Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980–2020)

А.И. Гинзбург^{1,2}, А.Г. Костяной ^{1,3,4}, И.В. Серых^{1,3}, С.А. Лебедев^{3,5,6}

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия E-mails: ginzburg@ocean.ru, kostianoy@gmail.com, iserykh@gmail.com

² Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

³ Геофизический центр РАН, Москва, 119296, Россия E-mail: sergey_a_lebedev@mail.ru

⁴ Московский университет имени С. Ю. Витте, Москва, 115432, Россия ⁵ Майкопский государственный технологический университет Майкоп, 385000, Россия

⁶ Национальный исследовательский университет «МИЭТ» Зеленоград, Москва, 124498, Россия

Данные реанализов и дистанционного зондирования Земли, а также сведения из известных публикаций последних лет использованы для исследования межгодовых изменений и оценивания линейных трендов гидрометеорологических параметров Каспийского моря (без зал. Кара-Богаз-Гол): температуры воздуха вблизи поверхности (ТВП), температуры поверхности моря (ТПМ), ледовитости и уровня моря — в период с 1980–1982 по 2020 г. В 2000-е гг. по сравнению с 1980-1990-ми гг. выросли максимальные летние и минимальные зимние среднемесячные значения ТВП и ТПМ, увеличилось количество мягких зим. Тренд ТВП Каспийского региона в период 1980-2020 гг. составил +0,030 °С/год, тренды среднегодовой ТПМ в 1982–2020 гг. в Северном, Среднем, Южном Каспии и в море в целом — +0,026; +0,042; +0,034 и +0,035 °С/год соответственно. Наибольшее потепление вод имело место в западной части Среднего Каспия, наименьшее — на северо-востоке Северного Каспия и вдоль шельфовой зоны Туркменистана. Уменьшение трендов ТВП и ТПМ в 1980/1982-2020 гг. по сравнению с предшествующим периодом (с 1980-1982 гг. примерно до 2010 г.) и отсутствие роста среднегодовых значений ТПМ после 2010 г. свидетельствуют о замедлении потепления Каспийского моря во вторую декаду 2000-х гг. Тренды среднемесячной и средней за холодное полугодие (ноябрь – апрель) концентрации льда в Северном Каспии в 1980—2020 гг. оказались отрицательными (-0.8 %/10 лет и -1.24 %/10 лет соответственно). Уровень моря после 2005 г., за исключением краткой стабилизации в 2015-2017 гг., продолжает падать. Средняя скорость падения уровня в 28-летний период 1993-2020 гг. составила -5,37±1,24 см/год. К концу 2020 г. он достиг отметки -28,5 м в Балтийской системе высот, и от минимума 1977 г. его отделяет только 0,5 м.

Ключевые слова: Каспийское море, уровень моря, температура воздуха, температура поверхности моря, ледовитость, межгодовая изменчивость, глобальное потепление

> Одобрена к печати: 15.09.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291

Введение

Каспийское море — самый крупный в мире замкнутый водоём, расположенный на границе Восточной Европы и Азии и простирающийся с севера на юг более чем на 1030 км при ширине в пределах примерно от 200 до 400 км (Водный..., 2016; Kosarev, 2005). С учётом различий физико-географических условий, характера донной топографии и заметной зависимости температуры поверхности моря от широты море обычно подразделяют на Северный, Средний и Южный Каспий с границами между Северным и Средним Каспием — по линии о. Чечень – м. Тюб-Караган, между Средним и Южным Каспием — по линии о. Жилой – м. Куули (Гидрометеорология..., 1992; Косарев, 1975). Площадь моря в целом (без зал. Кара-Богаз-Гол), меняющаяся в зависимости от его уровня, при уровне примерно –28 м БС (Балтийская система высот), наблюдавшемся в 2015–2017 гг. (Гинзбург, Костяной, 2018; Lebedev, 2018), была равна 376 300 км². При этом площади Северного (глубина менее 20 м), Среднего и Южного Каспия (максимальные глубины — 788 и 1025 м соответственно) составили 90 100, 137 700 и 148 500 км² (Водный..., 2016).

Изолированность от океана или открытых морей и изменение регионального климата (рост температуры воздуха и воды, уменьшение атмосферных осадков и стока рек) определяют практически непрерывное падение уровня Каспийского моря начиная с 2005 г. (см., например, работы (Гинзбург, Костяной, 2018; Костяной и др., 2014; Chen et al., 2017)) на фоне подъёма уровня Мирового океана в условиях глобального потепления (Guilyardi et al., 2020). Заметно меняются и связанные с потеплением моря ледовые условия в Северном Каспии. Однако гидрометеорологические параметры Каспийского моря характеризуются существенной межгодовой изменчивостью, которая определяется глобальными и региональными изменениями климата, и существующие климатические модели не дают надёжных прогнозов его состояния даже на ближайшие десятилетия. Важное народнохозяйственное и военно-стратегическое значение Каспия, в частности задачи экологии, туризма, рыболовства, инфраструктуры на его берегах и судоходства, делают с учётом этой изменчивости чрезвычайно важным непрерывный мониторинг таких гидрометеорологических параметров этого моря, как температура воды и воздуха, ледовитость (площадь, покрытая льдом любой сплочённости, в процентах от общей площади моря), уровень моря, и определяющих их факторов.

