

**ON CORRELATION OF THE ICE COVER OF THE EUROPEAN SECTOR OF THE ARCTIC WITH SURFACE HEIGHTS OF THE ATLANTIC INNER SEAS (AS SHOWN FOR THE BLACK SEA)**

*A. V. Kholoptsev<sup>1, 2\*</sup>, S. A. Podporin<sup>2</sup>, N. K. Kononova<sup>3</sup>*

<sup>1)</sup> Sevastopol Branch of State Oceanographic Institute named after N.N. Zubov, 61, Sovetskaya str., 299011, Sevastopol, Russia; \*kholoptsev@mail.ru

<sup>2)</sup> Sevastopol State University, 33, Universitetskaya str., 299053, Sevastopol, Russia

<sup>3)</sup> Institute of Geography RAS, 29, Staromonetnyi, 109017, Moscow, Russia

[kholoptsev@mail.ru](mailto:kholoptsev@mail.ru)

**Citation:** Kholoptsev A.V., 2020. On correlation of the ice cover of the European sector of the Arctic with surface heights of the Atlantic inner seas (as shown for the Black Sea) // Environmental dynamics and global climate change. V. 13. N.1. P. 4-14.

**DOI:** [doi.org/10.18822/edgcc34237](https://doi.org/10.18822/edgcc34237)

*Цель работы – проверка адекватности выдвинутой авторами гипотезы, согласно которой связь между переменами климата Арктики и многолетним ходом среднего уровня водной поверхности некоторых внутренних морей Атлантики является статистически значимой. Для достижения поставленной цели изучены связи многолетних вариаций суммарного объема ледяного покрова Европейского сектора Арктики с динамикой среднего уровня водной поверхности внутренних морей Атлантического океана, которые происходили в 1979–2018 гг. Как фактический материал использованы результаты глобальных реанализов изменений толщины и сплоченности ледяного покрова, а также уровня различных участков акватории Мирового океана. Среди внутренних морей Атлантики выявлены те, для которых рассматриваемая гипотеза является адекватной. Для таких морей предложен прогноз многолетних изменений их уровня в XXI веке для сценария, при котором дальнейшее усиление факторов потепления климата, а также снижение до 2060–2070 гг. среднего за 11 лет уровня солнечной активности будут приводить к увеличению суммарного объема ледяного покрова Европейского сектора Арктики.*

**Ключевые слова:** Черное море, Европейский сектор, Арктика, уровень, атмосферная циркуляция, ледовитость, реанализ.

**Keywords:** Black Sea, European sector, Arctic, sea level, atmospheric circulation, ice cover

**SUMMARY**

An urgent problem of physical geography, oceanography and climatology is the improvement of methods for modeling long-term changes in the average water surface level (hereinafter referred to as AWSL) of the World Ocean regions. Its solution involves the development of existing concepts about the relationship of these changes with other natural processes. The solution of this problem is of greatest importance for the regions of the World Ocean, on the coasts of which there are large cities and ports. The inland seas of the Atlantic Ocean: Baltic, Mediterranean, Azov and Black seas take an important place among them.

It is known that among the most important factors of the year to year variability of the AWSL for such seas are the processes affecting the dynamics of their water balance, which are studied in the works of many domestic and foreign authors. They found that the dynamics of the water balance of the seas under consideration depends on the average intensity of precipitation and evaporation in their basins, which are caused by the corresponding changes in the total duration of atmospheric blockings (hereinafter referred to as TAB).

The Arctic air entering the Europe area in the course of its incursions, as well as the air in the rear of the cyclones moving above Europe to the Arctic contributes to the occurrence of blockings. The characteristics of this air are largely determined by the peculiarities of its interaction with the atmosphere of the ice cover of the corresponding Arctic water areas, which depend on its total volume (hereinafter referred to as TVI). Consequently, the long-term sequence of the average annual values of the AWSL for each of the

seas under consideration can be, to some extent, associated with variations in the average annual values of the TVI in the waters of the European sector of the Arctic. AWSL may also be affected by warming of the regional climate, which causes the thermal expansion of the active layer of the sea and its average surface temperature (hereinafter AST).

Considering this, the authors put forward a hypothesis that the relationship between the TVI variations, characterizing the climate changes in the Arctic, and the long-term course of AWSL is statistically significant for some of the studied seas. Confirmation of its adequacy would allow taking into account such relationships when modeling the dynamics of the AWSL of these seas, as well as planning economic activities on their coasts. However, this hypothesis has not been verified before.

**The subject** of study in this paper is the statistical relationships of the long-term course of the average annual values of the AWSL for the Black Sea, the TVI of the Arctic waters located in the European area, as well as TAB, which occur in this area.

The **purpose** of the work is to verify the adequacy of the proposed hypothesis.

**The factual material** used in the study of the long-term course of the average annual values of the AWSL for the Black Sea is the results of its mathematical modeling obtained by the ICDC (Integrated Climate Data Center) of the University of Hamburg, Germany. The information about the changes in AST is obtained from the GLORYS12.v1 (Global Ocean Physics Reanalysis) reanalysis maintained by Copernicus.

