

ДОЛГОПЕРИОДНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В АКВАТОРИИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ. ЧАСТЬ 1: ОПИСАНИЕ ДАННЫХ

Казьмин А.С.

Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: akazmin@ocean.ru

Статья поступила в редакцию 16.05.2019, одобрена к печати 13.12.2019

Для описания долгопериодной изменчивости термических, динамических и влажностных параметров (температура приповерхностного воздуха, температура поверхности моря, ветер, атмосферное давление на уровне моря, относительная и удельная влажность, скорость выпадения осадков, общее влагосодержание атмосферы) в акватории Каспийского моря использованы данные реанализа NCEP/NCAR за период 1948–2017 гг. Представлены линейные тренды и полиномиальные аппроксимации указанных параметров. Последние указывают на нелинейный характер и периодичность изменчивости параметров. Выделено три временных интервала продолжительностью в среднем 10–25 лет с разнонаправленными тенденциями изменений гидрометеорологических параметров. Смена режимов изменчивости ветра происходила на 10–12 лет раньше изменения термического и влажностного режимов, что позволяет предполагать ведущую роль долгопериодных вариаций крупномасштабных атмосферных процессов в изменчивости гидрометеорологических характеристик в акватории Каспийского моря.

Ключевые слова: гидрометеорологические параметры; долгопериодная изменчивость; линейные тренды; полиномиальные аппроксимации; Каспийское море

Введение

Каспийское море имеет важное хозяйственное (рыболовство, добыча ископаемых на шельфе, транспорт нефти и газа, судоходство) и стратегическое (морские границы с четырьмя государствами в нестабильном регионе (рис.1) значение. Отсутствие непосредственного водообмена с другими морскими акваториями делает его чувствительным к изменениям глобального и регионального климата и к антропогенным воздействиям (регулированию речного стока, промышленным и бытовыми сбросам, добыче и транспорту нефти и др.) и негативно влияет на экосистему. Одна из основных экологических проблем Каспийского моря состоит в антропогенном вселении в него в течение последних десятилетий чужеродного вида гребневика (*Mnemiopsis leidyi*), оказывающего разрушительное действие на аборигенное планктонное сообщество моря (Shiganova et al., 2004).

В качестве индикаторов климатических изменений состояния моря традиционно используется изменчивость гидрометеорологических параметров среды. Ранее в обширном цикле работ (Гинзбург и др., 2004; Ginzburg et al., 2005; Гинзбург

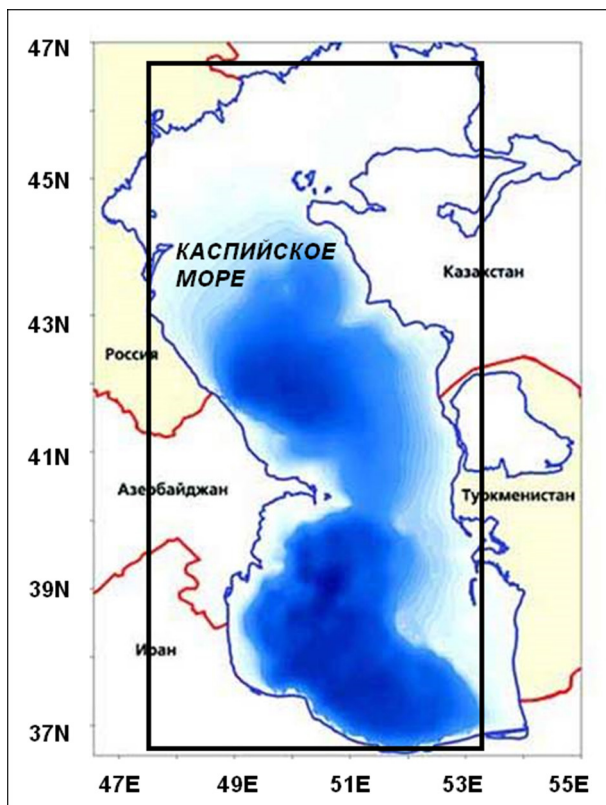


Рис. 1. Район исследования: черная рамка – область пространственного осреднения атмосферных параметров; темно-голубая заливка (глубоководная часть акватории Каспийского моря, ограниченная изобатой 100 м) – область пространственного осреднения температуры поверхности моря.