Обобщение известных результатов исследований, в основном до 2012 г., посвящённых долговременной изменчивости этих гидрометеорологических параметров и основанных на доступных натурных данных и спутниковых измерениях, содержится в работе (Костяной и др., 2014). В настоящей статье рассматривается межгодовая изменчивость и тренды температуры воздуха вблизи поверхности (ТВП), температуры поверхности моря (ТПМ), ледяного покрова в период с 1980–1982 по 2020 г., а также уровня Каспийского моря с 1993 по 2020 г. на основе свободно доступных баз данных. Полученные тренды гидрометеорологических параметров сравниваются с оценёнными ранее за период с 1982 по 2009–2012 гг. (Костяной и др., 2014) 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 Каспийского моря за период 1980–2020 гг. получены из базы данных NASA (*англ.* NASA — National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства) MERRA-2 (*англ.* Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications) на сетке $0,5^{\circ}$ широты на $0,625^{\circ}$ долготы (Gelaro et al., 2017) и осреднены по пространству в пределах $36-48^{\circ}$ с.ш., $46-55^{\circ}$ в.д. Среднемесячные данные TПM за период 1982–2020 гг. получены осреднением среднесуточных данных исходного массива NOAA OI SST v2 high resolution dataset на сетке $0,25\times0,25^{\circ}$ (Reynolds et al., 2007). Затем эти среднемесячные данные осреднены по акваториям Каспийского моря в целом (без зал. Кара-Богаз-Гол) и отдельно в пределах Северного, Среднего и Южного Каспия. Для удобства расчёта характеристик TПМ в качестве границы между Северным и Средним Каспием вместо общепринятой (см. выше) использовалась широта $44^{\circ}30'$ с.ш., как в работе (Гинзбург и др., 2004). Граница между Средним и Южным Каспием соответствовала общепринятой ($40^{\circ}15'$ с.ш.).

По среднемесячным данным ТВП над Каспийским регионом и ТПМ 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 температуры. Заметим, что значения линейного тренда, вычисленного по аномалиям параметра, ниже значений, рассчитанных по самим его значениям (разница может составлять сотые доли градусов Цельсия в 10 лет).

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

Среднемесячные значения концентрации льда 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. (Copernicus..., 2021). Среднемесячные данные осреднялись затем по акватории Северного Каспия.

Для анализа межгодовой изменчивости уровня Каспийского моря (январь 1993 г. – декабрь 2020 г.) использовался временной ход аномалий уровня моря, рассчитанных по данным вдольтрековых альтиметрических измерений спутников TOPEX/Poseidon (*анел.* Topography Experiment/Poseidon) (T/P) и Jason-1/2/3 (J1/2/3). Обработка данных спутниковых альтиметров проводилась с использованием программного обеспечения Интегрированной базы данных спутниковой альтиметрии, разработанного в Геофизическом центре РАН (см. работы (Лаврова и др., 2011; Лебедев, Костяной, 2005; Lebedev, 2018)).

Межгодовые изменения и тренды гидрометеорологических параметров

Температура воздуха

Сезонная и межгодовая изменчивость среднемесячной ТВП в Каспийском регионе за 41-летний период (с января 1980 г. по декабрь 2020 г.) показана на *рис. 1* (см. с. 280). Видно, что с конца 1990-х гг. изменился характер максимальных летних и минимальных зимних среднемесячных значений температуры. Максимальные летние ТВП стали в среднем выше, нередко превышая 29 °C, с экстремумом выше 30 °C в 2018 г., а минимальные зимние часто превышали 2 °C. Однако в 2000-е гг. наблюдались и очень низкие среднемесячные значения ТВП (ниже -2 °C в зимы 2007/2008 и 2011/2012 гг.), чего не отмечалось в 1980-е и 1990-е гг. Особенно суровой была зима 2011/2012 г., когда аномально холодная погода наблюдалась в январе и феврале в Центральной и Южной Европе (Matishov et al., 2014).

Критерием суровости зим принято считать сумму градусо-дней мороза (отрицательных значений температуры S) на гидрометеостанциях (ГМС) в районе Северного Каспия (Ивкина и др., 2017; Lavrova et al., 2019). В соответствии с работой (Ивкина и др., 2017), в период 1980-2016 гг. было две очень суровых зимы (S менее -900 °C) - 1993/1994 и 2011/2012 гг., восемь суровых (S от -900 до -700 °C) — 1979/1980 гг., 1981/1982, 1984/1985, 1987/1988, 1995/1996, 1997/1998, 2002/2003, 2007/2008 гг., девять мягких (S от -400 до -100 °C) - 1980/1981 гг., 1982/1983, 1988/1989, 1999/2000, 2000/2001, 2001/2002, 2003/2004, 2006/2007 и 2015/2016 гг., остальные — умеренные (S от -700 до -400 °C). Заметим, что из-за различий в атмосферных условиях в западной и восточной частях Северного Каспия суммы отрицательных значений температуры в разных пунктах этой части моря различаются, поэтому классификации некоторых зим по их суровости в работах (Ивкина и др., 2017) и (Lavrova et al., 2019), основанные на измерениях на ГМС «Пешной» в восточной части Северного Каспия (против дельты р. Урал) и на ГМС в Астрахани соответственно, также несколько различаются. В исследовании (Lavrova et al., 2019) зимы 1998/1999 и 2004/2005 гг. относят к мягким, зима 2002/2003 гг. — к умеренной, 2005/2006 гг. — к суровой. Это, впрочем, не меняет вывода о тенденции изменения суровости зим в период 1980-2020 гг. по сравнению с предыдущим 1961–1979 гг., когда наблюдалось четыре очень суровых зимы (1966/1967, 1968/1969, 1971/1972, 1976/1977), четыре суровых (1963/1964, 1970/1971, 1973/1974, 1975/1976) и только одна мягкая (1965/1966) (Ивкина и др., 2017). Очевидно, что в 1980–2000-е гг., по сравнению с периодом с 1962 г. до конца 1970-х гг., повторяемость очень суровых и суровых зим уменьшилась, а мягких и умеренных зим — увеличилась (Ивкина и др., 2017).



Рис. 1. Сезонная и межгодовая изменчивость среднемесячных значений температуры воздуха у поверхности (°С) в Каспийском регионе (36–48° с.ш., 46–55° в.д.) в 1980–2020 гг. Чёрная линия — аномалии температуры, сглаженные однолетним фильтром Баттерворта нижних частот, фиолетовая — линейный тренд этих аномалий. Красными кружками отмечены средние значения аномалий для летнего (июнь – август) сезона, синими — для зимнего (декабрь – февраль)

Согласно *рис. 1* и оценкам в работе (Lavrova et al., 2019), зиму 2016/2017 гг. можно отнести к суровым, зимы 2017/2018 и 2018/2019 гг. — к умеренным. Зима 2019/2020 гг. была, очевидно, мягкой (см. *рис. 1*).