To confirm the adequacy of the specified factual material, it is compared with the archival information obtained during contact measurements at some points of Odessa, Ochakov, Sevastopol, Evpatoria, Feodosia, Kerch, Anapa, Novorossiysk, Gelendzhik and Sochi.

The information on the long-term course of the average annual TVI values in the waters of the European sector of the Arctic was obtained using information on variations in the average monthly values of the ice cover thickness and its concentration, which is also presented in the ICDC modeling results and the mentioned reanalysis.

When assessing the average annual values of TAB in the European sector of the Northern Hemisphere, we applied the typification of macrocirculatory processes in the Northern hemisphere according to B.L. Dzerdzhevsky.

The **research methodology** involved the implementation of spectral analysis for the time series of the average annual values of the AWSL, which allowed us to determine the periods of the high-frequency modes of this process. When determining the average rate of each such process, it was smoothed over a time equal twice to the period of the longest period of the identified modes, after which the identified trend was equalized. The study of statistical relationships between the time series of the average annual values AWSL for the Black Sea, as well as TVI and TAB for the European sector of the Arctic, was carried out using the method of correlation analysis and Student's t-test. The significance of the statistical relationships between the time series of the AWSL, TAB and TVI was estimated with shifts between them in time from 0 to 3 years and for the periods from 1979 to 2018, as well as from 1993 to 2018. The decision on the adequacy of the proposed hypothesis was to be made if the reliability of the statistical conclusion about the significance of the correlation of the considered time series was at least 0.95.

**As a result of the research** we tested the factual material and confirmed its adequacy. Considering the results of the spectral analysis, the smoothing of the considered time series when identifying their trends was carried out in a sliding window 11 years long. It has been established that, in the mean, the average annual values of the Black Sea AWSL increased at the rate of 0.048 m/year, and the average annual values of its AST increased at the average rate of 0.037°C/year over the period from 1979 to 2018, which confirms the warming of the regional climate.

During the period 2010-2018 the rate of AST growth increased, which could have led to a relevant increase in the AWSL, but actually it didn't. The latter is confirmed by the presented distributions of the average rate of rise in the level of various sections of the Black Sea surface. Consequently, the factor that counteracts the increase in AWSL has increased.

Such factors could include a decrease in the annual amounts of atmospheric precipitation, as well as an increase in the intensity of evaporation in the Black Sea basin, which was associated with ongoing changes in the TAB.

The analysis of the trends in the TVI change in the European sector of the Arctic showed that in the period from 1993 to 2018 the value of this indicator decreased significantly, but in 2010-2018, it changed at a fixed level. The statistical relationships of interannual changes in the average annual values of the Black Sea AWSL, as well as the TVI in the waters of the European sector of the Arctic in the period under review, were statistically significant if the changes in the AWSL were lagging relative to the TVI variations by 1

year. In this case, these changes occur in phase. The significance of the relationship between the changes in AWSL and the variations in TVI is also maximum at the specified time shift. Therefore, the adequacy of the proposed hypothesis is confirmed.

**When discussing** the obtained results, we noted their compliance with the existing concepts about the causes of changes in the AWSL of the seas. The revealed relationships show that TVI variations in the European sector of the Arctic really affect the formation of blockings over the basins of the Black, Azov and Baltic Seas, and are also able to determine the dynamics of their water balances, and hence their AWSL.

The obtained results allow us to generalize the concept proposed by L.S. Berg for the Caspian Sea on the dependence of long-term changes in its level on climate variations in the Arctic and on the mentioned seas of the Atlantic Ocean. During the periods of time when the climate is warming in the Arctic and the TVI decreases, evaporation increases in the basins of these seas, and the average intensity of precipitation decreases.

It should be noted that this dependence is weaker for the seas under consideration than for the Caspian Sea, since they are not isolated from the Atlantic Ocean and the water exchange factor is significant.

The revealed relationships suggest that further changes in the levels of the Atlantic inland seas in the 21st century will depend to some extent on variations in the TVI of the European Arctic water areas and their climate. Modern changes in its TVI are the result of a confrontation between the factors that contribute to warming and cooling of the climate in this region.

As can be seen from the obtained results, a decrease in TVI in the European sector is no longer observed in the period after 2006, although before 2006 warming factors clearly prevailed there. Consequently, now the values of the resultant factors of warming and cooling of the Arctic climate change at a fixed level.

Since it is impossible to predict further changes in climate warming and cooling factors, future variations in the levels of the inland seas of the Atlantic are not predetermined, although the justification of forecasts of some of their components can probably be satisfactory if factors invariant to the uncertainties of the scenario of further climate changes are considered when developing them.

## ВВЕДЕНИЕ

Средний уровень водной поверхности (далее – СУВП) любого региона Мирового океана во многом определяет условия жизнедеятельности населения и особенности развития ландшафтов его побережий. Поэтому совершенствование методик моделирования его многолетних изменений, а также изучение их связей с другими природными процессами является актуальной проблемой физической географии, океанографии и климатологии. Наибольший интерес решение данной проблемы представляет для регионов Мирового океана, на побережьях которых ведется активная хозяйственная деятельность, а также размещены крупные города и порты. Важное место среди них занимают внутренние моря Атлантического океана: Балтийское, Средиземное, Азовское и Черное.

