

Тенденции изменений гидрометеорологических параметров Каспийского моря в современный период (1990-е – 2017 гг.)

А. И. Гинзбург¹, А. Г. Костяной^{1,2}

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

² *Московский университет им. С. Ю. Витте, Москва, 115432, Россия*

Среднемесячные значения гидрометеорологических параметров из он-лайн баз данных (DANITI — Database for Hydrological Time Series of Inland Waters, NASA Giovanni) и измерения в вершине дельты Волги использованы для исследования межгодовой изменчивости и оценивания трендов уровня Каспийского моря и залива Кара-Богаз-Гол (КБГ), стока р. Волги, атмосферных осадков и температуры воздуха над морем, температуры поверхности (ТПМ) Северного, Среднего и Южного Каспия и залива КБГ в современный период. Тренды гидрометеорологических параметров оказались равными: стока Волги в 1992–2016 гг. — $-2,5 \text{ км}^3/\text{год}$; осадков и температуры воздуха в 2003–2017 гг. — $-0,21 \text{ мм/месяц/год}$ и $+0,04 \text{ }^\circ\text{C/год}$ соответственно; ТПМ в море в целом (без КБГ) в 2003–2017 гг. — $+0,059 \text{ }^\circ\text{C/год}$ (в Северном, Среднем и Южном Каспии и в заливе КБГ — $+0,050$, $+0,067$, $+0,087$ и $+0,106 \text{ }^\circ\text{C/год}$ соответственно). При отрицательных трендах обеих основных составляющих приходной части водного баланса Каспия (стока Волги и атмосферных осадков) уровень Каспия в среднем понижался. Подъём уровня в 1993–1995 гг. и его спад в 1995–1997 гг. соответствовали изменениям стока Волги в 1992–1994 и 1994–1996 гг. В дальнейшем падение уровня моря определялось в основном испарением с поверхности, увеличившимся при росте температуры воздуха и воды в условиях глобального потепления. Средняя скорость падения уровня в 1993–2015 гг. составила примерно 5 см/год ; в последние три с половиной года (в 2015, 2016, 2017 и до середины 2018 г.) уровень практически не менялся, оставаясь на отметке примерно -28 м .

Ключевые слова: уровень Каспийского моря, речной сток, атмосферные осадки, температура воздуха, температура поверхности моря, межгодовая изменчивость, глобальное потепление

Одобрена к печати: 03.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-195-207

Введение

Каспийское море, расположенное между Европой и Азией, — крупнейший в мире замкнутый бассейн. Оно простирается более чем на 1030 км с севера на юг, его ширина — в пределах примерно от 200 до 400 км (Водный..., 2016; Kosarev, 2005). Площадь моря меняется в зависимости от его уровня, средняя для периода 1996–2010 гг. равна примерно $392\,600 \text{ км}^2$ (Водный..., 2016). С учётом различий физико-географических условий, характера донной топографии и заметной зависимости температуры поверхности моря (ТПМ) от широты море обычно подразделяют на Северный, Средний и Южный Каспий. Северный Каспий — мелководный, его глубины не превышают 20 м . Максимальные глубины Среднего и Южного Каспия — соответственно 788 и 1025 м . С востока к Среднему Каспию примыкает мелкий залив-лагуна Кара-Богаз-Гол (КБГ). В марте 1980 г. этот залив был отделён от моря песчаной дамбой и к середине 1984 г. практически полностью высох, однако к середине 1996 г., после разрушения дамбы в июне 1992 г., он вновь наполнился водой (Kosarev, Kostianoy, 2005).

Каспийское море характеризуется значительной межгодовой изменчивостью его гидрометеорологических параметров (уровня, ТПМ, температуры воздуха, ледяного покрова, речного стока, атмосферных осадков и др.), которая во многом определяется глобальными и региональными изменениями климата. Эта изменчивость и задачи контроля экологического состояния моря делают необходимым комплексный мониторинг его основных гидрометеорологических параметров. В условиях резкого сокращения измерений *in situ* и количества гидрометеорологических станций на побережье Каспия с начала 1990-х гг. надёжным источником

регулярной информации о различных параметрах моря стали известные, доступные через Интернет базы данных, использующие спутниковые измерения и моделирование. С использованием таких данных были определены, например, тренды ТПМ Каспия в период с 1982 по 2009 г. и его уровня с 1993 по 2012 г. (Костяной и др., 2014; Лаврова и др., 2011). В данной работе рассматривается межгодовая изменчивость ряда гидрометеорологических параметров в последние 25 лет (1993–2017 гг.): уровня Каспийского моря и залива КБГ, стока Волги, атмосферных осадков, приводной температуры воздуха, ТПМ. Оценённые тренды вышеперечисленных параметров сравниваются с соответствующими трендами, полученными ранее для периода с 1982 по 2009–2012 гг. (Костяной и др., 2014).

Данные

Временные серии среднемесячных значений уровня Каспийского моря и залива КБГ (с 28 сентября 1992 по 25 июля 2018 г.) получены из он-лайн базы данных DAHITI (Database for Hydrological Time Series of Inland Waters) (Schwatke et al., 2015), использующей для оценки высот водной поверхности измерения альтиметров спутников Jason-1, -2, -3 и TOPEX/Poseidon. Данные по стоку р. Волги (км³) в 1992–2016 гг. в вершине её дельты предоставлены Л. П. Остроумовой (ГОИН). Среднемесячные значения ТПМ (2003–2017), осреднённые в пределах Северного, Среднего и Южного Каспия и залива КБГ в отдельности, взяты из системы NASA Giovanni online data system, использующей измерения радиометра MODIS спутника Aqua. Среднемесячные значения приводной температуры воздуха и атмосферных осадков (2003–2017), осреднённые в масштабах всего Каспийского моря (исключая КБГ), получены также из NASA Giovanni online data system (MERRA-2 Model M2TMNXFLX v.5.12.4).