Наблюдается и некоторое различие в характере зим в пределах рассматриваемого 41-летнего периода 1980—2020 гг. За 20 лет с 1979/1980 по 1998/1999 гг. имели место, по данным (Ивкина и др., 2017), одна очень суровая зима (1993/1994), шесть суровых, десять умеренных и три мягкие (см. выше); в 2000-х гг. с 1999/2000 по 2019/2020 гг., по тем же данным с учётом четырёх последних лет, была одна очень суровая зима (2011/2012), три суровых, десять умеренных и семь мягких. То есть в 2000-х гг. по сравнению с предшествовавшим двадцатилетием число суровых зим уменьшилось, а мягких — возросло. Следует отметить, однако, что пять из семи мягких зим имели место в первую декаду 2000-х гг. (с 2000 по 2007 г.), а суммы градусо-дней мороза в умеренные зимы в 2000-е гг. в основном были большими, чем в 1990-е гг.

Линейный положительный тренд ТВП (см. *puc. 1*) за рассматриваемый 41-летний период составил +0,030 °C/год. Соответственно, температура воздуха за этот период возросла на 1,2 °С. Данный линейный тренда ТВП ниже, чем полученное ранее значение +0,067 °С/год для периода 1979-2011 гг. (Костяной и др., 2014). Меньшее значение тренда в период 1980-2020 гг. свидетельствует о замедлении (или отсутствии) роста ТВП Каспийского региона во вторую декаду 2000-х гг. (см. также работы (Казьмин, 2019; Caspian..., 2020; Kazmin, 2021)), хотя отчасти оно может быть связано с использованием в настоящей работе метода расчёта тренда температуры по её аномалиям (см. выше). Полиномиальная аппроксимация среднемесячных данных реанализа NCEP/NCAR (англ. National Centers for Environmental Prediction, Национальный центр экологических прогнозов; National Center for Atmospheric Research, Национальный центр исследований атмосферы) в период 1948-2017 гг. (Казьмин, 2019; Kazmin, 2021) показала, что среднегодовые значения ТВП над Каспием при существенной межгодовой изменчивости уменьшались в среднем в 1948–1968 гг., возрастали в 1968-2002 гг. и снова уменьшались до 2017 г. Максимальные среднегодовые значения ТВП наблюдались в этот период в 1996 и 2010 гг. (~15 и 14,5 °C соответственно), минимальная ТВП в 2000-х гг. — в 2017 г. (12,2 °С). Диапазон изменения среднегодовых значений ТВП над Каспийским морем в период 1982–2017 гг. составил, таким образом, 2,8 °С (Казьмин, 2019; Kazmin, 2021).



Рис. 2. Распределение линейных трендов (°С/10 лет) температуры воздуха у поверхности в Каспийском регионе в период 1980–2020 гг. (*a*) и температуры поверхности Каспийского моря по акватории в 1982–2020 гг. (*б*)

Распределение трендов ТВП над Каспийским морем показано на *рис. 2a*. Наибольшие значения тренда (+0,040–0,045 °С/год) — над западной частью Среднего Каспия, наименьшие (меньше +0,010 °С/год) — над северо-восточной частью Северного Каспия.

Температура поверхности моря

Представление о характере изменения среднемесячных значений ТПМ в Каспийском море в 39-летний период 1982–2020 гг. даёт *puc. 3*. Как и во временной серии ТВП (см. *puc. 1*), с конца 1990-х гг. наблюдается увеличение в среднем максимальных летних значений ТПМ. Максимум ТПМ имел место в 2010 г. (28,31 °C), когда над Каспийским морем распространялся воздух из Средней Азии (Костяной и др., 2014; Агре et al., 2012), после которого заметна тенденция к понижению ТПМ. Наиболее низкие зимние значения ТПМ наблюдались в суровую и очень суровую зимы 2007/2008 и 2011/2012 гг. соответственно (см. *puc. 3*).



Рис. 3. Сезонная и межгодовая изменчивость среднемесячных значений температуры поверхности Каспийского моря (°С) (без зал. Кара-Богаз-Гол) в 1982–2020 гг. Чёрная линия — аномалии температуры, сглаженные однолетним фильтром Баттерворта нижних частот, фиолетовая — линейный тренд этих аномалий. Красными кружками отмечены средние значения аномалий для летнего (июль-сентябрь) гидрологического сезона, звёздочками — для зимнего (январь-март)

Линейный тренд среднемесячных значений ТПМ в этот период составил +0,035 °С/год. Распределение линейных трендов ТПМ по акватории Каспийского моря показывает (*рис. 26*), что наибольшее потепление вод имело место в западной части Среднего Каспия, наименьшее — на северо-востоке Северного Каспия и вдоль шельфовой зоны Туркменистана в пределах 50-метровой изобаты.

Характер межгодового изменения среднегодовых значений ТПМ трёх районов Каспия в основных чертах одинаков (*рис. 4*). Тренды среднегодовых ТПМ в Северном, Среднем, Южном Каспии и в море в целом составили +0,026; +0,042; +0,034 и +0,035 °C/год соответственно. Эти тренды для Среднего и Южного Каспия меньше, чем полученные ранее на основе разных баз данных значения: соответственно +0,06 и +0,05 °C/год для периода 1982–2009 гг. (Гинзбург и др., 2012; Костяной и др., 2014), +0,05 и +0,04 °C/год для периода 1982–2015 гг. (Kostianoy et al., 2019). Максимальное значение тренда ТПМ на *рис. 4* — в Среднем Каспии, что хорошо согласуется с пространственным распределением трендов на *рис. 26*. Диапазоны изменения среднегодовых значений ТПМ в Северном, Среднем, Южном Каспии и море в целом, с минимумами в 1987 и максимумами в 2010 гг., составили соответственно 2,5; 2,7; 2,2 и 2,5 °C. Для сравнения: диапазон изменения среднегодовых значений ТПМ Каспийского моря (осреднение в пределах только глубоководной части моря) в период 1982–2017 гг. в работах (Казьмин, 2019; Кагтin, 2021) составил примерно 2 °C с минимальным значение 15 °C в 1987 г. и максимальным около 17 °C в 2010 г.