Согласно современным представлениям о процессах, формирующих многолетнюю изменчивость СУВП того или иного океанического региона, [Каплин с соавт., 1991, Добровольский, 2003, Mörner, 2012, Nerem с соавт., 2018], к числу важнейших относятся факторы, которые влияют на динамику водного баланса, а также вариации средней температуры его поверхностных вод [Добровольский, 2003]. В полной мере это относится и к рассматриваемым морям, репрезентативным примером которых является Черное море.

Впервые на наличие многолетних изменений СУВП подобных водоемов обратил внимание академик П.С. Паллас, который предположил, что уровень Каспийского моря изменяется с периодом, близким к 30–35 годам. Справедливость этой гипотезы в 1890 г. подтвердил Э.А. Брюкнер. А.И. Воейков и М.А. Боголепов в начале XX века выявили 33-летние циклы Брюкнера в изменениях климата многих регионов мира.

Изучая многолетний ход характеристик климата некоторых регионов Северного полушария, Л.С. Берг впервые установил, что на вариации уровня Каспия влияют перемены климата Арктики [Берг, 1934].

А.В. Шнитников показал, что циклы с подобными периодами проявляются в изменениях общей увлажненности материков Северного полушария, в том числе и в изменениях водных балансов его водных объектов [Шнитников, 1957].

Динамика водного баланса каждого водоема зависит от вариаций распределений в его бассейне годовых сумм атмосферных осадков, а также средней интенсивности испарения, которые вызваны

соответствующими переменными характеристиками атмосферной циркуляции, доставляющей и уносящей из него влагу [Черенкова с соавт., 2015]. Поэтому значимую роль в многолетних изменениях водных балансов рассматриваемых морей могут играть вариации суммарной продолжительности вторжений в соответствующие регионы Северного полушария арктического воздуха [Дзердзеевский, 1968], которые участвуют в образовании блокингов [Мохов с соавт., 2013]. В формировании блокингов может участвовать также арктический воздух, который проникает в умеренные широты в тылу циклонов, которые перемещаются в Арктику. В формировании обоих процессов участвует Арктический антициклон, состояние которого во многом определяется особенностями взаимодействия с атмосферой ледяного покрова соответствующих акваторий Арктики [Думанская и Федоренко, 2008], которые зависят от его суммарного объема (далее – СОЛ).

Вследствие расположения бассейнов изучаемых морей, в блокирующих процессах, которые могут возникать над ними, может принимать участие арктический воздух, сформировавшийся в Европейском секторе Арктики (0–60° в.д.) [Дзердзеевский, 1968]. Поэтому многолетний ход среднегодовых значений СУВП каждого из них может быть в той или иной мере связан с вариациями среднегодовых значений СОЛ акваторий Европейского сектора Арктики. Не противоречит ранее установленным фактам гипотеза, согласно которой связь между переменными климата Арктики и многолетним ходом СУВП является статистически значимой не только для Каспия, но и для некоторых внутренних морей Атлантики. Подтверждение ее адекватности позволило бы учесть подобные связи при моделировании динамики СУВП таких морей, а также планировании хозяйственной деятельности на их побережьях. Тем не менее, ранее проверка данной гипотезы не осуществлялась, поскольку оценки СУВП того или иного моря по данным о значениях его уровня в отдельных пунктах его побережья весьма неточны. Следовательно, ее проверка на примере Черного моря представляет не только теоретический, но и практический интерес.

Цель данной работы – проверка адекватности выдвинутой гипотезы. Для ее достижения проанализирован многолетний ход среднегодовых значений СУВП Черного моря, СОЛ акваторий Арктики, расположенных в Европейском секторе, а также суммарная продолжительность блокингов, которые соответствуют Европейскому сектору, и изучены статистические связи между этими процессами.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При изучении многолетнего хода среднегодовых значений СУВП Черного моря в качестве фактического материала использована информация об изменениях уровня различных участков его акватории, которая получена при его контактных и дистанционных измерениях, а также результаты математического моделирования.

Впервые систематические наблюдения над изменениями уровня Черного моря начались в 1858 г. на уровневых постах Констанца и Сулина (Румыния). С 1974 г. такие наблюдения начали осуществляться также в Очакове, с 1875 г. – в Одессе и Севастополе (Российская империя), с 1881 г. в Варне (Болгария). Наибольшее количество уровневых постов на побережье Черного моря функционировало в 60–70-х годах XX века, но и в XXI веке здесь продолжают вести наблюдения 34 уровневых поста. Из них 16 принадлежат России, 6 – Украине, 4 – Болгарии, по 3 – Румынии и Турции, 2 – Грузии. На большей части этих постов измерения ныне выполняются с применением мареографов, вследствие чего абсолютные погрешности полученных ими данных составляют приблизительно 1 см. Так как уровневых постов мало и расположены они весьма неравномерно, оценки СУВП Черного моря, основанные на такой информации, высокой точностью не обладают [Иванов и Кондратьев, 1970].

