поверхности (ТПМ) Черного моря в целом, по спутниковым данным, увеличивалась со средней скоростью $+0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$, тогда как на более длительном временном интервале с 1938 по 2009 гг. тренд среднегодовой

ТПМ, например, на гидрометеостанции (ГМС) Геленджик [19] был существенно меньшим ($+0.009^{\circ}\text{C}/\text{год}$) вследствие малого изменения температуры до 1970-х гг. Среднегодовая ТПМ Азовского моря в период с 1920-х до 1980-х гг. менялась мало, однако в 1988–2000 гг. наблюдался ее заметный тренд ($+0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$) [8]. Тренд температуры воды для теплого периода апрель–ноябрь в Азовском море в 1982–2009 гг., оцененный по спутниковым данным, оказался равным $+0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$ [14]. Рост температуры поверхности обоих морей был связан с глобальным потеплением, наблюдающимся с середины 1970-х гг. (Заметим, что на фоне многолетнего положительного тренда ТПМ в этот период в годы 1982–1993 тренд ТПМ был отрицательным, равным $-0.03^{\circ}\text{C}/\text{год}$, вследствие низких среднегодовых значений ТПМ в 1985, 1987 и 1993 гг. [30]).

В период с 1993 по 2012 гг. существенно увеличилась и скорость подъема уровня в Черном и Азовском морях [14]. Средняя для 1993–2012 гг. скорость подъема уровня Черного моря оказалась равной $+0.82 \pm 0.18$ см/год, что в 4–5 раз больше значения $+0.17-0.18$ см/год для периода с 1920-х до середины 1990-х гг. [6, 21]. В Азовском море в 1993–2012 гг. положительный линейный тренд уровня составил $+0.54 \pm 0.04$ см/год, тогда как средняя скорость повышения уровня с 1920-х гг. до 1985 г. была примерно вдвое меньшей ($+0.24$ см/год) [22]). Подъем уровней обоих морей с середины 1970-х гг. (в среднем) был обусловлен ростом приходной составляющей их водного баланса и подъемом уровня Мирового океана в результате глобального потепления.

В настоящее время глобальное потепление и связанный с ним рост уровня Мирового океана, главным образом из-за таяния ледников и ледовых щитов Гренландии и Антарктиды [40], продолжают. Так, по данным NASA Goddard Institute for Space Studies (2021) GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP v4), последние 7 лет были самыми теплыми на Земле, при этом годами с наибольшими аномалиями глобальной температуры (относительно средней для периода 1951–1980 гг.) были 2016 и 2020 гг. Средняя скорость роста уровня Мирового океана увеличилась во вторую декаду XXI в.: с $+3.2$ мм/год в период 1998–2015 гг. до $+3.6$ мм/год в 2006–2015 гг. [40].

В данной статье рассматриваются сезонная и межгодовая изменчивость и линейные тренды температуры воздуха вблизи поверхности (ТВП), ТПМ, ледяного покрова в Черном и Азовском морях в период с 1980/1982 по 2020 гг., а также уровень этих морей с 1993 по 2020 гг. на основе свободно доступных баз данных. Полученные тренды гидрометеорологических параметров сравниваются с оцененными ранее за период с 1982 по

2009/2012 гг. [14] и соответствующими сведениями из публикаций последних лет.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Для анализа использованы временные последовательности среднемесячных значений исследуемых параметров. Среднемесячные значения температуры воздуха на высоте 2 м от поверхности в регионе Черного и Азовского морей за период 1980–2020 гг. получены из базы данных NASA MERRA-2 на сетке 0.5° широты \times 0.625° долготы [29] и осреднены по пространству в пределах $40^{\circ}-48^{\circ}$ с.ш. и $27^{\circ}-42^{\circ}$ в.д. Среднемесячные данные ТПМ за период 1982–2020 гг. получены осреднением среднесуточных данных исходного массива NOAA OI SST v2 high resolution dataset на сетке $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ [38]. Затем эти среднемесячные данные осреднены по акватории Черного моря в пределах $41^{\circ}-47^{\circ}$ с.ш. и $27^{\circ}-42^{\circ}$ в.д. Для Азовского моря, покрывающегося полностью или частично льдом с декабря по март, временная последовательность среднемесячных значений ТПМ не создавалась, и для анализа использовались только данные известных публикаций последних лет.

По среднемесячным данным ТВП Черноморско-Азовского региона и ТПМ Черного моря в каждом узле сетки рассчитан средний годовой ход за рассматриваемые периоды. Затем этот средний годовой ход в каждом узле сетки вычтен из данных для получения среднемесячных аномалий относительно среднего годового хода (далее – просто аномалии), по которым рассчитывался линейный тренд параметра.

Линейные тренды вычислялись методом наименьших квадратов. Применялся фильтр Баттвортта нижних частот. Графики изменений аномалий помещены на графики изменений самих параметров, так чтобы среднее значение аномалий (равное нулю) совпало со средним значением ТВП и ТПМ за рассматриваемый период; шкалы при этом приведены в один масштаб.

Среднемесячные значения концентрации льда в Азовском море получены осреднением среднесуточных значений из массива CMEMS EUMETSAT OSI SAF SEAICE_GLO_SEAICE_L4_REP_OBSERVATIONS_011_009 на сетке приблизительно 12.5 км за период 1980–2020 гг. [28]. Среднемесячные данные осреднялись по акватории Азовского моря в пределах $45.25^{\circ}-47.5^{\circ}$ с.ш., $34.5^{\circ}-39.5^{\circ}$ в.д.

Для анализа межгодовой изменчивости уровней Черного и Азовского морей (январь 1993–декабрь 2020 гг.) использовался временной ход аномалий уровня морей, рассчитанных по данным вдольтрековых альтиметрических измерений спутников TOPEX/Poseidon (Т/Р) и Jason 1/2/3 (J1/2/3). Обработка данных спутниковых альти-