Рис. 4. Среднегодовые значения температуры поверхности Северного Каспия (синий цвет), Среднего Каспия (зелёный), Южного Каспия (красный) и Каспийского моря в целом (без залива Кара-Богаз-Гол) (чёрный) в 1982–2020 гг. Прямые линии — соответствующие линейные тренды

Следует отметить, что характер межгодовых изменений среднегодовых значений ТПМ (см. *рис. 4*), уменьшение трендов ТПМ и ТПВ (см. выше) в промежуток с 1980–1982 гг. по 2020 г. по сравнению с предшествующим периодом (примерно с начала 1980-х гг. до 2010 г.) и слегка отрицательный линейный тренд ТПМ (и ТВП) в Северном Каспии в период с июля 2002 по июль 2019 г. (Lavrova et al., 2019) подтверждают вывод о замедлении потепления Каспийского моря во вторую декаду 2000-х гг.

Уровень моря

Межгодовые изменения уровня Каспийского моря по данным инструментальных измерений (с 1837 г.) и спутниковых альтиметров (с 1993 г.) в разные временные периоды рассматривались во многих работах (см., например, публикации (Гинзбург, Костяной, 2018; Костяной и др., 2014; Лаврова и др., 2011; Лебедев, Костяной, 2016; Chen et al., 2017; Kostianoy et al., 2019)). Представление об изменении уровня Каспия по данным альтиметрических измерений с 1993 по 2020 г. даёт *рис. 5*.



Рис. 5. Сезонная (сплошная линия) и межгодовая (пунктир) изменчивость уровня Каспийского моря (см) с января 1993 г. по декабрь 2020 г. по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J1/2/3

За исключением двух периодов подъёма уровня — с зимы 1992/1993 гг. до лета 1995 г. со скоростью +19,93±2,14 см/год до отметки -26,4 м БС и с зимы 2001/2002 гг. до лета 2005 г. со скоростью +9,92 см/год до отметки -26,7 м БС — и его относительной стабилизации в 2015-2017 гг. (слабый отрицательный тренд -0.37 ± 0.12 см/год), уровень Каспия падал (см. *рис. 5*). Падение уровня после лета 2005 г. не было монотонным: резкое уменьшение уровня имело место в конце 2010-начале 2011 гг. в связи с засухой в европейской части России, включая бассейн р. Волги, в конце июня – августе 2010 г. (Агре et al., 2012), в конце 2014 г. и в конце 2018 г. Средняя скорость падения уровня в 28-летний период 1993-2020 гг. составила -5,37±1,24 см/год. К концу 2020 г. уровень достиг отметки -28,5 м БС. Таким образом, с максимального значения в рассматриваемый период в 1995 г. (-26,6 м БС) до минимального в 2020 г. (-28,5 м БС) уровень упал на 1,9 м, и от минимума 1977 г. (-29 м БС) его отделяет всего лишь 0,5 м. Сравнительный анализ характера изменения уровня Каспия и стока Волги в период 1992–2016 гг. показал, что подъём уровня в 1993–1995 гг. и его спад до 1997 г. соответствовали изменениям стока Волги (Гинзбург, Костяной, 2018). В дальнейшем определяющим фактором падения уровня моря при падении в среднем речного стока выступало увеличившееся испарение с поверхности моря (Гинзбург, Костяной, 2018; Серых, Костяной, 2020; Chen et al., 2017).

Ледовитость

Изменения среднемесячной и средней за холодное полугодие (ноябрь – апрель) ледовитости в Северном Каспии в 41-летний период (1980–2020) показаны на *рис. 6* (см. с. 285). Тренды ледовитости в этот период для среднемесячных и средних за холодное полугодие значений концентрации льда были отрицательны и равны соответственно –0,8 и –1,24 %/10 лет. Максимальные среднемесячные величины концентрации льда наблюдались в суровую (1981/1982) и очень суровую (2011/2012) зимы, минимальные — в мягкие зимы 2006/2007 и 2019/2020 гг. (см. *рис. 1*). Максимумы средних значений за холодное полугодие концентрации льда с последовательным убыванием во времени соответствовали суровым (1984/1985, 2002/2003) и очень суровым (1993/1994, 2011/2012) зимам, минимумы с близкими значениями — мягким зимам 1999/2000, 2006/2007, 2015/2016 и 2019/2020 гг.



Рис. 6. Изменения среднемесячной (зелёный цвет) и средней за холодное полугодие (ноябрь – апрель) (синий цвет) (%) концентрации льда в северной части Каспийского моря в 1980–2020 гг. и линейные тренды этих изменений (фиолетовый и красный цвета соответственно)

По оценкам, приведённым в работе (Ивкина и др., 2017), толщина льда при существенной межгодовой изменчивости с 1981/1982 до 2015/2016 гг. в среднем уменьшалась. При этом максимальные значения толщины льда зарегистрированы в зимы 2007/2008, 1984/1985 и 2011/2012 гг. (примерно 60, 55 и 50 см соответственно), минимальные — в зимы 1999/2000, 2006/2007, 2013/2014 и 2015/2016 гг. (примерно 10, 15, 17 и 17 см соответственно). Таким образом, однозначного соответствия толщины льда и суровости зимы не обнаруживается. Отсутствие чёткой корреляции между продолжительностью ледового периода и суровостью зимы, что обуславливается чередованием периодов образования льда и его таяния при резких изменениях температуры воздуха, продемонстрировано в работе (Lavrova et al., 2019): такая корреляция наблюдалась только в мягкую зиму 2015/2016 гг., умеренную (суровую по классификации Н. Ивкиной с коллегами (2017), см. выше) зиму 2002/2003 гг. и очень суровую зиму 2011/2012 гг. Наименьшая за 21-летний промежуток (1998–2019) продолжительность ледового периода (86 дней) отмечена в зиму 2015/2016 гг., наибольшая (147 дней) — в зиму 2011/2012 гг., средняя величина за этот период — 115 дней (Lavrova et al., 2019). Оценки продолжительности ледового периода для зим 2011/2012 и 2015/2016 гг. в работе (Ивкина и др., 2017) дали соответственно 156 и 98 дней. В очень суровую зиму 2011/2012 гг. льдом покрылся не только весь Северный Каспий. Образование льда наблюдалось также вдоль западного побережья Южного Каспия до Апшеронского п-ова и в мелководных заливах у восточного побережья Южного Каспия (заливы Туркменбаши и Южный Челекен) (Lavrova et al., 2019).