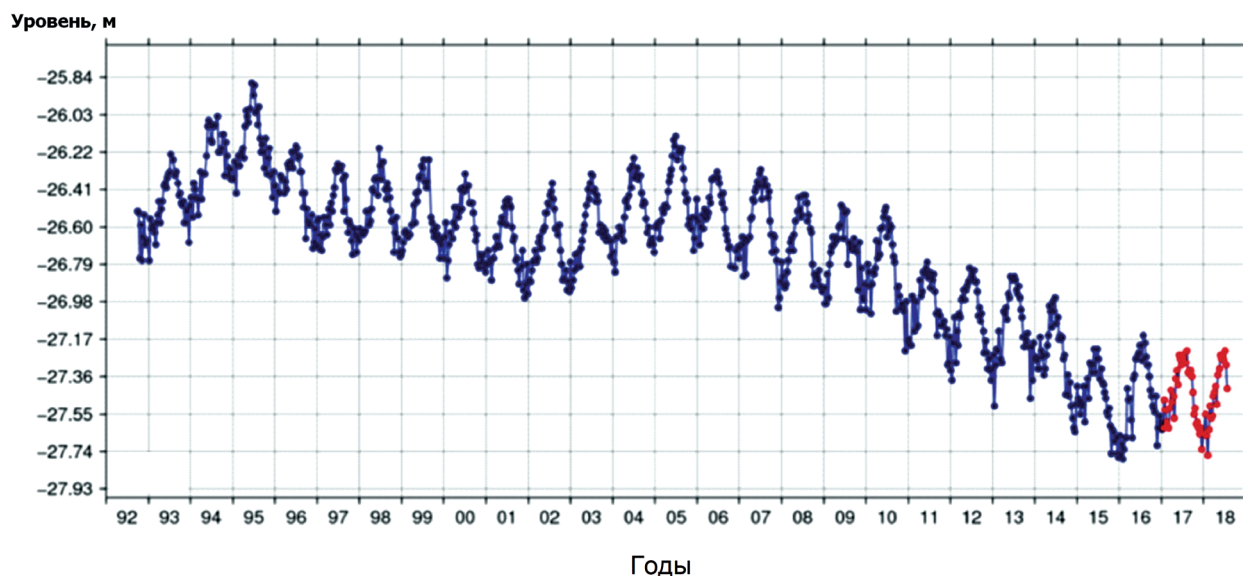
Межгодовая изменчивость и тренды гидрометеорологических параметров

Уровень моря

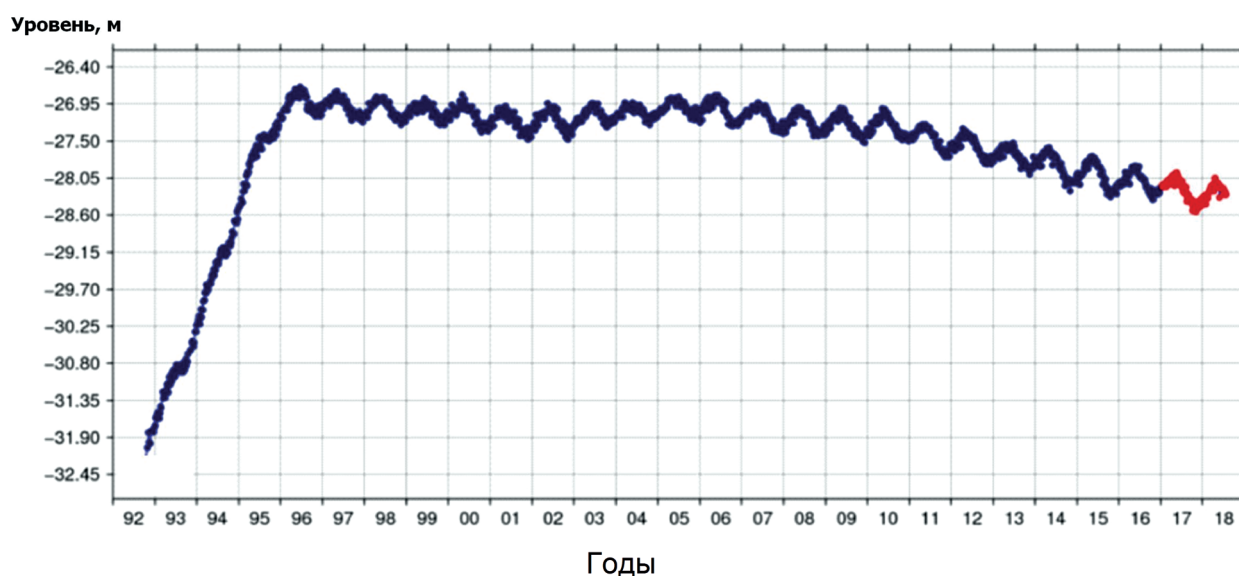
Межгодовая изменчивость уровня моря по данным инструментальных измерений в период 1837–2009 гг. хорошо известна (см., например, (Лаврова и др., 2011)). Обработка данных альтиметров спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1, -2 с использованием программного обеспечения, разработанного в Геофизическом центре (ГЦ) РАН, позволила получить временной ход уровня Каспия с 1993 по 2009 г. (Лаврова и др., 2011), затем продлить его до 2012 (Костяной и др., 2014) и 2015 гг. (Лебедев, Костяной, 2016; Kostianoy et al., 2018) с хорошим соответствием данных уровенных постов и спутниковой альтиметрии (Лебедев, Костяной, 2005). Временная последовательность среднемесячных значений уровня Каспийского моря и залива КБГ с 28 сентября 1992 по 25 июля 2018 г. по данным DAHITI показана на *рис. 1* (см. с. 110).

Как следует из *рис. 1а* и работ (Лебедев, Костяной, 2016; Kostianoy et al., 2018), уровень моря увеличивался с конца 1992 до лета 1995 г., уменьшался до зимы 2001/2002 гг., снова возрастал до лета 2005 г. и падал до зимы 2015/2016 гг. В последующие два с половиной года (в 2016, 2017 и половине 2018 г.), судя по *рис. 1а*, уровень Каспия оставался таким же, как в 2015 г. Таким образом, в течение последних трёх с половиной лет (с 2015 до середины 2018 г.) уровень Каспийского моря практически не менялся.