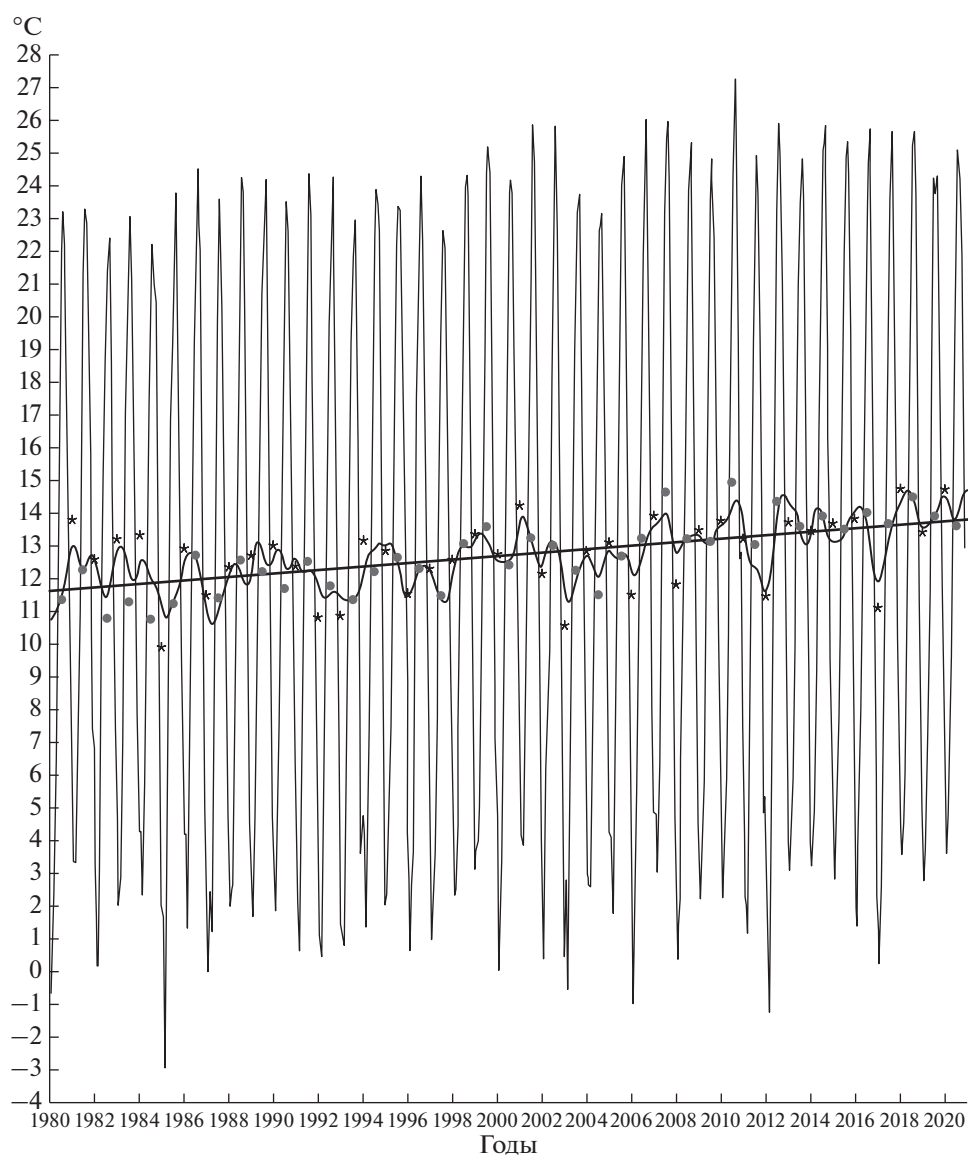


Рис. 1. Сезонная и межгодовая изменчивость среднемесячных значений температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) над Черноморско-Азовским регионом (40° – 48° с.ш., 27° – 42° в.д.) в 1980–2020 гг. (NASA MERRA-2). Черная кривая линия – аномалии температуры, сглаженные 1-летним фильтром Баттерворта нижних частот, прямая – линейный тренд этих аномалий. Кружками отмечены средние значения аномалий для летнего (июнь–август), звездочками – для зимнего (декабрь–февраль) сезонов.

метров проводилась с использованием программного обеспечения Интегрированной базы данных спутниковой альтиметрии, разработанного в Геофизическом центре РАН (см. [16, 18]).

РЕЗУЛЬТАТЫ. СОПОСТАВЛЕНИЕ С ДАННЫМИ ИЗВЕСТНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Температура воздуха над Черноморско-Азовским регионом

Тенденции изменений ТВП над Черным и Азовским морями, при некоторых региональных отличиях, в основном схожи [14]. Поэтому в данной работе оценивался тренд ТВП над Черномор-

ско-Азовским регионом в целом (40° – 48° с.ш. и 27° – 42° в.д.).

Рисунок 1 дает представление о сезонной и межгодовой изменчивости среднемесячной ТВП в данном регионе за 41-летний период (с января 1980 по декабрь 2020 гг.). Линейный положительный тренд ТВП за этот период составил $+0.053^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Эта оценка хорошо согласуется с измерениями на ГМС Геленджик: в период с 1987 по 2017 гг. тренд ТВП составил $+0.051^{\circ}\text{C}/\text{год}$, тогда как за 82 года с 1935 по 2017 гг. рост ТВП происходил с втрое меньшей скоростью $+0.017 \pm 0.005^{\circ}\text{C}/\text{год}$ [20]. Та же оценка тренда ТВП $+0.05^{\circ}\text{C}/\text{год}$ по данным

ряда ГМС, расположенных по периферии Черного моря, приведена в [2].

Как следует из рис. 1, с конца 1990-х гг. максимальные среднемесячные летние значения ТВП в среднем заметно возросли, с экстремальным значением 27.2°C в 2010 г., когда с конца июня в течение 55 дней над центральной частью Европейской России стоял блокирующий антициклон [24]. С конца 1990-х гг. увеличились в среднем и минимальные зимние среднемесячные значения ТВП, однако заметно и более частое повторение экстремально низких среднемесячных значений температуры в 2000-е гг. с ярко выраженными отрицательными аномалиями (зимы 2002/2003, 2005/2006 и 2011/2012 гг.) по сравнению с 1980-ми–1990-ми гг. (рис. 1). Особенно суровой была зима 2011/2012 г., когда аномально холодная погода наблюдалась в январе и феврале в центральной и южной Европе, и впервые за 80 лет покрылись льдом каналы Венеции и пирсы Женевского озера [36]. Зимние сезоны 1980/1981, 1998/1999, 2000/2001, 2013/2014, 2017/2018 и 2019/2020 гг. были наиболее теплыми за исследуемый период.

Зимы на Черном море принято подразделять, в зависимости от суммы градусо-дней мороза S по данным измерений на прибрежных ГМС, на 3 типа [2, 12]: мягкие ($S > -200^{\circ}\text{C}$), умеренные (S от -200 до -400°C) и суровые ($S < -400^{\circ}\text{C}$). Зима 2018/2019 г. была, в соответствии с оценкой в работах [2, 3], экстремально мягкой в Черном и Азовском морях ($S = -66.5^{\circ}\text{C}$ в северо-западной части Черного моря и -63.7°C в Азовском море и Керченском проливе). К мягким зимам в 2000-е гг. относятся и зимы 2000/2001, 2006/2007, 2014/2015, 2015/2016 гг. [1, 3]. Судя по рис. 1, теплыми были также зимы 2017/2018 и 2019/2020 гг. Средняя температура воздуха зимой 2018/2019 г. в Черноморско-Азовском регионе была, по данным [3], на 2.7°C выше нормы.

Температура поверхности Черного и Азовского морей

Температура поверхности воды в Черном море, как и температура воздуха (рис. 1), существенно выросла за рассматриваемый период (рис. 2). Максимальные среднемесячные летние и минимальные зимние значения ТПМ с конца 1990-х гг. в среднем увеличились: летние максимумы в большинстве случаев превысили 25°C с экстремумом 26.94°C в августе 2010 г.; в последней декаде 2000-х гг. зимние минимумы в большинстве случаев не опускались ниже 8°C . В отличие от середины 1980-х–начала 1990-х гг., только зимой 2006 г. минимальная среднемесячная ТПМ заметно опустилась ниже 7°C (6.42°C в феврале). Максимальные летние и минимальные/максимальные зимние значения ТПМ соответствуют примерно тем же годам, что и у ТВП. Наиболее низкие зимние

значения температуры в эти годы отмечены в 2003, 2006, 2008, 2012 и 2017 гг.

Линейный тренд ТПМ за 39-летний период 1982–2020 гг. (рис. 2) оказался равным $+0.052^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Полученная оценка хорошо согласуется со значениями трендов ТПМ Черного моря в работах других авторов в близкие временные периоды: $+0.052^{\circ}\text{C}/\text{год}$ в 1995–2015 гг. [37], $+0.040^{\circ}\text{C}/\text{год}$ (сентябрь 1981–ноябрь 2015 гг.) [25], $+0.072^{\circ}\text{C}/\text{год}$ по данным ГМС Геленджик [20] в период 1987–2017 гг. (за 82 года 1935–2017 гг. он составлял примерно вдвое меньшую величину $+0.031 \pm 0.005^{\circ}\text{C}/\text{год}$). Оценка тренда температуры поверхностного слоя Черного моря $+0.07^{\circ}\text{C}/\text{год}$ дана в [2].