Заключение

Выполненный анализ межгодовой изменчивости температуры воздуха над Каспийским регионом (1980–2020) и температуры поверхности Каспия в целом (без зал. Кара-Богаз-Гол) и трёх его регионов (1982–2020) свидетельствует о потеплении (в среднем) Каспийского моря в рассматриваемые периоды. Линейные тренды среднегодовой ТПМ в Северном, Среднем, Южном Каспии и в море в целом составили +0,026; +0,042; +0,034 и +0,035 °C/год соответственно. Однако значительно меньшие значения трендов ТПВ и ТПМ по сравнению с трендами для периодов, не захватывающих последние годы (Гинзбург и др., 2012; Костяной и др., 2014), и характер изменения среднегодовых ТПМ (их уменьшение после максимума 2010 г., см. *рис. 4*) позволяют сделать вывод о замедлении потепления Каспийского моря во вторую декаду 2000-х гг., подтверждающий сведения в работах (Казьмин, 2019; Серых, Костяной, 2020; Caspian..., 2020; Каzmin, 2021). Заметим, что подобной ситуации не наблюдалось в близко расположенном Чёрном море, где линейные тренды ТВП в период 1980–2020 гг. и ТПМ в 1982–2020 гг. составили +0,053 и +0,052 °С/год соответственно, а максимум среднегодовой температуры поверхности моря соответствовал 2018 г. (Гинзбург и др., 2021).

В 2000-е гг. по сравнению с 1980–1990-ми гг. увеличились максимальные среднемесячные летние и минимальные среднемесячные зимние значения ТВП (см. *puc. 1*) и ТПМ (см. *puc. 3*) Каспия, увеличилось количество мягких зим. Очевидно (см. *puc. 1*), что прогноз зим холоднее нормы в 2008/2009, 2012/2013, 2013/2014 и 2015/2016 гг. в Северном Каспии в работе (Бухарицин, Андреев, 2006) не оправдался. Следствием увеличения количества мягких зим стали отрицательные тренды (-0,8 и -1,24 %/10 лет) среднемесячной и средней за холодное полугодие концентрации льда в этой части Каспия соответственно (см. *puc. 6*). Интересен в этой связи прогноз относительно мягкости зим и ледовитости в Каспийском море в последующие 15–30 лет, сделанный в работе (Лобанов, Наурозбаева, 2021) на основе моделей климата и экстраполяции трендов натурных данных. Согласно этому прогнозу, уже к 2035 г. лёд будет практически отсутствовать в районе границы Северного и Среднего Каспия (Форт-Шевченко, Кулалы), а к 2055 г. он практически исчезнет уже во всех пунктах, кроме северо-востока (Пешной и Атырау). Зимы к концу XXI в. станут в основном мягкими и очень мягкими, а устойчивый ледяной покров сохранится лишь в северо-восточной части моря.

Уровень изолированного Каспийского моря после относительной стабилизации в 2015–2017 гг. продолжает падать, причём в 2018–2020 гг. скорость его падения (-10,27 см/год) была максимальной за всё время с лета 2005 г. (см. *рис. 5*). Средняя скорость падения уровня в 28-летний период 1993–2020 гг. составила -5,37±1,24 см/год. К концу 2020 г. уровень достиг отметки -28,5 м БС, и от минимума 1977 г. (-29 м БС) его отделяет всего лишь 0,5 м. Долгосрочные прогнозы В. Н. Малинина (2009) и в публикации (Водный..., 2016) относительно достижения уровнем Каспийского моря к 2020 г. отметок -26,6 и -27,6...-27,7 м БС соответственно, таким образом, не оправдались.

В соответствии с разными климатическими моделями (см. работы (Панин и др., 2015; Nandini-Weiss et al., 2020 и др.)), в XXI в. можно ожидать как снижения уровня Каспия, так и его повышения или стабилизации. По предположению Г.Н. Панина с коллегами (2015), наблюдающееся сейчас понижение уровня Каспийского моря продолжится в ближайшие 10–15 лет. Наибольшие по сравнению с другими моделями понижения уровня Каспия с 2020 г. до конца столетия дают результаты моделирования в недавней работе (Nandini-Weiss et al., 2020): 9 и 18 м или 8 и 16 м (в зависимости от корректного учёта испарения с поверхности) для сценариев антропогенного выброса углекислого газа в атмосферу RCP4.5 и RCP8.5 IPCC (*анел.* Intergovernmental Panel on Climate Change) соответственно. При падении уровня на 9 или 18 м поверхность Каспия уменьшится на 23 или 34 % (Prange et al., 2020).

Как поведут себя температура воздуха/воды, уровень моря и ледяной покров в Каспийском море в последующие годы в условиях продолжающегося глобального потепления, покажут дальнейшие наблюдения.

Гинзбург А. И. и Костяной А. Г. занимались анализом гидрометеорологических данных в рамках программы государственного задания № 0128-2021-0002. Анализ суровости зим и ледовитости Северного Каспия был выполнен А. И. Гинзбург в рамках гранта Российского научного фонда № 19-77-20060. Серых И. В. выполнял работу при финансовой поддержке государственного задания в рамках научно-исследовательской работы (НИР) по теме № 0128-2021-0003. Лебедев С. А. анализировал данные спутниковой альтиметрии в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утверждённого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (тема НИР № АААА-А19-119032090068-1/1021032428954-7).

Исследование проводилось в рамках программы "The Caspian Sea Digital Twin", выполняемой в рамках мероприятий Межправительственной океанографической комиссии ЮНЕСКО, связанных с Десятилетием наук об океане в интересах устойчивого развития (2021–2030) ООН.