Выполненное нами сопоставление характера изменчивости уровня Каспия на *рис. 1а* и в предшествующих работах (Костяной и др., 2014; Лаврова и др., 2011; Лебедев, Костяной, 2016; Kostianoy et al., 2018), где для определения уровня использовалось программное обеспечение ГЦ РАН, показало, что при одинаковом характере межгодовой изменчивости уровня моря его значения в системе DAHITI завышены в среднем на 0,4–0,5 м. С учётом этого уровень Каспийского моря к концу 2015 г. (и 2017 г.) опустился до отметки примерно –28,0 м в Балтийской системе высот (БС), оставаясь на 1 м выше минимума 1977 г. (–29,0 м БС). (Здесь и далее указаны средние для каждого года значения уровня.)



a



б

Рис. 1. Изменчивость уровня Каспийского моря (а) (DAHITI, http://dahiti.dgfi.tum.de/en/39/water_level/) и залива Кара-Богаз-Гол (б) (DAHITI, http://dahiti.dgfi.tum.de/en/79/water_level/) (среднемесечные значения) с 28 сентября 1992 по 25 июля 2018 г. Красным цветом выделены данные, полученные в близком к реальному времени (IGDR — Interim Geophysical Data Record)

Следовательно, с максимального значения в рассматриваемый период в 1995 г. (–26,6 м БС) до минимального в 2015–2017 гг. (–28,0 м БС) уровень упал на 1,4 м. Средняя скорость падения уровня за период 1993–2015 гг. составила 5 см/год (Kostianoy et al., 2018). При этом в 2005–2015 гг. уровень уменьшался со средней скоростью –10,3 см/год, хотя это падение не было монотонным: резкое уменьшение уровня имело место в конце 2010 – начале 2011 г. в связи с засухой в Европейской части России, включая бассейн р. Волги, в конце июня – августе 2010 г. (Агре et al., 2012). Размах сезонных изменений уровня моря — 30–40 см.

Характер межгодовой изменчивости залива КБГ с 1996 г., когда он полностью заполнился водой, — тот же, что и в Каспии (рис. 1б). Уровень залива после 1996 г. примерно на 0,5 м ниже, чем в море.

ДИНАМИКА БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ СЕВЕРНОГО КАСПИЯ Масштаб 1:4 000 000

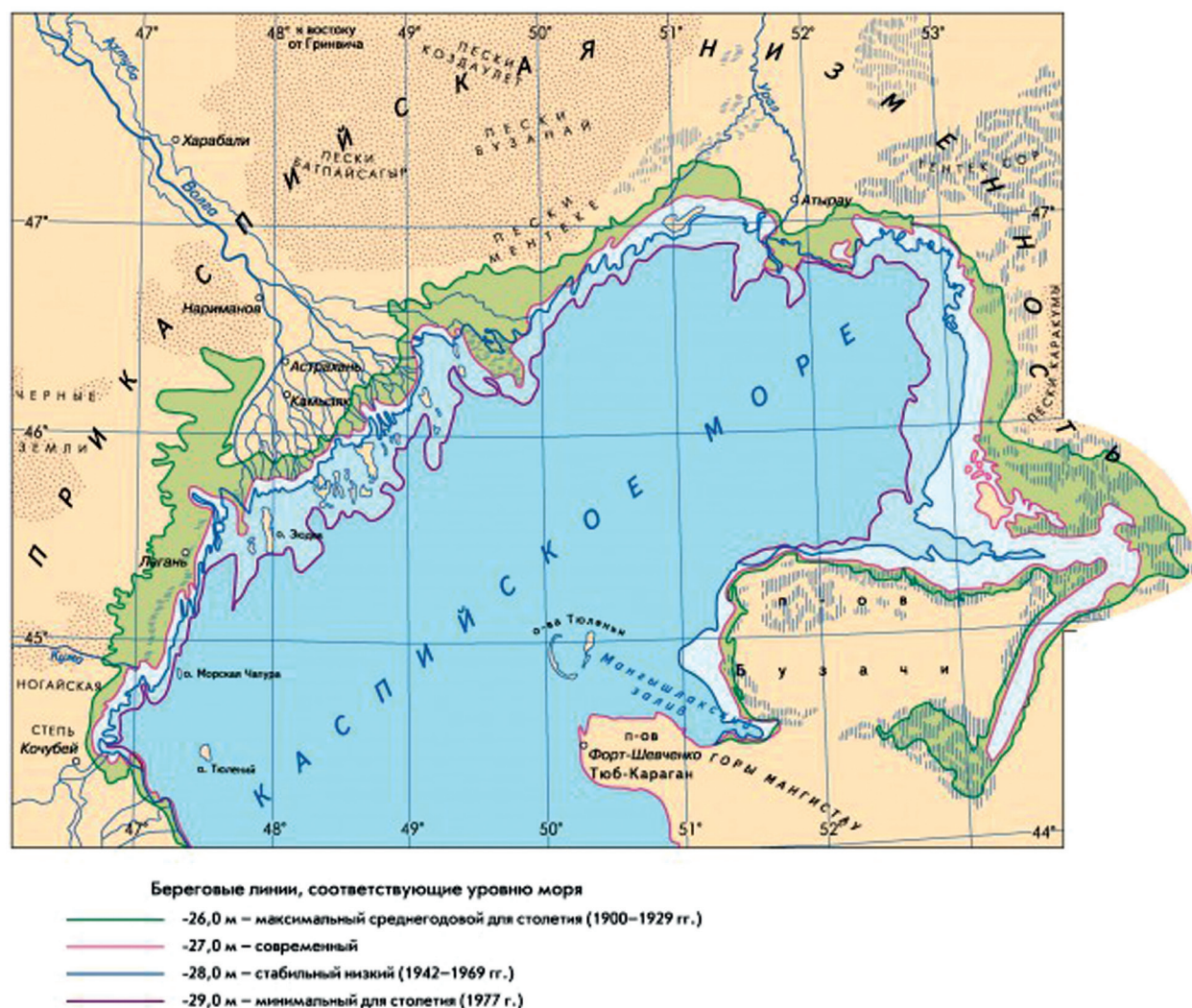


Рис. 2. Динамика береговой линии Северного Каспия при уровнях моря –26,0; –27,0; –28,0 и –29,0 м (в БС) (<https://geographyofrussia.com/morya-rossii-kaspijskoe-more/>)

Изменения уровня Каспийского моря приводят к заметным изменениям береговой линии мелководного Северного Каспия: на протяжении более чем 100-летнего периода перемещения береговой линии на отдельных участках побережья достигали нескольких десятков километров (рис. 2). В частности, при современном уровне Каспия –28 м БС узкий и длинный залив Кайдак и в значительной степени залив Мёртвый Култук (бывший залив Комсомолец и ещё раньше — залив Цесаревича) пересыхают (см. рис. 2), что хорошо видно на спутниковых изображениях (рис. 3, см. с. 251).