Дистанционные измерения уровня различных участков акватории Черного моря с 1993 г. выполняются с использованием радиолокационной альтиметрии [Гансвинд, 2017]. В подобных исследованиях в разные годы были задействованы искусственные спутники Земли Seasat, Geosat, ERS-1, 2, TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2, Jason-3 и Envisat, абсолютные координаты которых в моменты измерений контролировались с помощью спутниковой системы глобального позиционирования GPS [Сведения об ИСЗ].

Применяемые на спутниках радиолокационные высотомеры обладали различной точностью (от 2 до 6 см). Измерения уровня моря проводятся лишь в пунктах его акватории, через которые проходят треки спутников, и лишь в моменты времени, когда спутники располагаются над ними.

Абсолютные погрешности подобной спутниковой информации от времени практически не зависят, но для разных участков акватории они заметно различаются [Кубряков и Станичный, 2009].

Наиболее достоверную оценку СУВП Черного моря (как и любого другого региона Мирового океана) для некоторого момента времени можно получить, усредняя по его поверхности соответствующие результаты реанализа динамики конфигурации его водной поверхности. Подобные результаты получают с применением гидродинамических моделей этого процесса, которые верифицированы по результатам фактических измерений, полученных с применением наземных или спутниковых методов.

К числу наиболее точных глобальных реанализов изменений конфигурации поверхности Мирового океана, полученных с применением информации от различных уровневых постов на его побережьях, относится ICDC (Integrated Climate Data Center), который поддерживается Объединенным центром климатических данных Гамбургского университета [Zuo с соавт., 2017]. Указанный реанализ содержит сведения о среднемесячных значениях уровня Мирового океана, поверхностных температур, сплоченности и толщины льда в узлах координатной сетки с шагом 13 км за период с января 1979 по декабрь 2018 гг.

При верификации моделей, применяемых для осуществления реанализа ICDC, использованы данные от 1700 уровневых постов, которые входят в состав Глобальной Системы Наблюдений за Уровнем Моря GLOSS (Global Sea Level Observing System). Такие данные содержатся в банке данных постоянной службы по среднему уровню моря (PSMSL) [банк данных PSMSL].

Из всех уровневых постов на северном побережье Черного моря в данную систему входят только два (Ялта и Туапсе). Поэтому для подтверждения адекватности результатов реанализа ICDC для этого моря выполнено их сравнение с информацией, полученной в пунктах Одесса, Очаков, Севастополь, Евпатория, Феодосия, Керчь, Анапа, Новороссийск, Геленджик и Сочи.

Информация о среднемесячных значениях уровня и поверхностной температуры Черного моря за весь период наблюдений, соответствующая уровневым постам России, получена с портала ЕСИМО [Материалы ЕСИМО]. Аналогичная информация для уровневых постов Украины за период до 2014 г., получена из архива Севастопольского отделения ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова» (далее – СОГОИН).

Результаты математического моделирования изменений среднемесячных температур водной поверхности Черного моря, которые соответствуют всем узлам координатной сетки реанализа ICDC, расположенным в пределах его акватории, использованы при определении среднегодовых значений средних температур его поверхностных вод (далее – СПТ). Для подтверждения адекватности оценок СУВП и СПТ Черного моря, полученных таким образом, многолетний ход этих показателей сопоставлен с аналогичными зависимостями, основанными на результатах дистанционных измерений. Подобные зависимости получены с применением реанализа GLORYS12V1 (Global Ocean Physics Reanalysis) [База данных GLORYS12V1].

Указанный реанализ получен с использованием спутниковой информации и океанической модели NEMO. Данные реанализа характеризуются разрешением по времени 1 сутки, а по координатам – 5 угловых минут. Для уменьшения дисперсии ошибок моделирования в GLORYS12V1 применен фильтр Калмана, что делает его одним из наиболее совершенных глобальных реанализов вариаций конфигурации уровня Мирового океана и его поверхностных температур.

Значения СУВП и СПТ для того или иного года вычислялись путем усреднения по акватории моря и по времени значений соответствующих характеристик, которые представлены в каждом из упомянутых реанализов для всех узлов их координатной сетки. Многолетний ход среднегодовых значений уровня моря в каждом узле подвергнут спектральному анализу (Фурье), что позволило определить периоды высокочастотных мод этого процесса. При определении средней скорости каждого такого процесса произведено его сглаживание за время, равное удвоенному периоду наиболее длиннопериодной из выявленных мод, после чего вычислен угловой коэффициент линейного тренда полученного результата. Распределение по акватории Черного моря средних скоростей повышения среднегодового уровня того или иного ее участка отображено с использованием метода триангуляции Делоне [Скворцов и Мирза, 2006].

При изучении многолетнего хода среднегодовых значений СОЛ акваторий Европейского сектора Арктики использована информация о среднемесячных значениях толщины ледяного покрова  $H$  и его сплоченности (ледовитости)  $L$ , которая также представлена в реанализе ICDC.