Литература

- 1. *Бухарицин П. И., Андреев А. Н.* Ритмы солнечной активности и ожидаемые экстремальные климатические события в Северо-Каспийском регионе на период 2007–2017 гг. // Экстремальные гидрологические события в Арало-Каспийском регионе: тр. Международной конф. 19–20 окт. 2006, Москва. 2006. С. 137–143.
- 2. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз: учебно-метод. пособие / под ред. Е. С. Нестерова. М.: Триада лтд, 2016. 378 с.
- 3. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 6. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / отв. ред. Терзиев Ф. С. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 358 с.
- 4. Гинзбург А. И., Костяной А. Г. Тенденции изменений гидрометеорологических параметров Каспийского моря в современный период (1990-е-2017 гг.) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 195–207. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-195-207.
- 5. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А.* Сезонная и межгодовая изменчивость температуры поверхности Каспийского моря // Океанология. 2004. Т. 44. № 5. С. 645–659.
- 6. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н.А.* Долговременная изменчивость температуры поверхности Каспийского моря (1982–2009 гг.) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 262–269.
- 7. Гинзбург А. 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. С. 1–13. DOI: 10.31857/S003015742106006X (в печати).
- 8. *Ивкина Н., Наурозбаева Ж., Клове Б.* Влияние изменения климатических условий на ледовый режим Каспийского моря // Центральноазиатский журн. исслед. воды. 2017. Т. 3. № 2. С. 15–29.
- 9. *Казьмин А. С.* Долгопериодная изменчивость гидрометеорологических параметров в акватории Каспийского моря. Часть 1: описание данных // Океанол. исслед. 2019. Т. 47. № 5. С. 65–73. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(5).5.
- 10. Косарев А. Н. Гидрология Каспийского и Аральского морей. М.: Изд-во МГУ, 1975. 272 с.

- 11. Костяной А. Г., Гинзбург А. И.. Лебедев С. А., Шеремет Н. А. Южные моря России // Второй оценочный доклад Росгидромета об изменения климата и их последствиях на территории Российской Федерации / ред. В. М. Катцов, С. М. Семенов. М.: ИГКЭ Росгидромета и РАН, 2014. С. 644–683.
- 12. Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Митягина М. И., Гинзбург А. И., Шеремет Н. А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 471 с.
- 13. Лебедев С.А., Костяной А.Г. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. М.: Изд. центр «Море» Международ. ин-та океана, 2005. 366 с.
- 14. Лебедев С.А., Костяной А.Г. Изменения уровня и динамики вод по данным спутниковой альтиметрии // Система Каспийского моря / отв. ред. А.П. Лисицын. М.: Науч. мир, 2016. С. 13–41.
- 15. Лобанов В.А., Наурозбаева Ж.К. О возможных изменениях толщины морского льда в Каспийском море в текущем столетии // Гидрометеорология и экология. 2021. № 62. С. 75–95. DOI: 10.33933/2074-2762-2021-62-75-95.
- 16. *Малинин В. Н.* Долгосрочное прогнозирование уровня Каспийского моря // Изв. РАН. Сер. географическая. 2009. № 6. С. 7–16.
- 17. Панин Г. Н., Выручалкина Т. Ю., Соломонова И. В. Климатические изменения в Арктике, Северной Атлантике, районе Каспия и их взаимосвязь // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. Т. 1. С. 183–210.
- 18. *Серых И. В., Костяной А. Г.* О влиянии Атлантического и Тихого океанов на изменение климатических параметров Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 96–107.
- 19. *Arpe K.*, *Leroy S. A. G.*, *Lakijani H.*, *Khan V.* Impact of the European Russia drought in 2010 on the Caspian Sea level // Hydrology and Earth System Sciences. 2012. V. 16. P. 19–27. DOI: 10.5194/hess-16-19-2012.
- 20. Caspian Sea: State of environment 2019 / ed. A. Krutov; Interim Secretariat of the Framework Convention for the Protection of the Marine Environment of the Caspian Sea (Tehran Convention). Geneva; Arendal: Tehran Convention Secretariat and GRID-Arendal, 2020. 134 p. URL: https://tehranconvention.org/system/files/tcis/soecaspian2019_eng_hires.pdf.
- Chen J. L., Pekker T., Wilson C. R., Tapley B. D., Kostianoy A. G., Cretaux J.-F., Safarov E. S. Longterm Caspian Sea level change // Geophysical Research Letters. 2017. V. 44. P. 6993–7001. DOI: 10.1002/2017GL073958.
- 22. Copernicus Marine Environment Monitoring Services: Global Ocean Sea Ice Concentration Time Series REPROCESSED (OSI-SAF) / E.U. Copernicus Marine Service Information. 2021. URL: https://resourc-es.marine.copernicus.eu/product-detail/SEAICE_GLO_SEAICE_L4_REP_OBSERVATIONS_011_009.
- Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A. M., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J. E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rieneker M., Schubert S. D. Sienkiewicz M., Zhao B. The modern-era retrospective analysis for research and applications, Version 2 (MERRA-2) // J. Climate. 2017. V. 30(14). P. 5419–5454. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
- 24. *Guilyardi E., Lescarmontier L., Matthews R., Morata N., Rocha M., Schlüpmann J., Tricoire M., Wilgenbus D.* The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Summary for Teachers Based on the IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC). 2020. 36 p. URL: https://www. oce.global/sites/default/files/2020-04/OCE-RAP_SROCC-EN-10-WEB.pdf.
- 25. *Kazmin A. S.* Multidecadal variability of the hydrometeorological parameters in the Caspian Sea // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2021. V. 250. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.107150.
- Kosarev A. N. Physico-Geographical Conditions of the Caspian Sea // The Caspian Sea Environment: The Handbook of Environmental Chemistry / eds. Kostianoy A., Kosarev A. Berlin; Heidelberg: Springer, 2005. V. 5. Pt. P. P. 5–31. DOI: https://doi.org/10.1007/698_5_002.
- 27. *Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Lavrova O. Yu., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Sheremet N. A., Soloviev D. M.* Comprehensive Satellite Monitoring of Caspian Sea Conditions // Remote Sensing of the Asian Seas / eds. V. Barale, M. Gade. Cham: Springer, 2019. P. 505–521. DOI: 10.1007/978-3-319-94067-0_28.
- 28. Lavrova O. Yu., Kostianoy A. G., Mityagina M. I., Strochkov A. Ya., Bocharova T. Yu. Remote sensing of sea ice in the Caspian Sea // Proc. SPIE. 2019. V. 11150. Remote Sensing of the Ocean, Sea ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. Art. No. 1115000Q. https://doi.org/10.1117/12.2532136.
- 29. *Lebedev S.* Climatic variability of water circulation in the Caspian Sea based on satellite altimetry data // Intern. J. Remote Sensing. 2018. P. 4343–4359. DOI: 10.1080/01431161.2018.1441567.
- 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. DOI: 10.5697/oc.56-3.445.
- 31. *Nandini-Weiss S. D., Prange M., Arpe K., Merkel U., Schulz M.* Past and future impact of the winter North Atlantic Oscillation in the Caspian Sea catchment area // Intern. J. Climatology. 2020. V. 40. P. 2717–2731. https://doi.org/10.1002/joc.6362.