Сток Волги

Уровень Каспийского моря определяется его водным балансом. Основную часть приходной составляющей водного баланса (примерно 80 %) составляет речной сток. Около 80 % его приходится на сток Волги (Водный..., 2016; Проект..., 1992), хотя в отдельные годы доля стока Волги в общем стоке рек, впадающих в Каспий, достигала примерно 90 % (Chen et al., 2017). Следовательно, межгодовые изменения волжского стока в значительной степени определяют изменчивость уровня Каспия.



а



б

Рис. 3. Фрагменты изображений MODIS-Aqua: *а* — 11.06.2005 (уровень моря –26,7 м); *б* — 03.08.2017 (уровень моря –28,0 м)

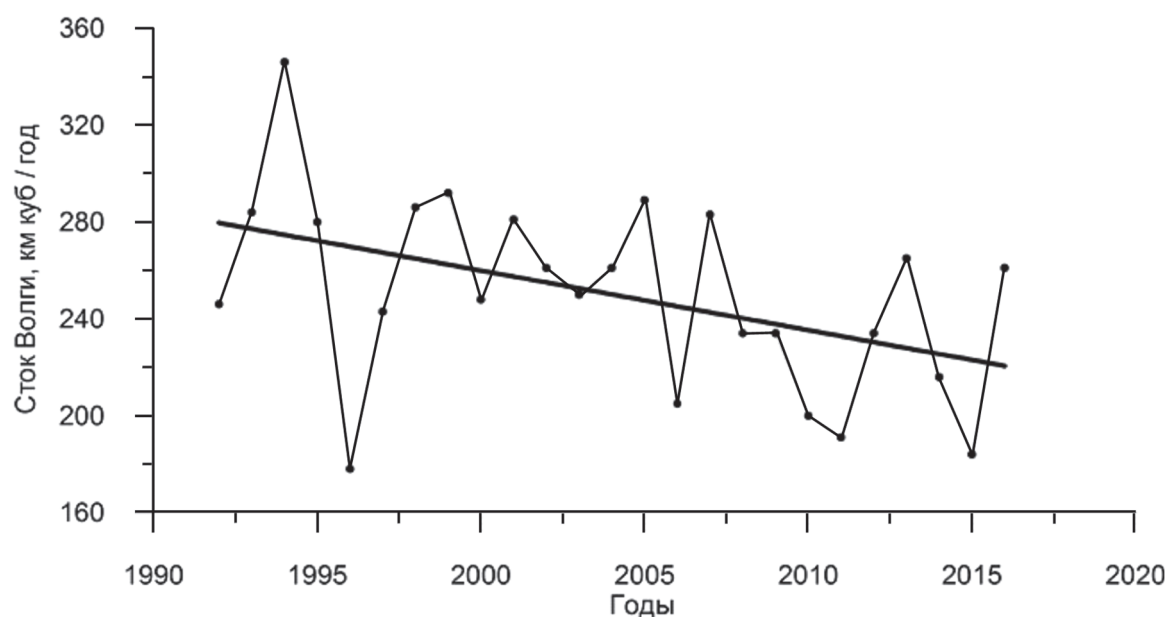


Рис. 4. Межгодовая изменчивость стока Волги (км³) в вершине дельты Волги в 1992–2016 гг. (данные предоставлены Л. П. Остроумовой, ГОИН)

В 1992–2016 гг. волжский сток менялся в пределах 168 км^3 , от максимального значения 346 км^3 в 1994 г. до минимального 178 км^3 в 1996 г. (рис. 4), что эквивалентно слоям воды соответственно примерно 88 и 45 см при площади моря около $392\,600 \text{ км}^2$ (см. выше). Средняя скорость уменьшения стока в этот 24-летний период — примерно $-2,5 \text{ км}^3/\text{год}$ (уменьшение слоя воды — $0,64 \text{ см/год}$). Соответственно, вклад волжского стока в понижение уровня моря за данный период — примерно 15 см. С учётом приблизительно 80%-й доли волжского стока в общем стоке рек в Каспий можно предположить, что уменьшение речного стока в рассматриваемый период привело к падению уровня моря примерно на 19 см.

Как следует из рис. 1а и 4, количественное соответствие приращений уровня и стока не всегда наблюдается. Например, падение уровня моря с 1995 по 1997 г. примерно на 40 см (см. рис. 1а) соответствовало уменьшению стока Волги на 168 км^3 с 1994 по 1996 г. (уменьшению слоя воды — на 43 см). Очевидно также соответствие роста уровня в 1993–1995 гг. увеличению стока Волги в 1992–1994 гг. Однако после 1997 г. такой чёткой корреляции не наблюдается, особенно в 2005–2015 гг., в период устойчивого падения уровня при существенных колебаниях речного стока. Например, межгодовые увеличения стока примерно на 80 км^3 в 2006–2007 и 2015–2016 гг. (см. рис. 4), которые могли бы вызвать соответствующие повышения уровня примерно на 20 см, не привели к таким изменениям (см. рис. 1а).

По данным работы (Водный..., 2016), коэффициент корреляции приращений уровня и волжского стока в 1900–1995 гг. менялся в пределах 0,67–0,84; в период роста уровня в 1978–1995 гг. он составлял 0,75.

Атмосферные осадки

Другой компонент приходной части водного баланса Каспия, с меньшим вкладом по сравнению с речным стоком, — атмосферные осадки над акваторией моря. Тренд количества атмосферных осадков с января 2003 по декабрь 2017 г., по данным системы NASA Giovanni, оказался равным $-0,21 \text{ мм/месяц/год}$ (рис. 5, см. с. 251), что на порядок больше (по абсолютной величине) определённого ранее для периода 1979–2010 гг. ($-0,01 \text{ мм/месяц/год}$) (Костяной и др., 2014). Следовательно, за 15-летний период 2003–2017 гг. среднегодовое количество осадков уменьшилось примерно на 38 мм, что эквивалентно уменьшению уровня Каспия примерно на 4 см за этот период.