Значения СОЛ, которые соответствуют некоторому году, вычислялись с учетом всех узлов координатной сетки данного реанализа, которые расположены в Европейском секторе Арктики, как:

$$\text{СОЛ} = \sum_{i=1}^N S_i l_i h_i,$$

где  $l_i$  и  $h_i$  – значения среднегодовых  $L$  и  $H$  в узлах координатной сетки реанализа ICDC, которые расположены в вершинах  $i$ -й ячейки этой сетки;  $S_i$  – площадь ячейки, составляющая 169 км<sup>2</sup>.

При оценке среднегодовых значений СПБ применена типизация макроциркуляционных процессов в Северном полушарии по Б.Л. Дзердзеевскому [Дзердзеевский, 1968]. Значения годовых СПБ для Европейского сектора вычислялись как сумма годовой продолжительности действия элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ), при которых происходят вторжения в бассейны изучаемых морей арктического воздуха и его вхождения в тылу южных циклонов.

К ЭЦМ, при которых в Европейском секторе возникают блокинги, относятся 4а, 4б, 4в, 10а, 10б. Вхождения арктического воздуха в тылу южных циклонов образуются при действии ЭЦМ 8а, 8бз, 8бл, 12а, 12бз, 12вз. Информация о значениях годовой продолжительности действия перечисленных ЭЦМ получена из [Колебания циркуляции].

Изучение статистических связей между временными рядами среднегодовых значений СУВП Черного моря, а также СОЛ и СПБ для Европейского сектора Арктики, осуществлено с применением метода корреляционного анализа.

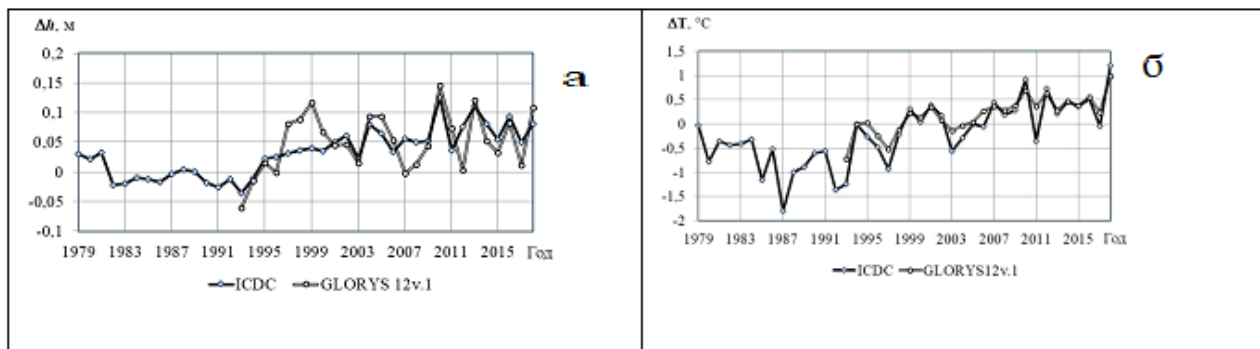
Учитывалось, что изменения СОЛ и СПБ способны влиять на вариации годовых сумм осадков в бассейне моря непосредственно, в то время как последние всегда опережают многолетний ход его СУВП на характерное время стока впадающих в него рек. Вследствие происходящих перемен климата, характеристики связей между упомянутыми процессами на разных отрезках времени могут различаться. Поэтому характеристики связей между временными рядами СУВП, СПБ и СОЛ оценивались при сдвигах между ними по времени от 0 до 3 лет и за периоды 1979–2018 гг., а также за 1993–2018 гг. Значимость корреляции данных временных рядов оценена по критерию Стьюдента с учетом их степеней свободы. Перед осуществлением корреляционного анализа во всех сопоставляемых рядах скомпенсированы линейные тренды, коэффициенты которых оценены по методу наименьших квадратов [Айвазян и Мхитарян, 1998]. Предполагалось, что выдвинутая гипотеза адекватна, если достоверность статистического вывода о значимости корреляции рассматриваемых временных рядов составляет не менее 0.95.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Сопоставление результатов реанализа ICDC, описывающих изменения уровня и поверхностных температур Черного моря в 1979–2018 гг., с данными фактических измерений, полученных с портала ЕСИМО и из архива СОГОИН, показало, что статистический вывод о значимости связи между ними характеризуется достоверностью (по критерию Стьюдента) не ниже 0.95. Поэтому информация из упомянутого реанализа использована как фактический материал. Основываясь на ней, с использованием изложенной методики, для каждого года периода 1979–2018 гг. вычислены среднегодовые значения СУВП и СПТ Черного моря. Аналогичные вычисления для каждого года из периода 1993–2018 гг. повторены с использованием соответствующей информации из реанализа GLORYS12V1. Полученные при этом зависимости от времени оценок аномалий среднегодового значения СУВП Черного моря ( $\Delta h$ ) и его СПТ ( $\Delta T$ ), вычисленных относительно 1994 г., представлены на рисунке 1.