- 32. *Prange M., Wilke T., Wesselingh F.P.* The other side of sea level change // Communications Earth and Environment. 2020. V. 1. Art. No. 69. 4 p. https://doi.org/10.1038/s43247-020-00075-6.
- 33. *Reynolds R. W., Smith T. M., Liu C., Chelton D. B., Casey K. S., Schlax M. G.* Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature // J. Climate. 2007. V. 20. P. 5473–5496.

Climatic changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea (1980–2020)

A. I. Ginzburg^{1,2}, A. G. Kostianoy^{1,3,4}, I. V. Serykh^{1,3}, S. A. Lebedev^{3,5,6}

¹ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia E-mails: ginzburg@ocean.ru, kostianoy@gmail.com, iserykh@gmail.com ² Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia ³ Geophysical Center RAS, Moscow 119296, Russia E-mail: sergey_a_lebedev@mail.ru ⁴ Moscow Witte University, Moscow 115432, Russia ⁵ Maykop State Technological University, Maykop 385000, Russia ⁶ National Research University of Electronic Technology Zelenograd, Moscow 124498, Russia

Reanalyses and remote sensing data of the Earth, as well as information from well-known publications of recent years, were used to study interannual changes and assess linear trends in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea (without the Kara-Bogaz-Gol Bay): near-surface air temperature (SAT), sea surface temperature (SST), ice cover and level — in the period from 1980/1982 to 2020. In the 2000s, in comparison with the 1980s and 1990s, the maximum summer and minimum winter mean monthly values of SAT and SST increased, the number of mild winters increased. Trend of SAT of the Caspian region in the period 1980-2020 was +0.030 °C /year, the trends of the average annual SST in 1982-2020 in the North, Middle, South Caspian and in the sea as a whole were +0.026, +0.042, +0.034 and +0.035 °C/year, respectively. The greatest warming of waters took place in the western part of the Middle Caspian, the least one was in the northeast of the North Caspian and along the shelf zone of Turkmenistan. Decrease in trends in SAT and SST in the period from 1980/1982 to 2020 in comparison with the previous period (from 1980–1982 until about 2010) and the absence of an increase in the average annual SST values after 2010 indicate a slowdown in the warming of the Caspian Sea in the second decade of the 2000s. Trends in the monthly mean and average for the cold half-year (November – April) ice concentration in the North Caspian in 1980–2020 turned out to be negative (-0.8 and -1.24 %/10 years, respectively). Sea level after 2005, with the exception of a brief stabilization in 2015–2017, continues to fall. Average rate of level fall in the 28-year period 1993–2020 was -5.37 ± 1.24 cm/year. By the end of 2020, it reached a mark of -28.5 m by the Baltic System of Heights, and only 0.5 m separates it from the 1977 minimum.

Keywords: Caspian Sea, sea level, air temperature, sea surface temperature, ice cover, interannual variability, global warming

Accepted: 15.09.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291

References

1. Bukharitsin P. I., Andreev A. N., Rhythms of solar activity and expected extreme climatic events in the North Caspian region for the period 2007–2017, *Ekstremal'nye gidrologicheskie sobytiya v Aralo-Kaspiiskom regione. Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii* (Proc. Conf. "Extreme geological events in the Aral–Caspian region", 19–20 Oct., 2006, Moscow, 2006, pp. 137–143 (in Russian).