и др., 2012; Костяной и др., 2014; Гинзбург, Костяной, 2018; Kostianoy et al., 2019) были рассмотрены сезонная, межгодовая и долгопериодная изменчивость таких параметров среды в Каспийском море, как температура поверхности моря, ветер, уровень поверхности моря, протяженность ледяного покрова зимой в северной части моря и некоторых других в период 1982–2017 гг. Основное внимание в этих работах было обращено на линейные тренды изменчивости указанных параметров, и вопрос был детально исследован с представлением количественных оценок трендов на основе анализа различных баз данных. В цитированных выше работах также представлены исчерпывающие ссылки на результаты других авторов по данной теме.

Цель и новизна представленной работы состоят в смещении акцентов от расчета линейных трендов небольшого количества параметров на относительно коротких промежутках времени (15–25 лет) к исследованию долгопериодной изменчивости более широкого набора гидрометеорологических параметров среды в акватории Каспийского моря в течение более длительного периода времени (1948–2017 гг., то есть 70-ти лет). Задача состояла не столько в вычислении абсолютных значений линейных трендов (существенным образом зависящих от выбранного промежутка времени, длины ряда и используемых баз данных), сколько в сравнительном описании общих тенденций изменчивости гидрометеорологических параметров.

Резонно предположить, что в течение значительного промежутка времени (70 лет) параметры изменялись не линейно, а следуя возможным периодическим вариациям климата, что ставит вопрос о корректности использования линейных

трендов в качестве основной оценки долгопериодной изменчивости на таком длительном отрезке времени. Главный вызов состоял в обнаружении периодов с разнонаправленными тенденциями изменений параметров в пределах рассматриваемого временного интервала (1948–2017 гг.).

Данные

Рассмотренные в работе гидрометеорологические параметры среды разделены на термические (температура приповерхностного воздуха – ТПВ; температура поверхности моря – ТПМ), динамические (зональная компонента ветра – U ; меридиональная компонента ветра – V ; скорость ветра – $W = (U^2 + V^2)^{0.5}$; сюда же можно отнести и атмосферное давление на уровне моря – SLP (sea level pressure)) и связанные с влагосодержанием атмосферы (относительная влажность атмосферы – RH (relative humidity), удельная влажность атмосферы – SH (specific humidity), скорость выпадения осадков – PR (precipitation rate), общее влагосодержание атмосферы – PW (precipitable water)).

Среднемесячные значения указанных выше параметров за период 1948–2017 гг. по данным реанализа NCEP/NCAR получены на сайте <https://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/timeseries/timeseries1.pl>. Все атмосферные параметры были пространственно осреднены в пределах области, показанной на рис. 1 (черная рамка). Значения ТПМ были пространственно осреднены для глубоководной части Каспийского моря, ограниченной изобатой 100 м (рис. 1, темно-голубая заливка). Далее среднемесячные значения были осреднены за год и построены ряды среднегодовых значений рассматриваемых параметров за период 1948–2017 гг. Исключение составляет ТПМ, для которой данные доступны только с 1982 г. (начало регулярных спутниковых измерений ТПМ). Исходные ряды данных представлены на рис. 2–4, подтверждающих справедливость предположения о нелинейном характере изменчивости гидрометеорологических параметров. Далее для всех рядов были рассчитаны линейные тренды и полиномиальные аппроксимации 2–3 степени. Для сравнения с предыдущими работами были также рассчитаны тренды упомянутых в них параметров за период 1982–2017 гг. По порядку величины они, в целом, совпа-

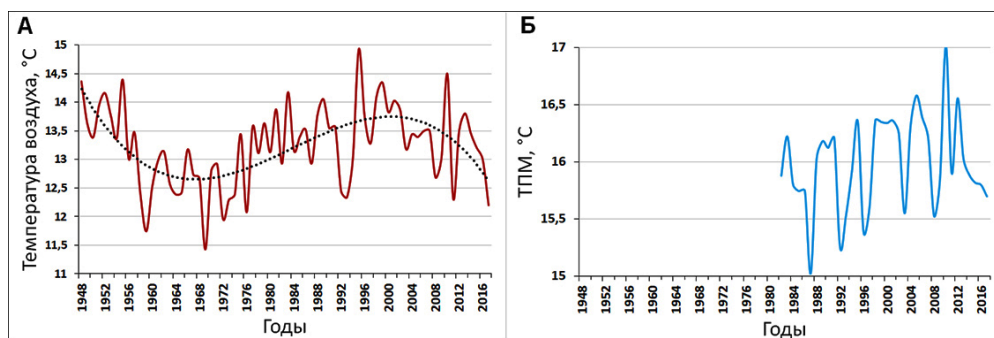


Рис. 2. Исходные ряды среднегодовых значений термических параметров среды в акватории Каспийского моря: (А) – ТПВ; (Б) – ТПМ. Точечная линия – полиномиальная аппроксимация.