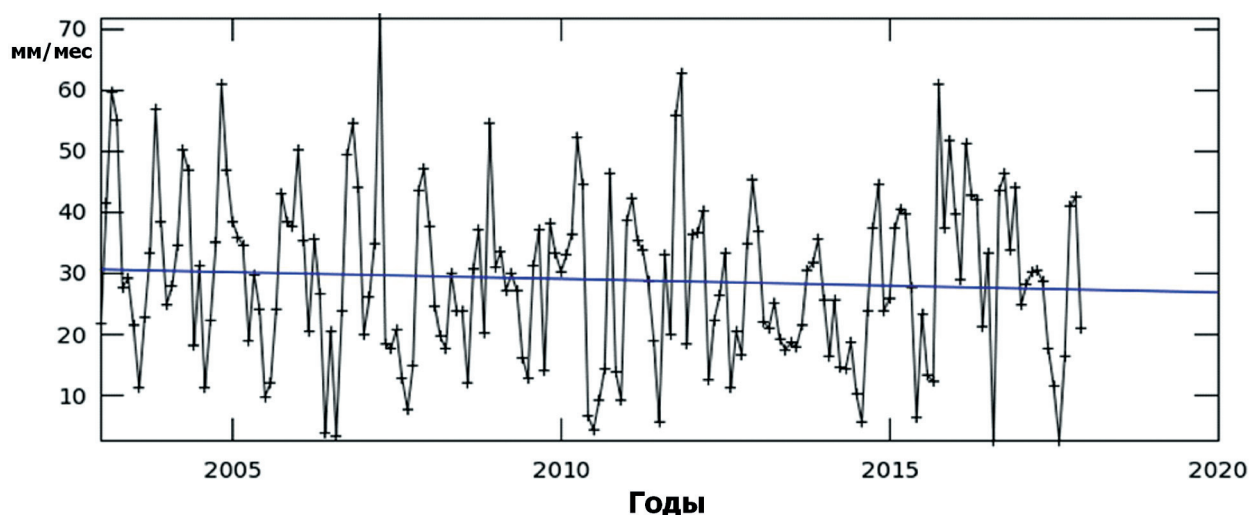


Рис. 5. Временная серия среднемесячных значений атмосферных осадков (мм/мес) над Каспийским морем (37–47° с. ш., 48–54° в. д.) с января 2003 по декабрь 2017 г. по данным системы Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>). Прямая линия показывает тренд осадков в рассматриваемый период

Температура воздуха

Тенденция повышения среднегодовой температуры воздуха, наблюдающаяся с 1890 г. (Костяной и др., 2014; Проект..., 1992), продолжается (рис. 6). За 15-летний период с 2003 по 2017 г. положительный линейный тренд температуры воздуха оказался равным примерно 0,04 °C/год, т.е. несколько меньшим, чем полученный ранее для периода 1979–2011 гг. (+0,067 °C/год) (Костяной и др., 2014). Температура воздуха за 2003–2017 гг. увеличилась в среднем на 0,6 °C. Максимальные среднемесячные летние температуры стали нередко достигать 27–28 °C (см. рис. 6), чего не наблюдалось до 2006 г. Самым жарким было лето 2010 г., когда над Каспийским морем распространялся воздух из Средней Азии (Костяной и др., 2014; Arpe et al., 2012).

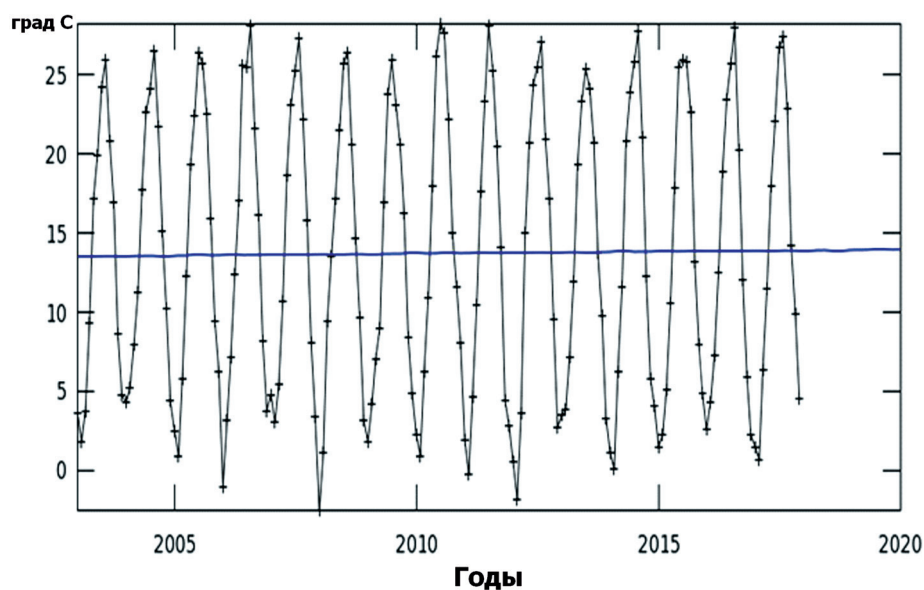


Рис. 6. Временная серия среднемесячных значений приводной температуры воздуха над Каспийским морем (37–47° с. ш., 48–54° в. д.) в период с января 2003 по декабрь 2017 г. по данным системы Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>). Прямая линия показывает тренд температуры воздуха в рассматриваемый период

Минимальные и максимальные значения зимней температуры воздуха на *рис. 6* соответствуют известной классификации суровости зим по сумме градусо-дней мороза в Северном Каспии. По данным работы (Ивкина и др., 2017), зима 2011/2012 гг. была очень суровой, зимы 2002/2003 и 2007/2008 гг. — суровыми, зимы 2003/2004, 2006/2007 и 2015/2016 гг. — мягкими, остальные — умеренными. Карты распределения ледяного покрова в очень суровую зиму 2011/2012 гг. и мягкую 2015/2016 гг. по данным ЕСИМО (Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане) представлены в работе (Гинзбург, Костяной, 2018).