Рост среднегодовой ТПМ Черного моря в среднем за рассматриваемый 39-летний период демонстрирует рис. 3 (линейный тренд ТПМ — $+0.052^{\circ}\text{C}/\text{год}$). Среднегодовая ТПМ, практически не превышавшая в 1980-х–начале 1990-х гг. 15°C , в 2018, 2019 и 2020 гг. достигла 16.71 , 16.34 и 16.58°C соответственно. Данные значения хорошо согласуются с измерениями на ГМС в 2019 г. [2]: средние за год значения ТПМ на крымском побережье в Севастополе, Ялте и Алуште составили 16.6 , 16.1 и 16.2°C соответственно, что на 1.6 , 1.6 и 1.5°C выше среднемноголетних; меньшее значение ТПМ 15.2°C , на 2.1°C выше среднемноголетней, зарегистрировано в Феодосии, где заметно воздействие азовоморских вод [13]; в северо-восточной части Черного моря — более высокие среднегодовые значения ТПМ: 16.6°C в Новороссийске, 17.1°C в Туапсе, 17.5°C в Сочи, что на 1.6 , 1.3 и 1.4°C соответственно выше среднемноголетних. Диапазон изменения среднегодовой ТПМ моря в целом в период 1982–2020 гг. с максимумом в 2018 г. и минимумом в 1987 г. (13.79°C) составил 2.92°C (рис. 3).

Тренды ТПМ неравномерно распределены по акватории Черного моря (рис. 4). Наибольшие значения ($+0.058$ – $0.060^{\circ}\text{C}/\text{год}$) наблюдаются вдоль северо-восточного побережья моря, минимальные (менее $+0.044^{\circ}\text{C}/\text{год}$) — в центре его западной части (в области западного циклонического круговорота) и в самой северной части северо-западного шельфа. Примерно та же картина распределения трендов ТПМ по акватории моря для периода 1981–2015 гг. представлена в работе [25]. В северо-восточной части моря в 1983–2015 гг. были зарегистрированы тренды ТПМ в пределах $+0.075$ – $0.084^{\circ}\text{C}/\text{год}$ [35]. Различия в региональных трендах среднегодовой ТПМ Черного моря, оцененных для периода 1982–2009 гг., отмечались и ранее в работах [5, 16, 30]: в прикерченском, северо-восточном и прибосфорском регионах тренды ТПМ составляли $+0.08$, $+0.06$ и $+0.05^{\circ}\text{C}/\text{год}$ соответственно при тренде для моря в целом $+0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$.

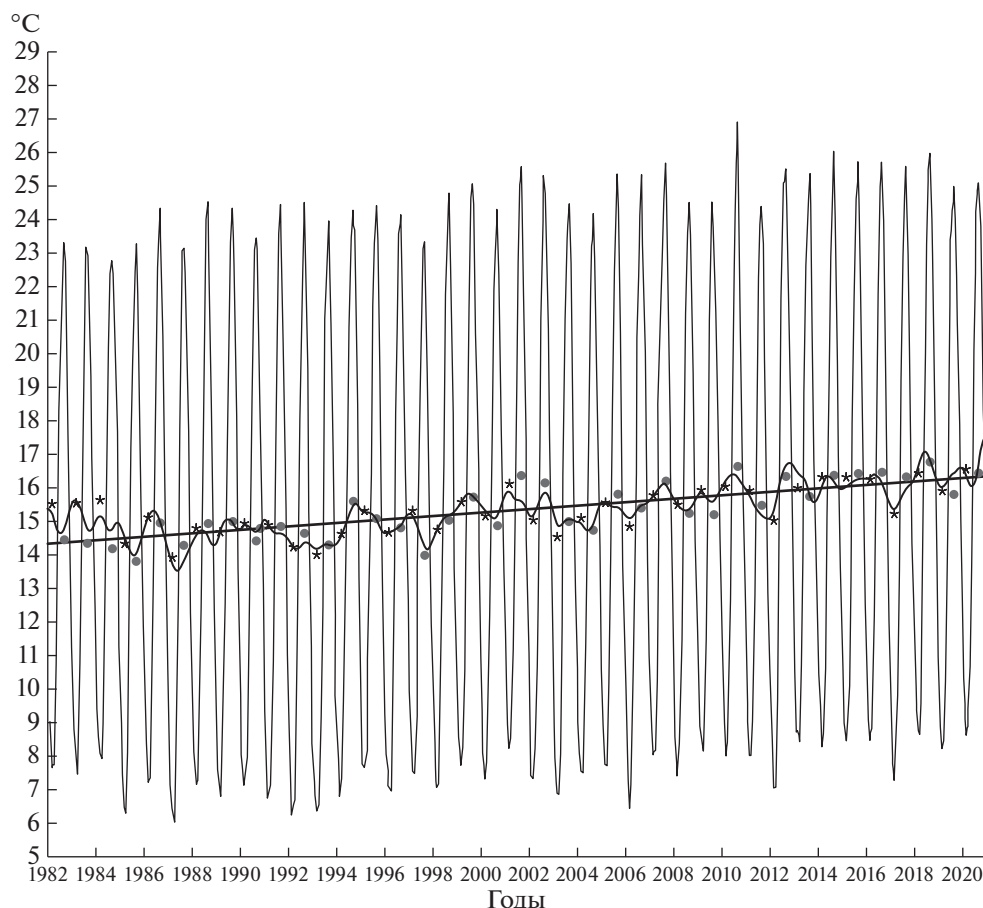


Рис. 2. Сезонная и межгодовая изменчивость среднемесячных значений температуры поверхности Черного моря ($^{\circ}\text{C}$) (41° – 47° с.ш., 27° – 42° в.д.) в 1982–2020 гг. (NOAA OI SST v2 high resolution dataset). Обозначения аномалий и тренда – те же, что на рис. 1. Кругами отмечены средние значения аномалий для летнего (июль–сентябрь), звездочками – для зимнего (январь–март) гидрологических сезонов.

Распределение трендов ТПМ по акватории связано с физико-географическими, гидрологическими особенностями и динамикой вод в различных частях Черного моря. Северо-восточный регион находится под влиянием распространяющихся на северо-запад теплых вод Основного черноморского течения (ОЧТ) и образования/распространения в направлении ОЧТ мезомасштабных антициклонических вихрей. Кроме того, на участке 43° – 44° с.ш. кавказского побережья и у анатолийского побережья нередко происходит отделение антициклонических вихрей и их трансформация в вихри открытого моря [44], что обуславливает, возможно, изгибы изолинии тренда $0.56^{\circ}\text{C}/10$ лет в сторону центра восточной части моря на рис. 4.

Характер изменения среднегодовых значений ТПМ во времени в Черном и Азовском морях в среднем одинаков [5, 16]. По данным Дашкевич и Кулыгина [9], в период 1982–2015 гг. наблюдался рост среднегодовой ТПМ (в среднем) в самом Азовском море и в Таганрогском заливе, причем

ее увеличение в 2000–2015 гг. по сравнению с 1982–1999 гг. составило в среднем 0.95°C в море и 0.84°C в заливе. Повышение среднегодовой ТПМ прослеживалось с середины 1990-х гг. до 2010 г. (тренды $+0.05^{\circ}\text{C}/\text{год}$ в самом море и $+0.04^{\circ}\text{C}/\text{год}$ в заливе), далее до 2015 г. наблюдалось ее некоторое понижение. Наиболее высокая среднегодовая ТПМ в период 1982–2015 гг., соответствующая 2010 г., была равна примерно 13.7°C в самом море и 13.4°C в Таганрогском заливе, тогда как среднегодовая ТПМ Черного моря в 2010 г. равнялась 16.19°C (рис. 3), т.е. была примерно на 2.8°C выше среднегодовой ТПМ Азовского моря. В 2019 г. среднегодовая ТПМ в Таганрогском заливе составляла 13°C [3], следовательно, в самом Азовском море она была на несколько десятых долей градуса выше (в пределах 0.7°C , как показывает сравнение данных в работе [9]). В Черном море в 2019 г. среднегодовая ТПМ составляла 16.34°C (рис. 3). Это и ранее выполненное [5, 16] сопоставление среднегодовых ТПМ Черного и Азовского морей показывает, что разница между ними в разные годы составляет 2 – 3°C .