ли с цитированными выше результатами работ Гинзбург и Костяного с соавторами (Гинзбург и др., 2004; Ginzburg et al., 2005; Гинзбург и др., 2012; Костяной и др., 2014; Гинзбург, Костяной, 2018; Kostianoy et al., 2019).

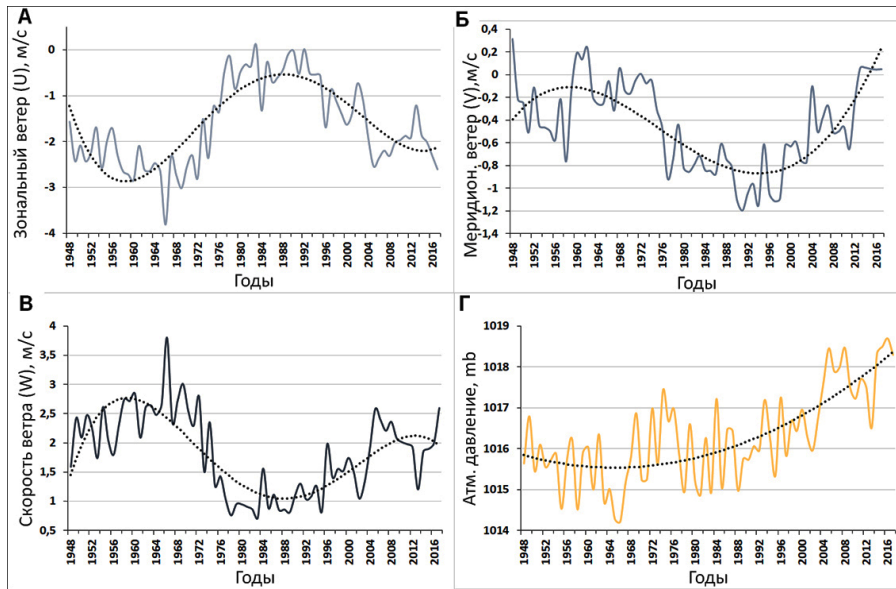


Рис. 3. Исходные ряды среднегодовых значений динамических параметров среды в акватории Каспийского моря: (А) – U ; (Б) – V ; (В) – W ; (Г) – SLP. Положительные/отрицательные значения скоростей соответствуют западному/восточному (А) и южному/северному (Б) ветрам. Точечные линии – полиномиальные аппроксимации.