Температура поверхности моря

Как и температура воздуха, ТПМ трёх районов Каспия и залива КБГ в 2003–2017 гг. на фоне заметной межгодовой изменчивости продолжала расти (*рис. 7*, см. с. 26), причём с большими темпами, чем в предшествующий период. По данным ряда гидрометеорологических станций на побережье моря в XX столетии (до 1983 г.), тренды ТПМ были равными примерно 0,01 °C/год (Гинзбург и др., 2004). С 1982 г. эти тренды оценивались методом линейной регрессии по спутниковым данным. При этом для разных временных периодов использовались разные доступные через интернет базы данных, основанные на измерениях разными спутниковыми сенсорами и на разных алгоритмах обработки. Так, для Среднего и Южного Каспия были получены следующие положительные значения трендов ТПМ: 0,05 и 0,10 °C/год соответственно в период 1982–2000 гг. с использованием данных NASA JPL PO.DAAC AVHRR MCSST (Гинзбург и др., 2004); 0,06 и 0,05 °C/год для 1982–2009 гг. на основе данных проекта NASA JPL PO.DAAC AVHRR-Pathfinder (Гинзбург и др., 2012); 0,05 и 0,04 °C/год для 1982–2015 гг. с использованием GODAE (Global Ocean Data Assimilation Project) High Resolution SST (GHRSSST) (Kostianoy et al., 2018). По используемым в настоящей работе данным NASA Giovanni, в 2003–2017 гг. положительные тренды ТПМ в Северном, Среднем и Южном Каспии и заливе КБГ оказались равными 0,050; 0,067; 0,087 и 0,106 °C/год соответственно. При таких трендах ТПМ этих четырёх районов за 15 лет увеличилась соответственно на 0,75; 1,01; 1,31 и 1,59 °C. Средняя для всего Каспийского моря ТПМ (исключая КБГ) за этот период, по данным NASA Giovanni, увеличивалась со скоростью 0,059 °C/год (увеличение средней температуры за 15 лет — на 0,88 °C). Если принять положительный тренд ТПМ равным примерно 0,05–0,06 °C/год в период 1982–2017 гг. для всего Каспийского моря, то получим увеличение его температуры примерно на 1,8–2,0 °C. Эта оценка хорошо согласуется с картой NASA глобальных аномалий температуры в 2017 г. относительно периода 1951–1980 гг. (<https://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=91604>), т.е. до глобального потепления.

Характер межгодового изменения ТПМ трёх районов Каспия (и в основных чертах залива КБГ) одинаков и соответствует характеру изменения температуры воздуха. Самое жаркое лето наблюдалось в 2010 г. Начиная с 2010 г. максимальные среднемесячные летние температуры были по большей части выше, чем в предыдущий период. Самыми холодными были зимы 2007/2008 и 2011/2012 гг. Следует отметить, что зимние температуры в частично замерзающем Северном Каспии соответствуют в массиве данных NASA Giovanni, по-видимому, осреднению по свободной ото льда поверхности моря.

Заключение

В период 1993–2017 гг. основные компоненты приходной части водного баланса Каспия (сток Волги и атмосферные осадки) при значительной межгодовой изменчивости в среднем уменьшались, способствуя понижению уровня моря. Сравнительный анализ характера изменения уровня Каспия и стока Волги в рассматриваемый период показывает, что подъём уровня в 1993–1995 гг. и его спад до 1997 г. соответствовали изменениям стока Волги.