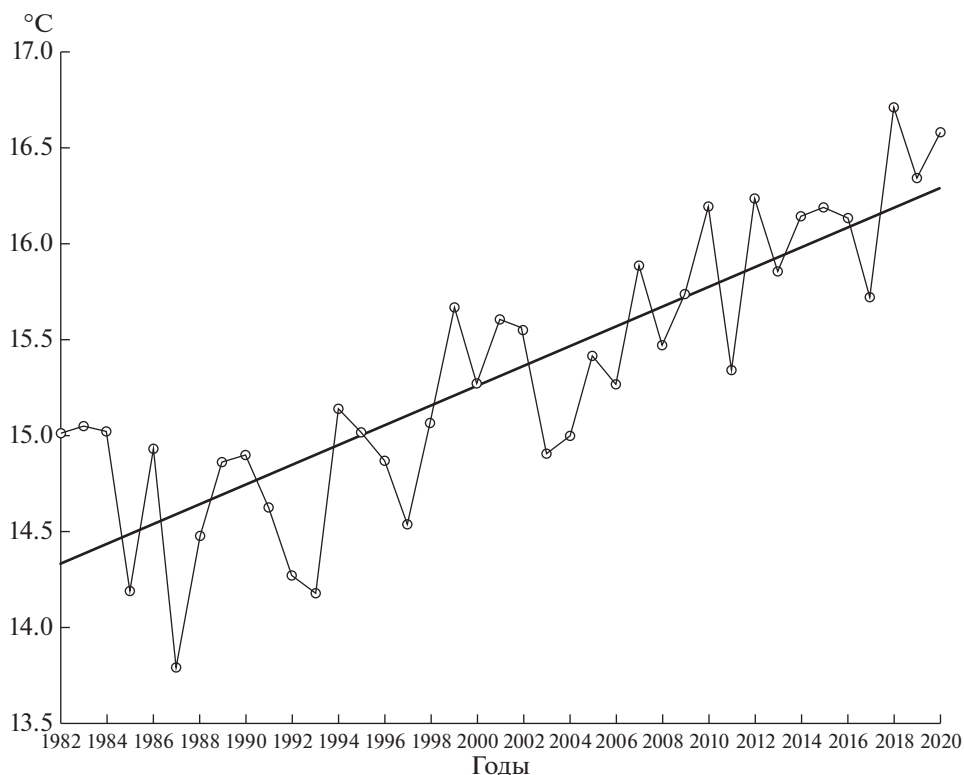


Рис. 3. Среднегодовые значения температуры поверхности Черного моря (°C) в 1982–2020 гг. Прямая линия – их линейный тренд.

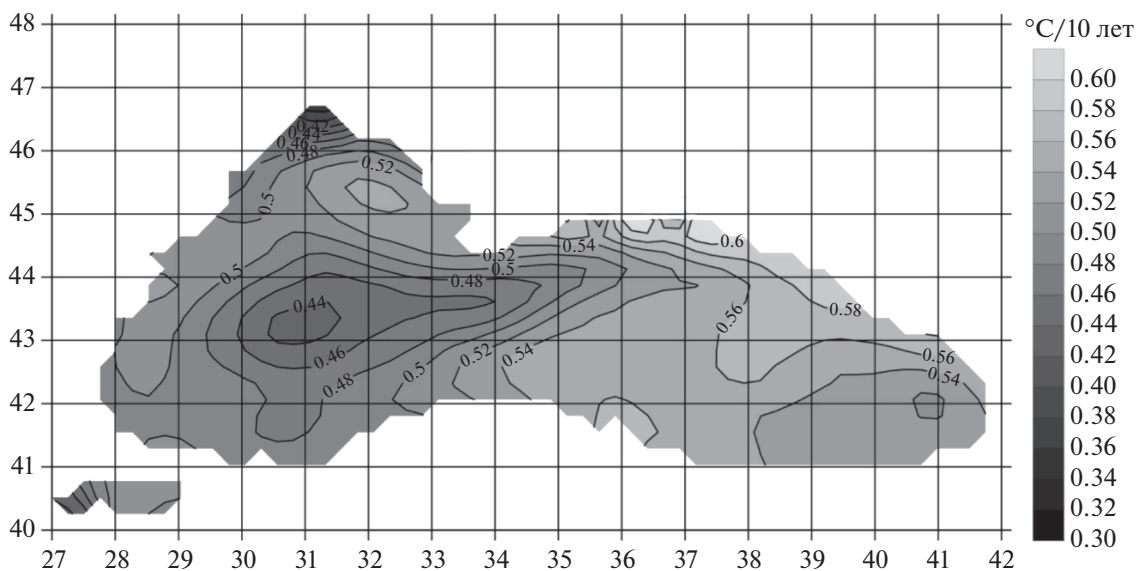


Рис. 4. Распределение трендов температуры поверхности Черного моря (°C/10 лет) по акватории в период 1982–2020 гг.

Уровни Черного и Азовского морей

Межгодовые изменения аномалий уровней Черного и Азовского морей по данным вдольтрековых альтиметрических измерений Т/Р и J1/2/3 в период 1993–2020 гг. показаны на рис. 5 и 6 со-

ответственно. Многолетняя изменчивость уровня Черного моря характеризуется чередующимися периодами его подъема и спада. При этом на разных отрезках времени скорость подъема уровня менялась от минимального значения +2.64 см/год

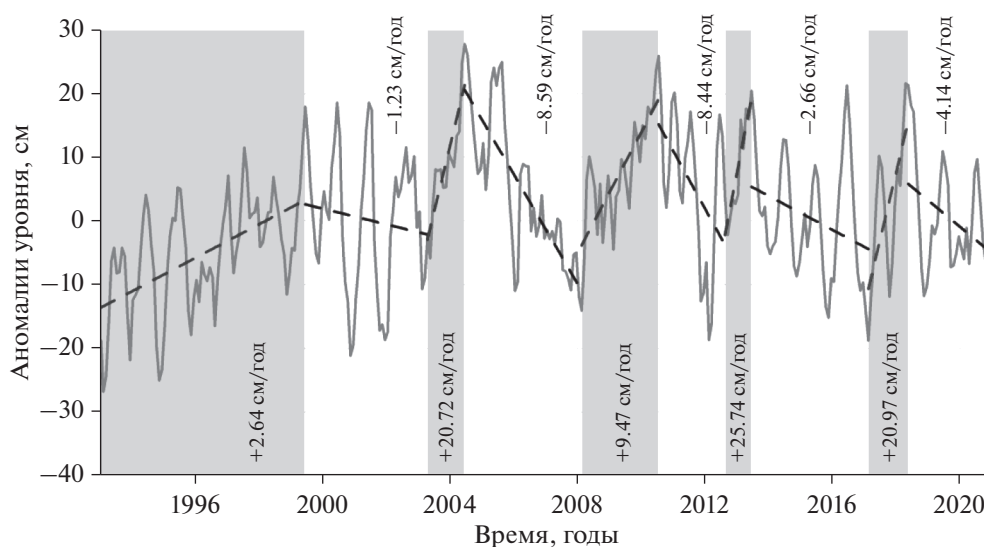


Рис. 5. Изменения аномалий уровня Черного моря (см) с января 1993 по декабрь 2020 гг. по данным альтиметров спутников Т/Р и J1/2/3 (сплошная линия). Межгодовая изменчивость их средних значений показана пунктиром. Периоды подъема уровня выделены серым цветом.