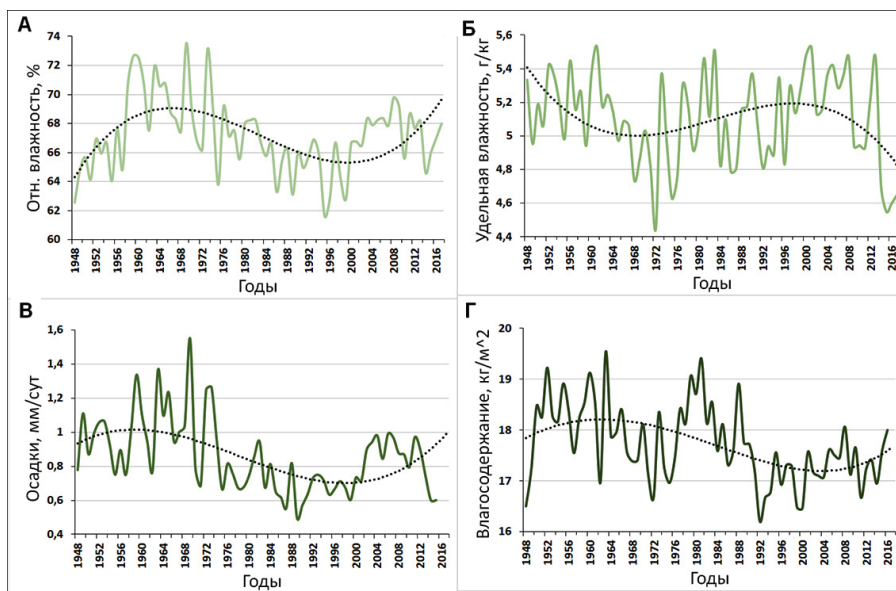


Рис. 4. Исходные ряды среднегодовых значений параметров среды, связанных с влагосодержанием атмосферы в акватории Каспийского моря: (А) – RH; (Б) – SH; (В) – PR; (Г) – PW. Точечные линии – полиномиальные аппроксимации.

Уравнения полиномиальных аппроксимаций рядов представлены в Таблице. Цветовое кодирование таблицы соответствует цветовому кодированию линий на рис. 2–4. Далее, для сопоставимости результатов, все ряды были нормализованы

следующим образом: $P_{\text{norm}} = (P - \mu) / \sigma$, где P_{norm} – нормализованный параметр, P – нормализуемый параметр, μ – среднее арифметическое распределения и σ – стандартное отклонение распределения. Для нормализованных рядов были рассчитаны линейные тренды и полиномиальные аппроксимации.

Таблица. Полиномиальные аппроксимации исходных рядов гидрометеорологических параметров в Каспийском море

Параметр	Полиномиальная аппроксимация
Температура приповерхностного воздуха (ТПВ), °C	$y = -0.0001x^3 + 0.0067x^2 - 0.1990x + 14.4223$
Зональный ветер (U), м/с	$y = 0.0005x^3 + 0.0262x^2 - 0.4146x - 0.8264$
Меридиональный ветер (V), м/с	$y = 0.0001x^3 - 0.0037x^2 + 0.0665x - 0.4581$
Скорость ветра (W), м/с	$y = 0.0004x^3 - 0.0206x^2 + 0.3274x + 1.1401$
Атмосферное давление на уровне моря (SLP), mb	$y = 0.0006x^2 - 0.0246x + 1015.7989$
Относительная влажность (RH), %	$y = 0.0002x^3 - 0.0224x^2 + 0.6336x + 63.681$
Удельная влажность (SH), г/кг	$y = 0.0017x^2 - 0.0495x + 5.4561$
Осадки (PR), мм/день	$y = -0.0010x^2 + 0.0183x + 0.9160$
Влагосодержание атмосферы (PW), кг/м ²	$y = 0.00001x^3 - 0.00216x^2 + 0.05789x + 17.79199$

Результаты

Линейные тренды

Линейные тренды нормализованных рядов рассматриваемых параметров представлены на рис. 5 (слева).

ТПВ (определяющий термический фактор) в среднем повышалась в рассматриваемый интервал времени (рис. 5А, красная линия). Ожидаемо повышалась и ТПМ (рис. 5А, голубая линия) в обеспеченный данными период, что соответствует результатам работ Гинзбург и Костяного с соавторами.

Как следует из рис. 3А и 3Б, при годовом осреднении над акваторией Каспийского моря преобладает режим северо-восточного атмосферного переноса. При этом зональная (восточная) компонента ветра превышает по величине меридиональную (северную) примерно в 5 раз. Зональная компонента ветра (U) демонстрирует положительный тренд (рис. 5В), что в реальности означает ее уменьшение. Напротив, тренд меридиональной компоненты ветра (V) отрицателен (рис. 5В), что означает ее усиление. Однако это усиление (в силу отмеченного выше существенного превышения значений U над V) не может компенсировать ослабление U , в результате чего наблюдается уменьшение скорости ветра (W) в рассматриваемый период (рис. 5В).

Все параметры, связанные с влагосодержанием атмосферы, демонстрируют отрицательный тренд (рис. 5Д), что может быть связано с общим повышением ТПВ (рис. 5А). При этом скорость выпадения осадков (PR) и влагосодержание атмосферы (PW) уменьшались существенно быстрее, чем удельная (SH) и относительная влажность (RH).