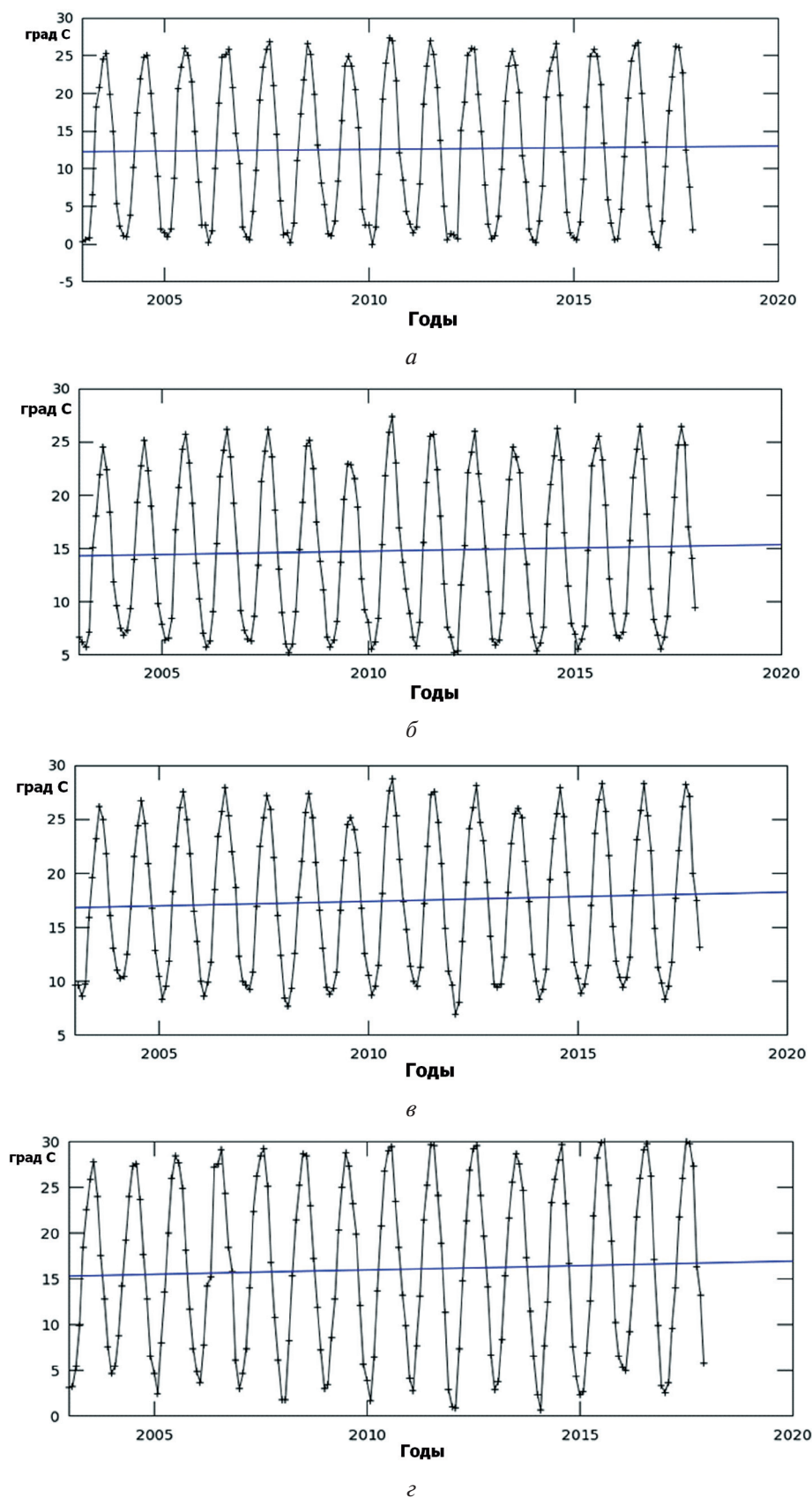


Рис. 7. Временные серии среднемесячных значений ТПМ: *a* — Северного (44,5–47° с. ш., 47–53° в. д.), *б* — Среднего (40,5–44,5° с. ш., 47–53° в. д.), *в* — Южного (38–40,5° с. ш., 49–54° в. д.) Каспия, *г* — залива КБГ (40,5–42,5° с. ш., 53–55° в. д.) в период с января 2003 по декабрь 2017 г. по данным системы Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>). Прямые линии показывают тренды ТПМ в рассматриваемый период

В дальнейшем определяющим фактором падения уровня моря при падении в среднем речного стока являлось, по-видимому, увеличившееся испарение с поверхности моря, что убедительно продемонстрировано в работе (Chen et al., 2017). Этот основной компонент расходной части водного баланса моря зависит от температуры воздуха и водной поверхности, влажности, скорости ветра и др. (Водный..., 2016; Проект..., 1992), причём испарение максимально в летний период. Положительный тренд температуры воздуха и ТПМ с заметным увеличением летних температур в последнюю декаду, являющимся, очевидно, следствием глобального потепления, способствовал увеличению испарения. Интересно отметить, что, согласно анализу учёных NASA и NOAA, пять самых тёплых лет на Земле за время спутниковых наблюдений имели место в период с 2010 г. (<https://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=91604>).

По данным работы (Chen et al., 2017), средние многолетние величины испарения в 1979–1995 и 1996–2015 гг. составили соответственно 107,73 и 116,55 см/год (модельный расчёт), т.е. увеличение испарения между этими двумя периодами — 8,82 см/год. Несколько меньшие средние величины испарения для близких временных периодов приведены в работе (Водный..., 2016): 91,9 и 96,6 см/год в 1978–1995 и 1996–2010 гг. соответственно (приращение — 4,7 см/год). При некотором различии этих данных очевидно, что испарение с поверхности Каспия с 1996 г. заметно увеличилось.

В течение последнего года в средствах массовой информации неоднократно появлялись сообщения о том, что «при существующих темпах глобального потепления российская часть акватории Каспийского моря обмелеет через 75 лет» (см., например, <https://www.popmech.ru/science/384692-vysohnet-li-kaspiyskoe-more/>). Основанием для такого вывода явилась приведённая в работе (Chen et al., 2017) скорость падения уровня моря 6,72 см/год в период 1996–2015 гг. Несостоятельность подобного вывода очевидна: на сегодняшний день надёжных долгосрочных прогнозов уровня Каспийского моря не существует, прогноз даже на десятилетие вперёд не всегда оправдывается (см., например, (Водный..., 2016)). Очевидно (см. *рис. 1а*), что средний для 1995–2015 гг. темп понижения уровня примерно 7 см/год не сохранился: уровень Каспия в последние три с половиной года (в 2015, 2016, 2017 и до середины 2018 гг.) практически не меняется. Кроме того, даже при сохранении скорости понижения уровня примерно 7 см/год за 75 лет обмелела бы только часть акватории России и Казахстана в пределах пятиметровой изобаты.

Мониторинг уровня Каспийского моря и составляющих его водного баланса на основе доступной оперативной спутниковой информации чрезвычайно важен.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00095).

Литература

1. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз / под ред. Е. С. Нестерова. М.: Гидрометцентр России, 2016. 374 с.
2. Гинзбург А. И., Костяной А. Г. Межгодовая изменчивость температуры поверхности Каспийского моря в современный период (2003–2017 гг.) // Вестник Тверского гос. ун-та. 2018. № 3. С. 57–65. (Сер. «География и геоэкология»)
3. 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.
4. 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.
5. Ивкина Н., Наурузбаева Ж., Кловье Б. Влияние изменения климатических условий на ледовый режим Каспийского моря // Центральнаяазиатский журн. исследований воды. 2017. Т. 3. № 2. С. 15–29.
6. Костяной А. Г., Гинзбург А. И., Лебедев С. А., Шеремет Н. А. Южные моря России // Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской

- Федерации. Федеральная служба по Гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) / ред. В. М. Катцов, С. М. Семенов. М.: ИГКЭ Росгидромета и РАН, 2014. С. 644–683.
7. 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. 470 с.
 8. Лебедев С. А., Костяной А. Г. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. М.: Море, 2005. 366 с.
 9. 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.
 10. Проект «Моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей / отв. ред. Терзиев Ф. С. Т. 6. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 358 с.
 11. Arpe K., Leroy S. A. G., Lahijani 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.
 12. Chen J. L., Pekker T., Wilson C. R., Tapley B. D., Kostianoy A. G., Cretaux J.-F., Safarov E. S. Long-term Caspian Sea level change // *Geophysical Research Letters*. 2017. V. 44. P. 6993–7001. DOI: 10.1002/2017GL073958.
 13. 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. 5–31. DOI: https://doi.org/10.1007/698_5_002.
 14. Kosarev A. N., Kostianoy A. G. Kara-Bogaz-Gol Bay // *The Caspian Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry* / eds. Kostianoy A., Kosarev A. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. V. 5. Pt. P. 211–221. DOI: https://doi.org/10.1007/698_5_011.
 15. 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. 2018 (in print).
 16. Schwatke C., Dettmering D., Bosch W., Seitz F. DAHITI — an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2015. V. 19. P. 4345–4364. DOI: 10.5194/hess-19-4345-2015.