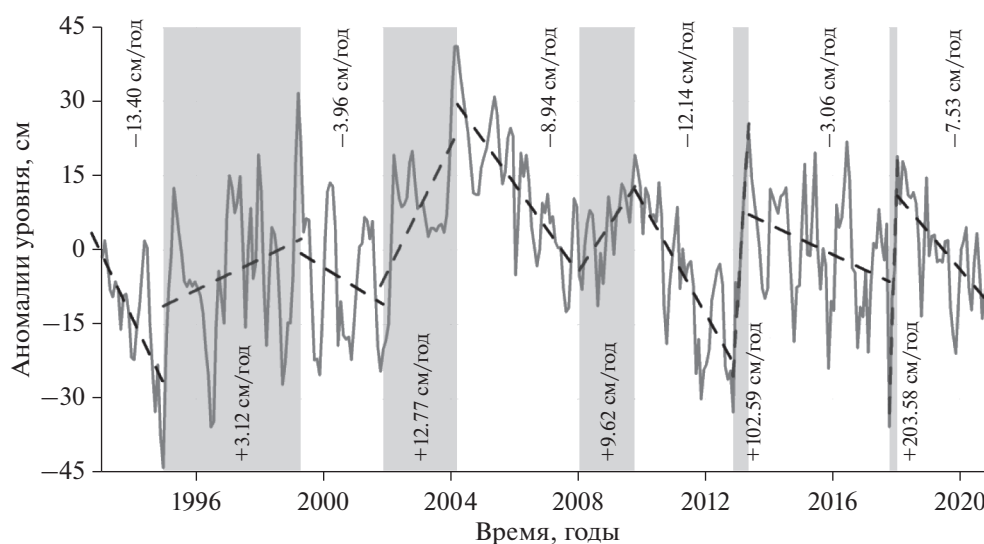


Рис. 6. Изменения аномалий уровня Азовского моря (см) с января 1993 по декабрь 2020 гг. по данным альтиметров спутников Т/Р и J1/2/3. Обозначения – те же, что на рис. 5.

с января 1993 г. по июнь 1999 г. до максимального $+25.74$ см/год с августа 2012 г. по июль 2013 г.; скорость падения уровня менялась от -1.23 см/год с июня 1999 г. по апрель 2003 г. до -8.59 см/год с июня 2004 г. по февраль 2008 г. Средний же для 1993–2020 гг. линейный тренд уровня $+0.32 \pm 0.16$ см/год оказался примерно в 2.5 раза меньшим, чем в 1993–2012 гг. ($+0.82 \pm 0.18$ см/год), хотя еще в 1.5 раза большим, чем с 1920-х до середины 1990-х гг. ($0.17-0.18$ см/год) [14].

Меньшее значение тренда за период, охватывающий вторую декаду 2000-х гг., связано со сме-

ной тенденции изменения уровня моря от его повышения (в среднем) к некоторому понижению (в среднем) примерно с 2004–2010 гг.; при этом отрезки времени с повышением уровня стали более короткими, а понижения – более длительными (рис. 5). Уменьшение общего положительного тренда уровня в период, охватывающий 2010-е гг., заметно и по результатам других публикаций. Если в 1992–2005 гг., по данным в [15], тренд уровня Черного моря оценивался в $+0.76 \pm 0.03$ см/год, то в 1993–2014 гг. он составил $+0.31$ см/год [33] и $+0.32 \pm 0.08$ см/год [25], а в период с января 1993 по май 2017 гг. – $+0.25 \pm 0.05$ см/год [26].

Заметим, что локальные значения тренда уровня отличаются от приведенных для определенных периодов средних для моря в целом, что связано с особенностями крупномасштабной и мезомасштабной динамики моря [33]. Так, из-за интенсификации Основного черноморского течения в 1992–2005 гг. скорость подъема уровня в прибрежных районах моря $+0.8–0.95$ см/год была в 1.5–2 раза выше, чем в его глубоководной части при среднем для моря значении тренда $+0.76 \pm \pm 0.03$ см/год [15]. Средние для периода 1993–2014 гг. положительные тренды уровня менялись от максимального $+0.34$ см/год в юго-восточной части моря до минимального $+0.3$ см/год в районе восточного циклонического круговорота [25]. По данным работы [33], средняя для того же периода 1993–2014 гг. скорость подъем уровня менялась от $+0.15$ см/год в центральной части моря до $+0.35–0.38$ см/год на его периферии и над мелководным северо-западным шельфом и до $+0.5$ см/год в юго-восточной части моря. Значения тренда уровня $+0.24–0.32$ см/год для периода 1993–2015 гг. получены у побережья Краснодарского края и Абхазии [35], с минимумом $+0.16–0.18$ см/год в глубоководной восточной части моря. На распределении по акватории моря средних за 1979–2017 гг. трендов уровня, построенном в Климатическом центре Гамбургского университета и приведенном в работе [2], значения трендов меняются от 0.225 см/год на периферии моря до 0.175 см/год в центре его восточной части.

Заметим, что разница в величинах тренда уровня Черного моря в разных работах обусловлена использованием в них различных данных. Так, для наших исследований использовались вдольтрековые данные, а в работах [15, 25, 33] использовались карты аномалий уровня, построенные на регулярной сетке с шагом 0.125° по широте и долготе на основе данных альтиметрических измерений не только спутников Т/Р и J1/2/3, но и других спутников, например, ERS-1/2 и ENVISAT. Сама процедура оптимальной интерполяции, использованная при создании карт аномалий уровня, вносит ошибки в данные спутниковых измерений. Карты аномалий уровня строятся для каждых суток, но в силу особенности данных спутниковой альтиметрии (повторяемость измерений вдоль треков – раз в 10 дней) бывают пропуски, то есть в некоторые сутки данные спутниковой альтиметрии для акваторий Черного и Азовского морей просто отсутствуют.

Средняя за 28-летний период 1993–2020 гг. скорость подъема уровня Азовского моря (рис. 6) равна $+0.21 \pm 0.05$ см/год. То есть линейный тренд подъема уровня в 1993–2020 гг. уменьшился примерно в 2.6 раза по сравнению с приведенными в работе [14] значениями для 1993–2012 гг. ($+0.54 \pm 0.04$ см/год) и практически сравнялся с трендом, зарегистрированным в период с 1920-х гг.

до 1985 г. ($+0.24$ см/год). Переход от повышения уровня моря (в среднем) к понижению, при чередующихся относительно коротких временных интервалах повышения и более длительных интервалах понижения уровня, произошел в 2004 г. (год максимальной аномалии уровня). Таким образом, и в Черном (примерно с 2004–2010 гг.), и в Азовском (примерно с 2004 г.) морях наблюдается постепенное понижение (в среднем) уровня моря. За 28 лет с 1993 по 2020 гг. уровень Черного моря поднялся примерно на 9 см, Азовского – примерно на 6 см.

Ледовитость

Для ледового режима Черного и Азовского морей характерна существенная межгодовая изменчивость. В Черном море лед появляется в основном на мелководном северо-западном шельфе, в Керченском проливе и на прикерченском шельфе. Вследствие синоптической изменчивости атмосферных процессов, ветро-волнового воздействия и адвекции теплых вод в этих мелководных районах с малым теплозапасом в зимний сезон возможно неоднократное появление и исчезновение льда [2]. Ледовитость в них тесно связана с суммой отрицательных среднесуточных значений температуры воздуха над морем за ледовый сезон (коэффициент корреляции для северо-западной части моря – 0.92 [2, 12]). В 2000-е гг., при увеличении количества мягких зим (рис. 1, 2), произошло соответствующее уменьшение ледовитости. Так, в мягкую зиму 2018/2019 гг. льда в открытых регионах северо-западной части моря не наблюдалось, он кратковременно появлялся только в Днепро-Бугском и Днестровском лиманах и в Тендровском заливе [2]. Однако в суровые зимы площадь, покрытая льдом, существенно увеличивается. В суровую зиму 2011/2012 гг. море покрылось льдом в Керчи, Евпатории, Новороссийске, Одессе, Констанце [14]. Замерзли весь Одесский залив, Днепро-Бугский лиман, Керченский пролив, берега у Румынии и Болгарии, Дунай; прекратилось судоходство по проливу Босфор [7]. В холодную зиму 2005/2006 гг. замерзание бухт Севастополя было даже сильнее, чем в 2012 г. [7]. В Керченском проливе, кроме льда местного происхождения, под действием ветра и течений может появляться лед из Азовского моря, а в прикерченском районе Черного моря (иногда и вблизи Феодосии) – лед, приносимый из Керченского пролива [2].