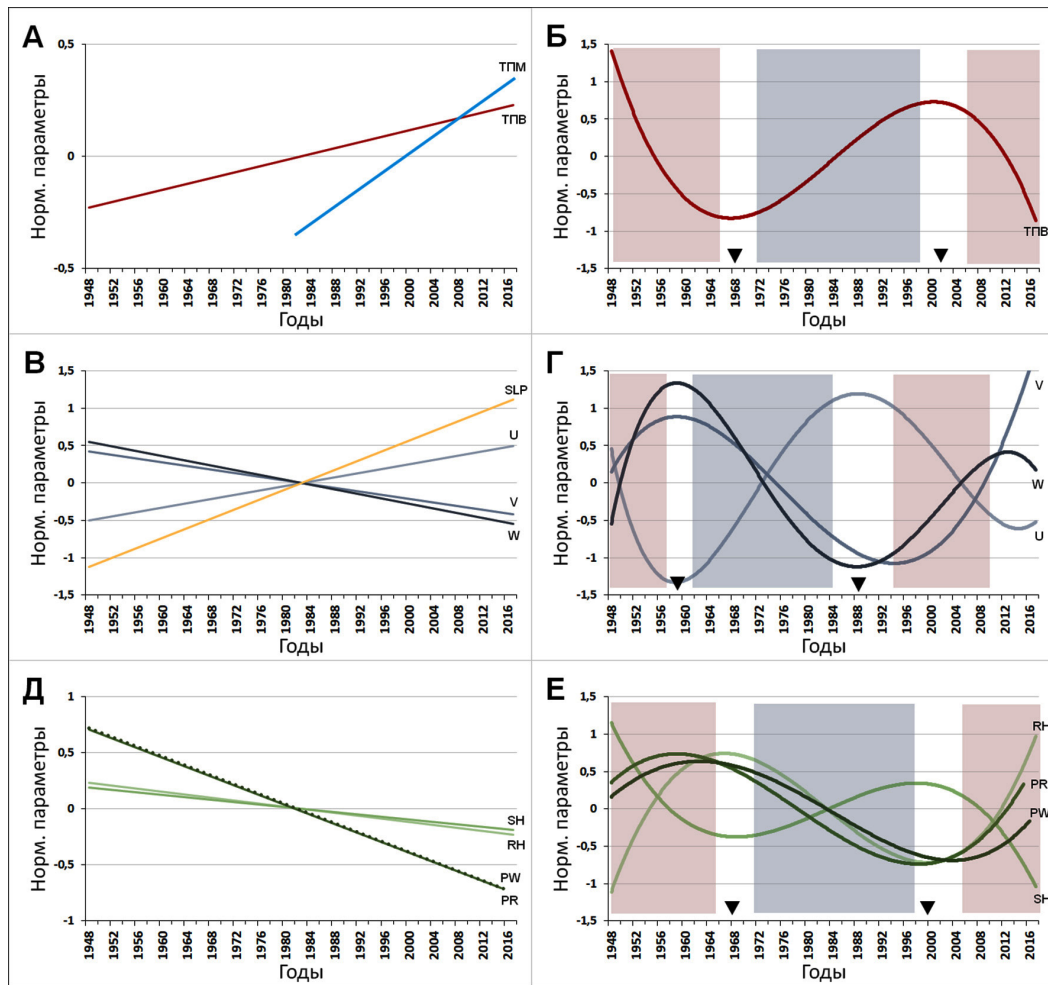


Рис. 5. Линейные тренды (слева) и полиномиальные аппроксимации (справа) нормализованных рядов гидрометеорологических параметров среды в акватории Каспийского моря: (А, Б) – термических (ТПВ, ТПИ); (В, Г) – динамических (U , V , W , SLP); (Д, Е) – связанных с влагосодержанием атмосферы (RH, SH, PR, PW). Цветовое кодирование линий соответствует рис. 2–4 и таблице. Цветная прямоугольная заливка маркирует периоды увеличения/уменьшения соответствующих параметров. Черные треугольники у оси абсцисс отмечают годы максимумов/минимумов соответствующих параметров.

Полиномиальные аппроксимации

Результаты анализа долгопериодной изменчивости рассматриваемых параметров с помощью полиномиальных аппроксимаций, представленные на рис. 5 (справа), подтверждают нелинейный характер и наличие периодичности их изменений. Обнаруживаются три временных интервала продолжительностью в среднем 10–25 лет с разнонаправленными тенденциями изменения гидрометеорологических параметров.