Из рисунка 1а видно, что многолетний ход аномалии среднегодового значения СУВП Черного моря, который оценен по данным реанализов ICDC и GLORYS12V1, представляет собой сложное колебание. В его спектре присутствует мода с периодом 2.85 года. Её период практически совпадает с периодом квазидвухлетнего колебания [Хайрулина и Астафьева, 2011]. Характер рисунка позволяет предположить, что в спектре изменчивости СУВП присутствует также низкочастотная мода с периодом, близким к 33 годам. Из него очевидно подобие зависимостей от времени оценок среднегодовых значений СУВП Черного моря, которые получены по результатам реанализов ICDC и GLORYS12V1. Значение коэффициента корреляции соответствующих временных рядов за период 1993–2018 гг. составляет +0.694 (что при числе степеней свободы 26 значительно превосходит выбранный уровень значимости). Последнее свидетельствует об адекватности результатов обоих реанализов и подтверждает справедливость основанных на них выводов об особенностях изучаемого процесса. Учитывая результаты спектрального анализа, сглаживание рассматриваемых временных

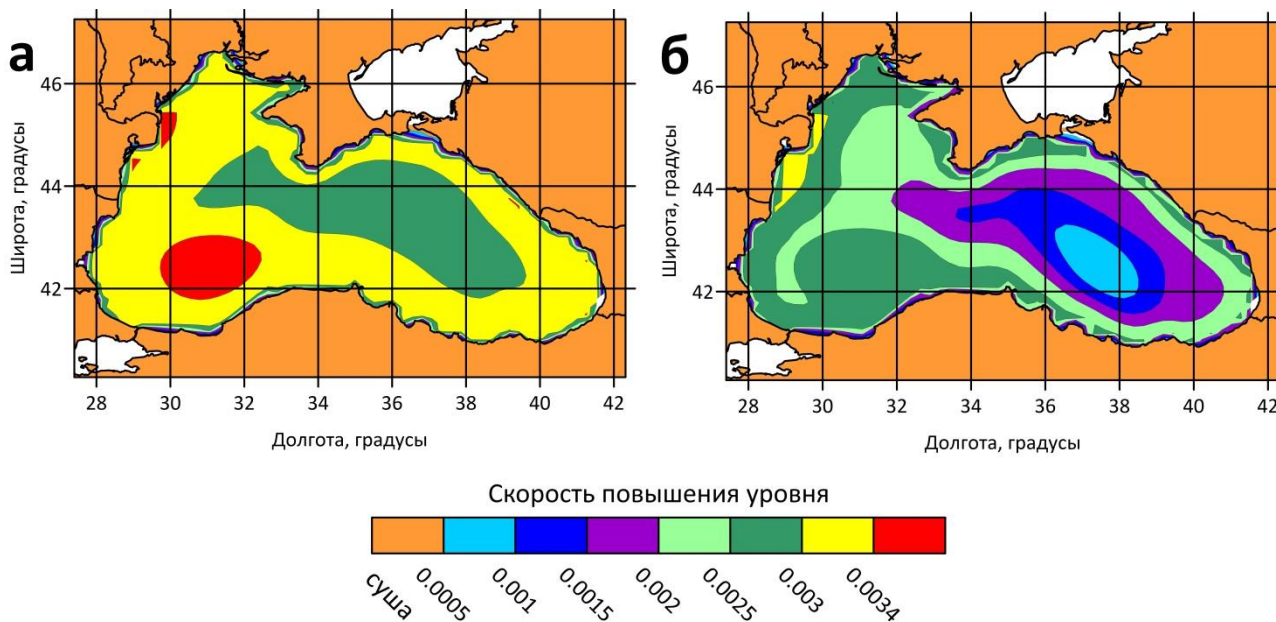
рядов производилось в скользящем окне длиной 11 лет. В среднем за период 1979–2018 гг. среднегодовые значения СУВП Черного моря повышались со скоростью 0.048 м/год, а в 2004–2018 гг. скорость этого процесса уменьшилась. По данным ICDC и GLORYS12V1, она составила 0.040 и 0.032 м/год соответственно. В период 2010–2018 гг. среднегодовые значения СУВП уменьшаются.



**Рисунок 1.** Многолетние изменения для Черного моря аномалии (относительно 1994 г.) среднегодового значения а) СУВП –  $\Delta h$ ; б) СПТ –  $\Delta T$

Из рисунка 1б следует, что среднегодовые значения СПТ Черного моря, которые оценены по данным обоих реанализов, возрастали как в целом за период 1979–2018 гг. (со средней скоростью 0.037°C/год), так и в 2010–2018 гг. Это подтверждает справедливость выводов [IPCC, 2013] о происходящем в регионе потеплении климата. Повышение СПТ моря должно было вызвать термическое расширение вод его верхнего квазиоднородного слоя и соответствующее повышение его СУВП. Как видно из рисунка 1а, в действительности такого в 2010–2018 гг. не происходило. Из этого следует, что в период 2010–2018 гг. усилился фактор, противодействующий повышению СУВП данного моря. Учитывая выводы [Манабе и Вазеролд, 2004], можно предположить, что таким фактором может являться уменьшение годовых сумм атмосферных осадков, а также повышение интенсивности испарения в бассейне Черного моря, которое связано с влиянием блокингов.

На рисунке 2 приведены распределения по акватории Черного моря скоростей повышения среднегодового уровня различных ее участков, которые оценены за периоды 1979–2018 гг. и 1993–2018 гг.