В мелководном Азовском море с меньшей по сравнению с Черным морем соленостью и меньшим теплозапасом лед появляется ежегодно, даже в относительно мягкие зимы [3]. Как следует из рис. 7, ледовитость в Азовском море в период 1980–2020 гг. в среднем уменьшалась (линейный тренд равен $-1.2\%/10$ лет). В 2000-е гг. увеличи-

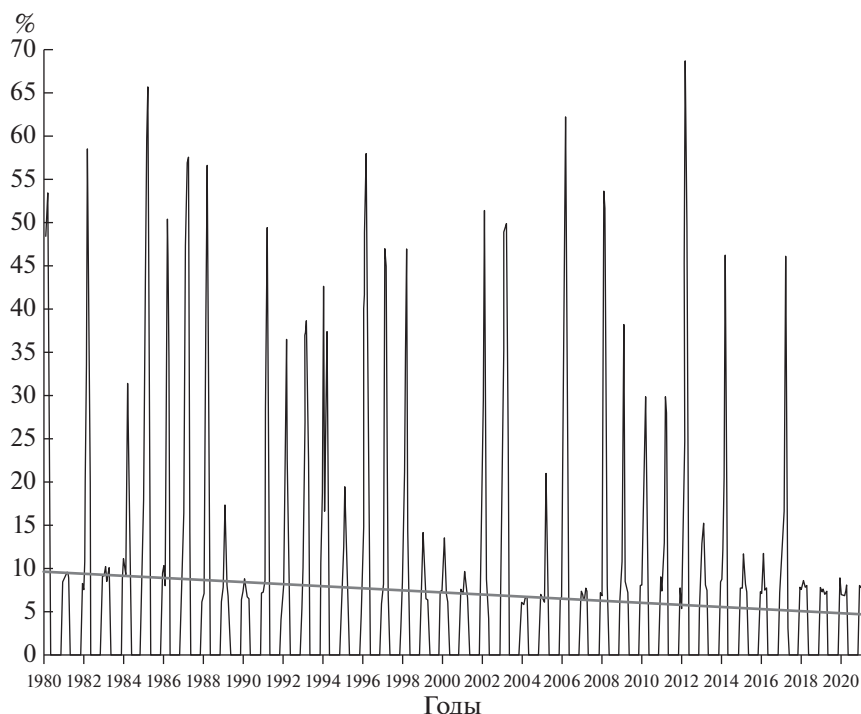


Рис. 7. Изменения среднемесячной концентрации льда в Азовском море (%). Прямая линия — линейный тренд (–1.2% за 10 лет) этих изменений.

лось количество зим с наибольшей среднемесячной ледовитостью менее 10%, что соответствует увеличению количества в эти годы мягких зим (рис. 1, 2). Данный факт подтверждается наблюдениями [3]: в зимы 1980/1981, 1989/1990, 2000/2001, 2006/2007, 2014/2015, 2015/2016 и 2018/2019 гг. лед в Азовском море практически отсутствовал (например, зимой 2018/2019 гг. только начальные виды льда зарегистрированы в основном в Таганрогском заливе). Наибольшая ледовитость наблюдалась в холодные зимы 2002/2003, 2005/2006, 2007/2008 и 2011/2012 гг. (рис. 7).

Характер распределения льда в Керченском проливе на основе спутниковых данных в период с 1999 по 2017 гг. рассмотрен в [17]. Показано, в частности, что в феврале 2012 г., года с наибольшей ледовитостью за 1980–2020 гг. (рис. 7), распространение южной границы ледяного покрова в проливе было наибольшим за все время наблюдений с 2000 г. В теплые зимы 2014/2015 и 2015/2016 гг., при практически отсутствовавших отрицательных значениях температуры воздуха, только незначительный припай зарегистрирован вдоль косы Чушка и в Таманском заливе.

В работе [10] на основе моделирования, наблюдений в портах и спутниковых снимков показано, что средняя за зимний сезон ледовитость Азовского моря в первые 16 лет XXI в. (16%) примерно вдвое меньше, чем в середине XX в. (30%). В период 2005/2006–2015/2016 гг. наибольшая ледовитость наблюдалась в наиболее холодные зи-

мы 2005/2006 и 2011/2012 гг. (примерно 32 и 36% соответственно), наименьшая — в мягкие зимы 2006/2007 и 2015/2016 гг. (менее 5%); толщина льда — примерно 22 см в эти холодные и 4 см в мягкие зимы. В зиму 2002/2003 гг., которая, по оценкам в [23], была в Азовском море даже более суровая, чем зима 2011/2012 гг., ледовитость достигала примерно 45%. Однако ледовитость самых холодных зим первых 16 лет XXI в. заметно меньше максимальной ледовитости зим начала–середины XX в., которая часто превышала 50%, а в самую суровую за весь период наблюдения 1885–2015 гг. зиму 1953/1954 гг. [23] достигала примерно 68% (при сравнимой средней толщине льда). Наибольшие толщины льда (до 50 см) наблюдаются в Таганрогском заливе.

По приведенным в [23] графикам, в период с 1950 до 2015 гг. начало ледового периода в портах Азовского моря в среднем смещалось в сторону более поздних дат, а конец — в сторону более ранних. Так, начало ледостава в Таганроге сместилось в среднем с середины ноября в 1950 г. к середине декабря в 2015 г., конец — с первых чисел апреля к середине марта; в Керчи смещение дат начала и конца ледостава — со второй половины декабря к началу января и с середины марта к середине февраля соответственно. Таким образом, средняя продолжительность ледового периода за эти 66 лет, оцененная нами по приведенным в [23] линейным трендам, заметно сократилась (примерно на 1.5 мес.).

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Выполненный анализ климатических изменений температуры воздуха у поверхности Черноморско-Азовского региона (1980–2020 гг.) и температуры поверхности Черного моря (1982–2020 гг.) с использованием массивов спутниковых данных NASA MERRA-2 [29] и NOAA OI SST v2 high resolution dataset [38] соответственно, а также сопоставление полученного временного хода среднегодовой ТПМ в Черном море с имеющимися данными о ТПМ Азовского моря в разные годы [3, 9] показали, что на протяжении всего рассматриваемого периода наблюдалось потепление этих южных морей. Линейный тренд среднегодовой ТПМ в 1982–2020 гг. в Черном море в целом составил $+0.052^{\circ}\text{C}/\text{год}$, а среднегодовая температура воды, начиная с 2010 г., часто превышала 16°C (максимум – 16.71°C в 2018 г.). Характер межгодовой изменчивости ТПМ Черного и Азовского морей в среднем одинаков. При этом значения среднегодовых ТПМ Азовского моря в разные годы ниже черноморских на $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$.

Следует отметить, что на фоне увеличения ТВП и ТПМ в рассматриваемый период их значения в 2000-е гг. заметно отличаются от таковых в 1980-е–1990-е гг. Увеличились максимальные среднемесячные летние и минимальные зимние значения ТВП (рис. 1) и ТПМ (рис. 2), увеличилось количество мягких зим. Следствием увеличения зимних значений температуры в Черном море явилось лишь эпизодическое обновление вод холодного промежуточного слоя (ХПС) с температурой менее 8°C и, соответственно, уменьшение содержания кислорода в этом слое [27, 37, 39]. С 2005 г. только в 2006, 2012 и 2017 гг. (годы с минимальными зимними ТПМ, рис. 2) имело место заметное обновление вод ХПС [27, 39]. Если в период с 1954 по 2009 гг. температура в ядре ХПС только в 1962 г. слегка превысила 8°C , а минимальные значения в 1954 и 1987 гг. равнялись 6.2°C [14, 30], то в 2000-е гг. обновление вод ХПС имеет перемежающийся характер, его температура часто превышает 8°C , а в 2015–2017 гг. она достигала 8.7°C [39]. Следствием увеличения количества мягких зим явилось и уменьшение концентрации льда в Азовском море (рис. 7), а в некоторые зимы ледяной покров практически полностью отсутствовал. Очевидно, что прогноз в [11] относительно ожидаемой наиболее тяжелой ледовой обстановки в ледовый сезон 2018/2019 гг. в Азовском море не оправдался.