Так, ТПИВ уменьшалась в период 1948–1965 гг., увеличивалась в 1972–1998 гг. и вновь уменьшалась в 2005–2017 гг. (рис. 5Б). Минимальные и максимальные значения ТПИВ, отмеченные черными треугольниками у оси абсцисс (рис. 5Б), наблюдались в 1968 г. и 2002 г. соответственно. Это вызывает вопрос о корректно-

сти использования линейных трендов для оценки изменчивости параметров за весь период 1948–2017 гг.

Что касается динамических параметров, V и W усиливались, а U ослабевала в 1948–1958 гг. (рис. 5Г). Далее, в 1962–1984 гг., наблюдались противоположные тенденции ослабления V и W и усиления U . Эти тенденции вновь сменилась на обратные (усиление V и W и ослабление U) в 1994–2010 гг. (усиление V продолжалось до конца срока наблюдений). Максимумы/минимумы U , V , и W зафиксированы в 1959 г. и 1989 г. Интересно, что атмосферное давление на уровне моря (SLP), условно относящееся к динамическим параметрам, не обнаружило такой периодичности и оставалось на более или менее постоянном уровне до середины 1970-х гг. и далее устойчиво возрастало (рис. 3Г). Результатом этого явился зафиксированный максимальный среди динамических параметров положительный линейный тренд SLP (рис. 5В).

Значения параметров, связанных с влагосодержанием атмосферы (за исключением удельной влажности), увеличивались, уменьшались и вновь увеличивались в 1948–1965 гг., 1972–1998 гг. и 2006–2017 гг. соответственно (рис. 5Е). Удельная влажность (SH) изменялась противоположным образом. Максимумы/минимумы RH, SH, PR и PW наблюдались в 1968 г. и 2000 г.

Наиболее интересный результат анализа наблюдений состоит в том, что смена режима ветра происходила на 10–12 лет раньше изменения термического и влажностного режимов (рис. 5, справа, черные треугольники у осей абсцисс). Это позволяет предполагать ведущую роль климатических вариаций крупномасштабного атмосферного форсинга в изменчивости гидрометеорологических характеристик в акватории Каспийского моря.

Заключение

В работе представлено описание долгопериодной изменчивости термических, динамических и влажностных параметров среды в акватории Каспийского моря в период 1948–2017 гг. на основе анализа линейных трендов и полиномиальных аппроксимаций рядов исходных данных. Показано, что в связи с периодичностью вариаций параметров линейные тренды не могут служить адекватной оценкой их изменчивости на таком промежутке времени (70 лет). Установлена периодичность вариаций гидрометеорологических параметров и выявлено три временных интервала продолжительностью в среднем 10–25 лет с разнонаправленными тенденциями их изменений. Обнаружено, что смена режимов ветра происходила на 10–12 лет раньше изменений термического и влажностного режимов. Это позволяет предполагать ведущую роль долгопериодных вариаций крупномасштабных атмосферных процессов в изменчивости термических и влажностных параметров в акватории Каспийского моря.

Во второй части работы будет представлен анализ возможных связей описанной выше долгопериодной изменчивости гидрометеорологических параметров среды в акватории Каспийского моря с долгопериодными вариациями крупномасштабного атмосферного форсинга.

Казьмин А.С.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (тема № 0149-2019-0004).

Литература

- 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.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Шеремет Н.А.* Долговременная изменчивость температуры поверхности Каспийского моря (1982-2009 гг.) // *Современные проблемы дистанционного исследования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 2. С. 262–269.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г.* Межгодовая изменчивость температуры поверхности Каспийского моря в современный период (2003-2017 гг.) // *Вестник Тверского университета. Серия «География и геоэкология»*. 2019. № 3. С. 57–65.
- 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. Федеральная служба по Гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет)*. В.М. Катцов, С.М. Семенов (ред.). М.: ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН», 2014. С. 644–683.
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A.* Sea Surface Temperature Variability // *The Caspian Sea Environment*. Kostianoy A.G., Kosarev A.N. (eds): *The Handbook of Environmental Chemistry*. Springer-Verlag GmbH. 2005. Vol. 5. P. 59–81.
- Kostianoy A.G., Ginzburg A.I., Lavrova O.Y., Lebedev S.A., Mityagina M.I., Sheremet N.A., Soloviev D.M.* Comprehensive Satellite Monitoring of Caspian Sea Conditions // *Barale V., Gade M. (eds): Remote Sensing of the Asian Sea*. Springer, Cham. 2019. P. 505–521.
- Shiganova T.A., Dumont H.J., Sokolsky A.F., Kamakin A.M., Tinenkova D., Kurasheva E.K.* Population dynamics of *Mnemiopsis leidyi* in the Caspian Sea, and effects on the Caspian ecosystem // *Dumont H., Shiganova T.A., Niermann U. (eds): Aquatic Invasions in the Black, Caspian, and Mediterranean Seas*. Nato Science Series IV: Earth and Environmental Sciences. Springer, Dordrecht. 2004. V. 35. P. 71–111.