Tendencies of changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea in the modern period (1990s – 2017)

A. I. Ginzburg¹, A. G. Kostianoy^{1,2}

¹ *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow 117997, Russia
E-mails: ginzburg@ocean.ru, kostianoy@gmail.com*

² *S. Yu. Witte Moscow University, Moscow 115432, Russia*

Monthly mean values of hydrometeorological parameters from on-line databases (DAHITI — Database for Hydrological Time Series of Inland Waters, NASA Giovanni) and measurements at the top of the Volga River Delta have been used to study the interannual variability and assessment of trends in the level of the Caspian Sea and the Kara-Bogaz-Gol (KBG) Bay, Volga River runoff, atmospheric precipitation and air temperature over the sea, sea surface temperature (SST) of the Northern, Middle and Southern Caspian and KBG Bay in the modern period. The trends in hydrometeorological parameters turned out to be equal: the runoff of the Volga River in 1992–2016 to $-2.5 \text{ km}^3/\text{year}$; precipitation and air temperature in 2003–2017 to $-0.21 \text{ mm/month/year}$ and $+0.04 \text{ }^\circ\text{C/year}$, respectively; SST in the sea as a whole (without the KBG Bay) in 2003–2017 to $+0.059 \text{ }^\circ\text{C/year}$ (in the Northern, Middle, and Southern Caspian and in the KBG Bay they were $+0.050$, $+0.067$, $+0.087$ and $+0.106 \text{ }^\circ\text{C/year}$, respectively). In the negative trends of both main components of the Caspian Sea water balance (Volga runoff and atmospheric precipitation), the level of the Caspian Sea decreased on the average. The rise of the level in 1993–1995 and its decline in 1995–1997 corresponded to changes in Volga runoff in 1992–1994 and 1994–1996. Later, the drop in sea level was determined mainly by evaporation from the sea surface which increased with the growth of air and water temperature under conditions of global warming. The average rate of decline in the sea level in 1993–2015 was approximately

5 cm/year; in the past 3.5 years (2015, 2016, 2017 and until mid-2018), the level remained practically unchanged at around –28 m.

Keywords: Caspian Sea level, river runoff, precipitation, air temperature, sea surface temperature, interannual variability, global warming

Accepted: 03.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-195-207

References

1. *Vodnyi balans i kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya. Modelirovanie i prognoz* (Water balance and fluctuations in the level of the Caspian Sea. Modeling and forecasting), Nesterov E. S. (ed.), Moscow: Gidromettsentr Rossii, 2016, 374 p.
2. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Mezhdogovaya izmenchivost' poverkhnostnoi temperatury Kaspiiskogo morya v sovremennyi period (2003–2017 gg.) (Interannual variability of the Caspian Sea surface temperature in the current period (2003–2017)), *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, No. 3, pp. 57–65, Seriya "Geografiya i geoecologiya".
3. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A., Sezonnaya i mezhdogovaya izmenchivost' temperatury poverkhnosti Kaspiiskogo morya (Seasonal and interannual variability of the Caspian Sea surface temperature), *Okeanologiya*, 2004, Vol. 44, No. 5, pp. 645–659.
4. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A., Dolgovremennaya izmenchivost' temperatury poverkhnosti Kaspiiskogo morya (1982–2009 gg.) (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.
5. Ivkina N., Naurozbaeva Zh., Klove B., Vliyanie izmeneniya klimaticheskikh uslovii na ledovyi rezhim Kaspiiskogo morya (The impact of changing climatic conditions on the ice regime of the Caspian Sea), *Tsentranoaziatskii zhurnal issledovaniy vody*, 2017, Vol. 3, No. 2, pp. 15–29.
6. Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Lebedev S. A., Sheremet N. A., Yuzhnye morya Rossii (The Southern seas of Russia), In: *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii (Roshydromet 2nd assessment report 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.
7. Lavrova O. Yu., Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* (Integrated satellite monitoring of Russian seas), Moscow: IKI RAN, 2011, 470 p.
8. Lebedev S. A., Kostianoy A. G., *Sputnikovaya al'timetriya Kaspiiskogo morya* (Satellite altimetry of the Caspian Sea), Moscow: More, 2005, 366 p.
9. Lebedev S. A., Kostianoy A. G., *Izmeneniya urovnya i dinamiki vod po dannym sputnikovoi al'timetrii* (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.
10. *Proekt "Morya". Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei. Tom VI. Kaspiiskoe more. Vyp. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya* (Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. Vol. 6. The Caspian Sea. Issue 1. Hydrometeorological conditions), Terziev F. S. (ed.), St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992, 358 p.
11. Arpe K., Leroy S. A. G., Lahijani 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.
12. Chen J. L., Pekker T., Wilson C. R., Tapley B. D., Kostianoy A. G., Cretaux J.-F., Safarov E. S., Long-term Caspian Sea level change, *Geophysical Research Letters*, 2017, Vol. 44, pp. 6993–7001, DOI: 10.1002/2017GL073958.
13. 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.), Berlin, Heidelberg: Springer, 2005, Vol. 5, Part P, pp. 5–31, DOI: https://doi.org/10.1007/698_5_002.
14. Kosarev A. N., Kostianoy A. G., Kara-Bogaz-Gol Bay, In: *The Caspian Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry*, Kostianoy A., Kosarev A. (eds.), Berlin, Heidelberg: Springer, 2005, Vol. 5, Part P, pp. 211–221, DOI: https://doi.org/10.1007/698_5_011.

15. 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.), 2018 (in print).
16. Schwatke C., Dettmering D., Bosch W., Seitz F., DAHITI — an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, Vol. 19, pp. 4345–4364, DOI: 10.5194/hess-19-4345-2015.