Если тенденция продолжающегося увеличения температуры воздуха/поверхности воды в Черном и Азовском морях согласуется с глобальным потеплением, то тенденции изменения уровней этих внутренних морей в 2000-е гг. не соответствуют увеличивающемуся темпу роста уровня Мирового океана. Примерно с 2004–2010 гг. в

Черном море и с 2004 г. в Азовском их уровни в среднем уменьшаются, при сохранении положительных трендов в период 1993–2020 гг. ($+0.32 \pm 0.16$ см/год в Черном и $+0.21 \pm 0.05$ см/год в Азовском морях). Причина этого понижения уровня (в среднем) в последние 10–15 лет, по-видимому, – в уменьшении приходной части пресноводного баланса (речного стока и атмосферных осадков, хотя возможен и рост испарения, связанный с увеличением температуры воды и воздуха [2]). В [31, 32] отмечалось, что в период 1993–2009 гг. рост уровня Черного моря в 1993–1999 гг. и его спад в 1999–2002 гг. (см. рис. 5 выше) соответствовали увеличению/уменьшению в эти годы стока Дуная, а с 2003 по 2009 гг. подобной корреляции не наблюдалось.

Косвенным показателем уменьшения пресноводных балансов этих морей является увеличение солёности их вод. По данным [2], в Черном море наблюдается повышение солёности со средней скоростью $0.04\text{‰}/10$ лет. Среднегодовая солёность поверхностного слоя в Новороссийске и Туапсе в 2019 г. превысила норму на $1.04\text{--}1.35\text{‰}$. В Азовском море с 2007 г. наблюдается рост солёности, связанный с маловодностью Дона и уменьшением атмосферных осадков (на $33\text{--}194$ мм в разных пунктах относительно среднемноголетней нормы 460 мм) [3]. Солёность в открытых частях и в прибрежной зоне Азовского моря в 2019 г. достигла максимальных значений за весь исторический период наблюдений, что пагубно сказывается на экологической ситуации в море [3].

Вопрос о связи изменений уровней Черного и Средиземного морей еще недостаточно изучен. В работе [42] был продемонстрирован одинаковый характер изменения уровней Черного и Эгейского морей в 1993–2003 гг. – их рост в 1993–1999 гг. и спад в 1999–2003 гг. (см. рис. 5 выше) и высказано предположение, что определяющим в росте уровней этих морей до 1999 г. было увеличение температуры поверхности воды (стерический фактор). Расчет в [41], напротив, показывает, что изменение стерических высот не объясняет наблюдаемых изменений уровня Черного моря. В работе [43] обнаружена высокая (0.75) корреляция между несезонными (с исключенной среднемесячной климатологией) временными последовательностями аномалий уровней Черного и Эгейского морей, с запаздыванием черноморских аномалий относительно аномалий Эгейского моря в 1 мес., что предполагает влияние какого-то общего динамического фактора на уровни обоих морей. Высказано предположение о влиянии крупномасштабной атмосферной циркуляции, связанной с североатлантическим колебанием, на изменения уровней Средиземного и Черного морей посредством ветрового воздействия соответственно вблизи пролива Гибралтар и над Эгейским морем/турецкими проливами. Послед-

нее может изменять градиенты уровня вдоль турецких проливов и, следовательно, оказывать влияние на расходную часть водного баланса Черного моря – вынос черноморских вод через пролив Босфор – и соответственно уровень моря. Факт ветрового воздействия на водообмен в проливе Босфор, вплоть до блокировки верхнебосфорского/нижнебосфорского течений при южных/северных ветрах соответственно, давно и хорошо известен (см., например, [4, 34]), однако статистика частоты и продолжительности таких событий по годам отсутствует, и вклад их в межгодовую изменчивость уровня моря неизвестен.

Источники финансирования. А.И. Гинзбург выполняла работу в рамках Госзадания № 0128-2021-0002 “Механизмы формирования циркуляционных структур Мирового океана: ключевые процессы в пограничных слоях и их роль в динамике океана на основе экспедиционных исследований, дистанционного зондирования, численного и лабораторного моделирования”. Анализ данных по Азовскому морю и Керченскому проливу был выполнен А.Г. Костяным и И.В. Серых в рамках работ по проекту РНФ № 21-17-00191 “Мониторинг водообмена через Керченский пролив на основе современных методов наблюдений и численного моделирования” (2021–2023). С.А. Лебедев анализировал данные спутниковой альтиметрии в рамках бюджетного финансирования ГЦ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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. С. 35–41.
2. Бюллетень гидрометеорологического состояния Черного моря в 2019 году. М.: Росгидромет, ФГБУ “Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова”, 2020. 189 с.
3. Гидрометеорологический бюллетень. Азовское море. 2019 год. Севастополь: Росгидромет, ФГБУ “Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова”, СО ФГБУ “ГОИН”, 2020. 62 с.
4. *Гинзбург А.И.* О нестационарных струйных течениях в юго-западной части Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 1995. № 4. С. 10–16.
5. *Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Шеремет Н.А.* Черное и Азовское моря: сравнительный анализ изменчивости температуры поверхности (1982–2009, спутниковая информация) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 209–218.
6. *Горячкин Ю.Н., Иванов В.А.* Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее. Севастополь: МГИ НАНУ, 2006. 210 с.
7. *Гришин М.Г.* Ледниковые периоды и аномальные зимы на побережье Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2012. № 26-1. С. 134–147.
8. *Дашкевич Л.В.* Анализ многолетней изменчивости температурного режима вод открытой части Азовского моря с использованием геоинформационных технологий и математического моделирования. Автореф. дис ... канд. географ. наук, Мурманск, 2008. 25 с.
9. *Дашкевич Л.В., Кулыгин В.В.* Оценка средней температуры поверхностного слоя Азовского моря на основе данных спутниковой съемки и наблюдений прибрежных гидрометеостанций // В: ИнтерКарто. ИнтерГис. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий. Материалы международной конференции. М.: Издательство Московского университета, 2019. Т. 25. Часть 1. С. 112–120.
10. *Дашкевич Л.В., Немцова Л.Д., Бердников С.В.* Оценка ледовитости Азовского моря в XXI веке по спутниковым снимкам Terra/Aqua MODIS и результатам математического моделирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 91–100.
11. *Думанская И.О.* Метод долгосрочного прогноза ледовых условий на Белом и Азовском морях // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2011. № 345. С. 74–93.
12. *Дьяков Н.Н., Тимошенко Т.Ю., Белогудов А.А. и др.* Атлас льдов Черного и Азовского морей. Севастополь: Экокси-гидрофизика, 2016. 219 с.
13. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Черного моря. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. 212 с.
14. *Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Лебедев С.А., Шеремет Н.А.* Южные моря России // В кн.: Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Федеральная служба по Гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) / Ред. Катцов В.М., Семенов С.М. М.: ФГБУ “ИГКЭ Росгидромета и РАН”, 2014. С. 644–683.
15. *Кубряков А.А., Станичный С.В.* Тренды уровня Черного моря по контактному и альтиметрическим измерениям // Метеорология и гидрология. 2013. № 5. С. 48–55.
16. *Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А. и др.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 471 с.
17. *Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г.* Ледовая обстановка в Керченском проливе в текущем столетии. Ретроспективный анализ на основе спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 148–166.
18. *Лебедев С.А., Костяной А.Г.* Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. М.: Море, 2005. 366 с.