- 2. *Vodnyi balans i kolebaniya urovnya Kaspiyskogo morya. Modelirovanie i prognoz* (Water balance and fluctuations in the level of the Caspian Sea. Modeling and forecasting), E. S. Nesterov (ed.), Moscow: Triada Ltd, 2016, 378 p. (in Russian).
- 3. *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei. Tom 6. Kaspiiskoe more. Vyp. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya* (The Sea project. Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. Vol. 6. The Caspian Sea. Issue 1. Hydrometeorological conditions), Terziev F.S. (ed.), Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992, 358 p. (in Russian).
- 4. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Tendencies of changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea in modern period (1990s –2017), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 195–207 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-195-207.
- 5. Ginzburg A. I., Kostianoi A. G., Sheremet N. A., Seasonal and interannual variability of the Caspian Sea surface temperature, *Oceanology*, 2004, Vol. 44, No. 5, pp. 605–618.
- 6. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A., Long-term variability of the Caspian Sea surface temperature (1982–2009), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 262–269 (in Russian).
- 7. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Serykh I. V., Lebedev S. A., Climatic changes in hydrometeorological parameters of the Black and Azov seas (1980–2020), *Okeanologiya*, 2021, Vol. 61, No. 6, pp. 1–13 (in Russian), DOI: 10.31857/S003015742106006X (in print).
- 8. Ivkina N., Naurozbaeva Zh., Klove B., The impact of changing climatic conditions on the ice regime of the Caspian Sea, *Tsentralnoaziatskii zhurnal issledovanii vody*, 2017, Vol. 3, No. 2, pp. 15–29 (in Russian).
- 9. Kazmin A.S., Long-term variability of hydrometeorological parameters in the Caspian Sea. Part 1: data description, *Okeanologicheskie issledovaniya*, 2019, Vol. 47, No. 5, pp. 65–73 (in Russian), DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(5).5.
- 10. Kosarev A. N., *Gidrologiya Kaspiiskogo i Aral'skogo morei* (Hydrology of the Caspian and Aral Seas), Moscow: Izd. MGU, 1975, 272 p. (in Russian).
- Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Lebedev S. A., Sheremet N. A., The Southern seas of Russia, In: *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* (The Second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation), V. M. Kattsov, S. M. Semenov (eds.), Moscow: IGKE Rosgidrometa i RAN, 2014, pp. 644–683 (in Russian).
- 12. Lavrova O. Yu., Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* (Complex Satellite Monitoring of Russian Seas), Moscow: IKI RAN, 2011, 470 p. (in Russian).
- 13. Lebedev S.A., Kostianoy A.G., *Sputnikovaya al'timetriya Kaspiiskogo morya* (Satellite altimetry of the Caspian Sea), Moscow: Izdatel'skii tsentr "More" Mezhdunarodnogo instituta okeana, 2005, 366 p.
- 14. Lebedev S.A., Kostianoy A.G., Changes in the level and water dynamics from satellite altimetry data, In: *Sistema Kaspiiskogo morya* (The Caspian Sea system), A. P. Lisitsin (ed.), Moscow: Nauchnyi mir, 2016, pp. 13–41 (in Russian).
- 15. Lobanov V.A., Naurozbayeva Zh.K., Caspian seas ice thickness possible changes in the current century, *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 2021, No. 62, pp. 75–95 (in Russian), DOI: 10.33933/2074-2762-2021-62-75-95.
- 16. Malinin V.N., Long-term forecasting of Caspian Sea level, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk*, *Seriya geo-graficheskaya*, 2009, No. 6, pp. 7–16 (in Russian).
- 17. Panin G. N., Vyruchalkina T. Yu., Solomonova I. V., Climatic changes in the Arctic, North Atlantic, the Caspian Sea region, and their relationship, *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2015, Vol. 1, pp. 183–210 (in Russian).
- Serykh I. V., Kostianoy A. G., The links of climate change in the Caspian Sea to the Atlantic and Pacific oceans, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2020, Vol. 45, No. 6, pp. 430–437, DOI: 10.3103/ S1068373920060060.
- 19. Arpe K., Leroy S.A.G., Lakijani H., Khan V., Impact of the European Russia drought in 2010 on the Caspian Sea level, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, Vol. 16, pp. 19–27, DOI: 10.5194/ hess-16-19-2012.
- 20. *Caspian Sea. State of environment 2019*, A. Krutov (ed.), Interim Secretariat of the Framework Convention for the Protection of the Marine Environment of the Caspian Sea (Tehran Convention), Geneva; Arendal: Tehran Convention Secretariat and GRID-Arendal, 2020, 134 p., available at: https://tehranconvention. org/system/files/tcis/soecaspian2019_eng_hires.pdf.
- Chen J. L., Pekker T., Wilson C. R., Tapley B. D., Kostianoy A. G., Cretaux J.-F., Safarov E. S., Longterm Caspian Sea level change, *Geophysical Research Letters*, 2017, Vol. 44, pp. 6993–7001, DOI: 10.1002/2017GL073958.
- 22. Copernicus Marine Environment Monitoring Services: Global Ocean Sea Ice Concentration Time Series REPROCESSED (OSI-SAF), E.U. Copernicus Marine Service Information, 2021, avail-

able at: https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/SEAICE_GLO_SEAICE_L4_REP_OBSERVATIONS_011_009.

- 23. Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M. G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A. M., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J. E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rieneker M., Schubert S. D. Sienkiewicz M., Zhao B., The modern-era retrospective analysis for research and applications, Version 2 (MERRA-2), *J. Climate*, 2017, Vol. 30(14), pp. 5419– 5454, DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
- 24. Guilyardi E., Lescarmontier L., Matthews R., Morata N., Rocha M., Schlüpmann J., Tricoire M., Wilgenbus D., *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Summary for teachers based on the IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC)*, 2020, 36 p., available at: https://www.oce.global/sites/default/files/2020-04/OCE-RAP_SROCC-EN-10-WEB.pdf.
- 25. Kazmin A.S., Multidecadal variability of the hydrometeorological parameters in the Caspian Sea, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2021, Vol. 250, https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.107150.
- Kosarev A. N., Physico-Geographical Conditions of the Caspian Sea, In: *The Caspian Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry*, Kostianoy A., Kosarev A. (eds.), Springer, 2005, Vol. 5, Part P, pp. 5–31, https://doi.org/10.1007/698_5_002.
- Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Lavrova O. Yu., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Sheremet N. A., Soloviev D. M., Comprehensive Satellite Monitoring of Caspian Sea Conditions, In: *Remote Sensing of the Asian Seas*, V. Barale, M. Gade (eds.), Cham: Springer, 2019, pp. 505–521, DOI: 10.1007/978-3-319-94067-0_28.
- Lavrova O. Yu., Kostianoy A. G., Mityagina M. I., Strochkov A. Ya., Bocharova T. Yu., Remote sensing of sea ice in the Caspian Sea, *Proc. SPIE*, 2019, Vol. 11150, Remote Sensing of the Ocean, Sea ice, Coastal Waters, and Large Water Regions, Art. No. 1115000Q, https://doi.org/10.1117/12.2532136.
- 29. Lebedev S., Climatic variability of water circulation in the Caspian Sea based on satellite altimetry data, *Intern. J. Remote Sensing*, 2018, pp. 4343–4359, DOI: 10.1080/01431161.2018.1441567.
- 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, Vol. 56(3), pp. 445–460, DOI: 10.5697/oc.56-3.445.
- 31. Nandini-Weiss S. D., Prange M., Arpe K., Merkel U., Schulz M., Past and future impact of the winter North Atlantic Oscillation in the Caspian Sea catchment area, *Intern. J. Climatology*, 2020, Vol. 40, pp. 2717–2731, https://doi.org/10.1002/joc.6362.
- 32. Prange M., Wilke T., Wesselingh F. P., The other side of sea level change, *Communications Earth and Environment*, 2020, Vol. 1, Art. No. 69, 4 p., https://doi.org/10.1038/s43247-020-00075-6.
- 33. Reynolds R.W., Smith T.M., Liu C., Chelton D.B., Casey K.S., Schlax M.G., Daily high-resolutionblended analyses for sea surface temperature, *J. Climate*, 2007, Vol. 20, pp. 5473–5496.