LONG-TERM VARIABILITY OF THE HYDRO-METEOROLOGICAL PARAMETERS IN THE CASPIAN SEA. PART 1: DATA DESCRIPTION

Kazmin A.S.

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36,
Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117997, Russia, e-mail: akazmin@ocean.ru
Submitted 16.05.2019, accepted 13.12.2019*

NSEP/NCAR reanalysis data for the period of 1948–2017 were used for description of the long-term variability of the hydro-meteorological parameters in the Caspian Sea (surface air temperature, sea surface temperature, wind, relative and specific humidity, precipitation rate, precipitable water). Linear trends and polynomial approximations of these parameters are presented. The latter show the nonlinear nature and periodicity of the parameters' variability. Three time spans of 10–25 years duration with multidirectional trends of hydrometeorological parameters have been identified. The switch of wind regimes occurred 10–12 years earlier than

the change of thermal and humidity regimes, which suggests the leading role of the long-term variations of the large-scale atmospheric forcing in the variability of hydrometeorological parameters in the Caspian Sea.

Keywords: hydro-meteorological parameters; long-term variability; linear trends; polynomial approximations; Caspian Sea

References

- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., and Sheremet N.A. Seasonal and interannual variability of the surface temperature in the Caspian Sea. *Oceanology*, 2004, Vol. 44(5), pp. 605–618.
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., and Sheremet N.A. Sea Surface Temperature Variability. The Caspian Sea Environment. Kostianoy A.G. and Kosarev A.N. (eds): The Handbook of Environmental Chemistry, Springer-Verlag GmbH., 2005, Vol. 5, pp. 59–81.
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., and Sheremet N.A. Dolgovremennaya izmenchivost' temperatury poverhnosti Kaspijskogo morya (1982–2009 gg.) (Long-term variability of the surface temperature of Caspian Sea (1982–2009)). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 262–269.
- Ginzburg A.I. and Kostianoy A.G. Mezhgodovaya izmenchivost' temperatury poverhnosti Kaspijskogo morya v sovremennyj period (2003–2017 gg.) (Interannual variability of the Caspian Sea surface temperature in the current period (2003–2017)). *Vestnik Tverskogo universiteta. Seriya «Geografiya i geoekologiya»*, 2018, Vol. 3, pp. 57–65.
- Kostianoy A.G., Ginzburg A.I., Lebedev S.A., and Sheremet N.A. Yuzhnye morya Rossii. Vtoroj ochenyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii. Federal'naya sluzhba po Gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchej sredy (Rosgidromet). V.M. Katcov, S.M. Semenov (red.) (Southern seas of Russia. Second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Federal service for Hydrometeorology and environmental monitoring (Roshydromet). V.M. Kattsov, S.M. Semenov (eds).) Moskva: FGBU «IGKE Rosgidrometa i RAN», 2014, pp. 644–683.
- Kostianoy A.G., Ginzburg A.I., Lavrova O.Y., Lebedev S.A., Mityagina M.I., Sheremet N.A., and Soloviev D.M. Comprehensive Satellite Monitoring of Caspian Sea Conditions. Barale V. and Gade M. (eds): Remote Sensing of the Asian Sea. Springer, Cham, 2019, pp. 505–521.
- Shiganova T.A., Dumont H.J., Sokolsky A.F., Kamakin A.M., Tinenkova D., and Kurasheva E.K. Population dynamics of *Mnemiopsis leidyi* in the Caspian Sea, and effects on the Caspian ecosystem. Dumont H., Shiganova T.A. and Niermann U. (eds): Aquatic Invasions in the Black, Caspian, and Mediterranean Seas. Nato Science Series IV: Earth and Environmental Sciences. Dordrecht: Springer, 2004, Vol. 35 pp. 71–111.