19. Мельников В.А., Зацепин А.Г., Костяной А.Г. Гидрофизический полигон на Черном море // Труды Государственного океанографического института. 2011. Вып. 213. С. 264–278.
20. Мельников В.А., Москаленко Л.В., Кузеванова Н.И. Ветровые циклы и климатические тренды Черного моря // Труды Государственного океанографического института. 2018. № 219. С. 101–123.
21. Рева Ю.А. Межгодовые колебания уровня Черного моря // Океанология. 1997. Т. 37. № 2. С. 211–219.
22. Филиппов Ю.Г. Изменчивость уровня Азовского моря на современном этапе // Труды Государственного океанографического института. 2009. Вып. 212. С. 107–115.
23. Яицкая Н.А., Магаева А.А. Динамика ледового режима Азовского моря в XX–XXI вв. // Лед и Снег. 2018. Т. 58. № 3. С. 373–386.
24. Arpe K., Leroy S.A.G., Lahijani H., Khan V. Impact of the European Russia drought in 2010 on the Caspian Sea level // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2012. V. 16. P. 19–27. <https://doi.org/10.5194/hess-16-19-2012>
25. Avsar N.B., Jin S., Kutoglu S.H. Interannual variations of sea surface temperature in the Black Sea // In: Proceedings of the 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2018). Valencia, Spain, 22–27 July 2018. P. 5617–5620. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518183>
26. Avsar N.B., Kutoglu S.H. Recent sea level change in the Black Sea from satellite altimetry and tide gauge observations // International J. of Geo-Information. 2020. V. 9. P. 185. <https://doi.org/10.3390/ijgi9030185>
27. Capet A., Vandenbulcke L., Gregoire M. Climate change induced a new intermittent regime of convective ventilation that threatens the Black Sea oxygenation status // Preprint. 2020. <https://doi.org/10.5194/bg-2020-76>
28. Eastwood S., Lavergne T., Tonboe R., Hackett B. Product user manual for reprocessed sea ice concentration from EUMETSAT OSI SAF SEAICE_GLO_SEAICE_L4_REP_OBSERVATIONS_011_009 Version 2.4 – Copernicus. 2016. P. 1–45.
29. Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J. et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, Version 2 (MERRA-2) // J. Clim. 2017. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
30. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A. Sea surface temperature variability // In: Kostianoy A.G., Kosarev A.N. (eds.). The Black Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry. V. 5: Water Pollution, Part 5Q. New York, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. P. 255–275.
31. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A., Lebedev S.A. Satellite altimetry applications in the Black Sea // In: Vignudelli S., Kostianoy A.G., Cipollini P., Benveniste J. (eds.), Coastal Altimetry. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. P. 367–387. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12796-0_14
32. Ginzburg A.I., Lebedev S.A., Kostianoy A.G., Sheremet N.A. Interannual variability of the Black Sea level basing on the radar altimetry // Proceedings of “20 Years of Progress in Radar Altimetry”, Venice, 24–29 September, 2012. ESA SP-710 (CD-ROM). Noordwijk, The Netherlands: ESA Publications Division, European Space Agency, 6 p.
33. Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Volkov D.L. Quantifying the impact of basin dynamics on the regional sea level rise in the Black Sea // Ocean Sci. 2017. V. 13. P. 443–452. <https://doi.org/10.5194/os-13-443-2017>
34. Latif M.A., Ozsoy E., Oguz T., Unluata U. Observations of the Mediterranean inflow into the Black Sea // Deep-Sea Res. 1991. V. 38. Suppl. N2A. P. 711–723.
35. Lebedev S.A., Kostianoy A.G., Bedanokov M.K. et al. Climate changes of the temperature of the surface and level of the Black Sea by the data of remote sensing at the coast of the Krasnodar Krai and the Republic of Abkhazia // Ecologica Montenegrina. 2017. V. 14. P. 14–20.
36. Matishov G.G., Dzhenyuk S.L., Moiseev D.V., Zhichkin A.P. Pronounced anomalies of air, water, ice conditions in the Barents and Kara Seas, and the Sea of Azov // Oceanologia. 2014. V. 56(3). P. 445–460. <https://doi.org/10.5697/oc.56-3.445>
37. Miladinova S., Stips A., Garsia-Gorritz E., Macias Moy D. Black Sea thermohaline properties: long-term trends and variations // J. Geophys. Res.: Oceans. 2017. V. 122. <https://doi.org/10.1002/2016JC012644>
38. Reynolds R.W., Smith T.M., Liu C. et al. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature // J. Clim. 2007. V. 20. P. 5473–5496.
39. Stanev E.V., Peneva E., Chtirkova B. Climate change and regional ocean water mass disappearance: case of the Black Sea // J. Geophys. Res.: Oceans. 2019. V. 124. <https://doi.org/10.1029/2019JC015076>
40. The ocean and cryosphere. 2020. In: A Changing Climate Summary for Teachers Based on the IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC). https://www.oce.global/sites/default/files/2020-04/OCE-RAP_SROCC-EN-10-WEB.pdf.
41. Tsimplis M.N., Josey S.A., Rixen M., Stanev E.V. On the forcing of sea level in the Black Sea // J. Geophys. Res.: Oceans. 2004. V. 109. C08015. <https://doi.org/10.1029/2003JC002185>
42. Vigo I., Garda D., Chao B.F. Change of sea level trend in the Mediterranean and Black Seas // J. Marine Res. 2005. V. 63. P. 1085–1100.
43. Volkov D.L., Landerer F.W. Internal and external forcing of sea level variability in the Black Sea // Clim. Dyn. 2015. V. 45. P. 2633–2646. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2498-0>
44. Zatsepin A.G., Ginzburg A.I., Kostianoy A.G. et al. Observations of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № C8. P. 2-1–2-27. <https://doi.org/10.1029/2002JC001390>

Climatic Changes in Hydrometeorological Parameters of the Black and Azov Seas (1980–2020)

A. I. Ginzburg^{a, #}, A. G. Kostianoy^{a, b, c}, I. V. Serykh^{a, b}, S. A. Lebedev^b

^a*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^c*Witte Moscow University, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: Ginzburg@ocean.ru*

To study the nature of the climatic changes in the hydrometeorological parameters of the Black and Azov Seas – near-surface air temperature (SAT), sea surface temperature (SST), ice cover and sea level – under conditions of ongoing global warming, we used data from reanalyses and data of remote sensing of the Earth, as well as information from known publications of recent years. It was found that against the background of an increase in SAT over the Black-Azov Sea region ($+0.053\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{year}$ in 1980–2020) and SST of the Black Sea ($+0.052\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{year}$ in 1982–2020), the values of these parameters in the 2000s noticeably differ from those in the 1980s–1990s: the maximum average monthly summer and minimum average monthly winter temperatures have increased, and the number of mild winters has increased. The average annual SST of the Black Sea, which practically did not exceed $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the 1980s–early 1990s, has exceeded $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ in most cases since 2010 (maximum – $16.71\text{ }^{\circ}\text{C}$ in 2018). In the second decade of the 2000s, the average monthly winter minimums, with the exception of the winters of 2011/2012 and 2016/2017, did not fall below $8\text{ }^{\circ}\text{C}$. A consequence of the increase in winter temperatures was a decrease in the ice concentration in the Sea of Azov (the trend of the mean monthly concentration is $-1.2\%/10$ years). From about 2004–2010 in the Black Sea and since 2004 in the Sea of Azov, the tendency to increase their levels (on average) has been replaced by a slight decrease, so that the average positive trends for the period 1993–2020 ($+0.32 \pm 0.16\text{ cm}/\text{year}$ in the Black Sea and $+0.21 \pm 0.05\text{ cm}/\text{year}$ in the Sea of Azov) turned out to be approximately 2.5 times less than in 1993–2012. The reason for this decrease in levels (on average) in the last 10–15 years was, apparently, a decrease in the incoming part of the freshwater balance of both seas, which is indirectly confirmed by the observed increase in the salinity of their waters.

Keywords: Black Sea, Sea of Azov, regional climatic changes, near-surface air temperature, sea surface temperature, ice cover, sea level