**Рисунок 2.** Распределения по акватории Черного моря средних скоростей повышения среднегодового уровня ее участков (м/год), которые оценены за периоды: а) 1979–2018 гг.; б) 1993–2018 гг.

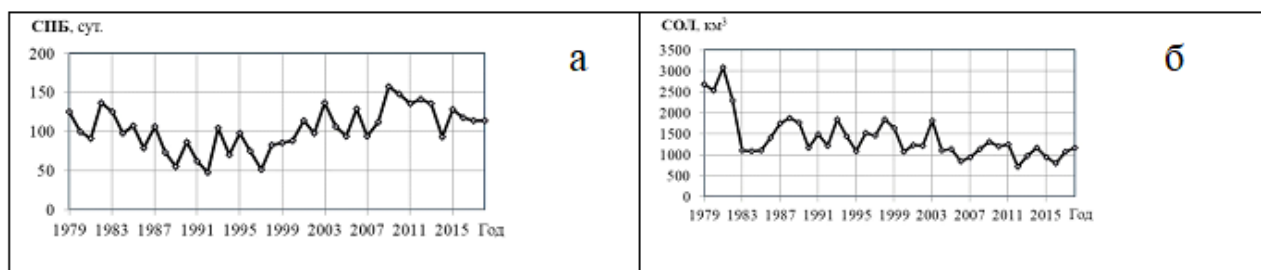
Из рисунка 2а видно, что районы Черного моря, где значения средних за 1979–2018 гг. скоростей повышения их среднегодового уровня лежали в пределах 0.002–0.0025 м/год, преобладали



в областях его шельфа и материкового склона. Максимальные их значения (превышающие 0.003 м/год) соответствовали районам западной части моря, расположенным вблизи гирл Дуная и в центре циклонического круговорота. Ниже уровня 0.002 м/год значения этих показателей были лишь в районах глубоководной котловины Черного моря, расположенных в его восточной части.

Рисунок 2б свидетельствует о том, что распределение по поверхности моря значений средней скорости повышения его уровня, которые оценены за 1993–2018 гг., во многом подобно рассмотренному выше. Максимальные значения (превышающие 0.003 м/год) средней скорости повышения среднегодового уровня соответствовали районам западной части моря, расположенным вблизи гирл Дуная и в центре циклонического круговорота. Размеры части акватории моря, где значения рассматриваемых показателей меньше 0.003 м/год, значительно увеличились. В восточной части моря появились обширные районы, где средняя скорость повышения среднегодового уровня в 1993–2018 гг. не достигает 0.002 м/год и даже 0.001 м/год. Аналогичные выводы сделаны и при анализе распределения тех же показателей, которое построено по результатам реанализа GLORYS12V1, что подтверждает адекватность полученных результатов.

На рисунке 3 показан многолетний ход среднегодовых значений СОЛ и СПБ для Европейского сектора Арктики.



**Рисунок 3.** Многолетний ход для Европейского сектора: а) СПБ; б) СОЛ

Из рисунка 3а видно, что многолетний ход СПБ для Европейского сектора представляет собой сложное колебание. Как показал анализ его спектра, в нем присутствует максимум с периодом 2,85 года, что позволяет допустить наличие связи этого процесса с квазидвухлетним колебанием. Можно предположить наличие в нем максимума с периодом, близким к периоду цикла Брюкнера.

Как следует из рисунка 3б, многолетний ход СОЛ также носит колебательный характер. В нем присутствует убывающий тренд, что соответствует представлениям об особенностях потепления климата Арктики [Алексеев, 2015, IPCC, 2013]. Присутствие в спектре данного процесса максимума, соответствующего периоду 3.1 года, также указывает на его связь с квазидвухлетним колебанием.

Следует отметить, что в период после 2006 г. изменения среднегодовых значений СОЛ для Европейского сектора происходят практически на фиксированном уровне. Последнее свидетельствует о том, что потепление климата здесь, как минимум, приостановилось.

Результаты корреляционного анализа связей между изменениями СУВП Черного моря, СПБ и СОЛ представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Результаты корреляционного анализа связей между изменениями СУВП Черного моря, а также вариациями СПБ и СОЛ

Период	Кол-во степеней свободы	95% порог значимости	Корреляция СПБ (макс.)	Сдвиг СПБ (лет)	Корреляция СОЛ (макс.)	Сдвиг СОЛ (лет)
1979–2018	39	0.32	0.296	1	0.481	1
1993–2018	25	0.37	0.195	1	0.378	1

Из таблицы 1 следует, что статистические связи межгодовых изменений среднегодовых значений СУВП Черного моря и СОЛ акваторий Европейского сектора Арктики, оцененные на обоих отрезках времени, действительно являются статистически значимыми. Последнее имеет место, если сопоставляются изменения СУВП Черного моря, которые запаздывают по отношению к вариациям СОЛ этих акваторий на 1 год. Значимость связи многолетнего хода СУВП с вариациями СПБ также



максимальна при указанном временном сдвиге. Несмотря на то, что корреляция этих процессов выбранного порога значимости не достигает, она является положительной. Корреляция рассматриваемых процессов в целом за 1979–2018 гг. сильнее, чем за 1993–2018 гг. Последнее свидетельствует о том, что в целом за рассматриваемый период доминировали факторы динамики СУВП, способствующие увеличению этого показателя, однако за вторую его половину факторы, обуславливающие его снижение, усилились до уровня, когда они способны ощутимо нарушать сложившиеся связи. Как видим, изменения среднегодовых значений СУВП Черного моря, а также опережающих их по времени на 1 год СОЛ происходят синфазно, а связь между ними статистически значима, что подтверждает адекватность выдвинутой гипотезы.

Аналогичные исследования для прочих внутренних морей Атлантического океана показали, что выдвинутая гипотеза адекватна также для Азовского моря. Для Балтийского и Средиземного моря корреляция многолетних изменений СУВП с вариациями СОЛ выбранного уровня значимости не достигает. Указанные особенности могут быть следствием различия расположений бассейнов этих морей и их климата.

## ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты соответствуют существующим представлениям о влиянии перемен климата на изменения уровня Мирового океана и отдельных его регионов [Каплин с соавт., 1991, Добровольский, 2003, IPCC, 2013]. Из них видно, что происходящие перемены климата в Европейском секторе Арктики, а также вариации СОЛ его акваторий, влияют на меридиональные составляющие атмосферной циркуляции, которые обуславливают режим выпадения атмосферных осадков и испарения в бассейнах рассматриваемых внутренних морей. В результате этого перемены климата Арктики вызывают значимые изменения СУВП Черного и Азовского морей.

Выявленные связи наиболее сильны в случае, если рассматриваемые изменения СУВП данных морей запаздывают по отношению к вариациям СОЛ на 1 год. Они существуют благодаря присутствию в спектрах обоих процессов мод с периодом, близким к периоду квазидвухлетнего колебания. Возможно, сказывается и наличие в их спектрах долгопериодных мод, оценить параметры которых не позволяет ограниченность длины временных рядов результатов реанализа. Таким образом, полученные результаты позволяют обобщить предложенную Л.С. Бергом для Каспийского моря концепцию о зависимости многолетних изменений его уровня от вариаций климата Арктики.

В рассматриваемых внутренних морях та же зависимость проявляется менее ощутимо, чем в Каспии, поскольку эти водоемы не изолированы от Мирового океана. В периоды времени, когда в Арктике происходит потепление климата, в бассейнах этих морей испарение усиливается, а средняя интенсивность выпадающих атмосферных осадков уменьшается. Тем не менее, их СУВП в такие периоды снижается менее ощутимо, чем в Каспийском море, так как уменьшение приходной части их водного баланса частично компенсируется уменьшением и его расходной части (расхода поверхностного течения в соответствующем проливе). Выявленные связи позволяют предположить, что дальнейшие изменения в XXI веке уровней внутренних морей Атлантики будут в той или иной мере зависеть от вариаций СОЛ акваторий Европейского сектора Арктики.

Современные изменения этого показателя являются результатом противоборства факторов, которые способствуют потеплению и похолоданию климата данного региона. К первым относятся водообмен Европейского сектора Арктики с Атлантикой, его воздухообмен с регионами низких широт и другие процессы, способствующие увеличению приходной части его теплового баланса [Алексеев, 2015]. Одним из наиболее существенных факторов похолодания климата Арктики (в том числе и ее Европейского сектора) является снижение среднего за 11 лет уровня солнечной активности [Абдусаматов, 2012], которое приводит не только к уменьшению значений солнечной постоянной. Следствием этого процесса является также увеличение средней за тот же период оптической плотности облачности [Веретенко и Распопов, 2009]. Последнее приводит к снижению коэффициента прозрачности земной атмосферы и средней интенсивности инсоляции любых участков земной поверхности, которое тем существенней, чем в более высоких широтах они расположены.

Как видно из рисунка 3б, в период после 2006 г. снижение СОЛ в Европейском секторе уже не наблюдается. Следовательно, значения равнодействующей факторов потепления и похолодания климата Арктики изменяются на фиксированном уровне, хотя до 2006 года факторы потепления явно преобладали. Тенденция последующих изменений равнодействующей этих процессов зависит не только от внутренних факторов динамики климатической системы нашей планеты (порождающих

циклы Брюкнера), но и от скорости, с которой будет снижаться средний уровень солнечной активности. Поскольку предвычислить дальнейшие изменения характеристик факторов потепления и похолодания невозможно, будущее уровней внутренних морей Атлантики не предопределено, хотя некоторые его черты могут быть спрогнозированы.

Снижение среднего за 11 лет уровня солнечной активности будет продолжаться до 2060–2070 гг., на которые прогнозируется очередной минимум цикла Зюсса [Trenberth, 2009, Абдусаматов, 2012]. По этой причине до указанного времени данный процесс будет в среднем способствовать снижению СОЛ акваторий Европейского сектора Арктики. В максимумах циклов Швабе их СОЛ будет уменьшаться, а в минимумах увеличиваться. В это же время в изменениях факторов потепления, вероятно, сохранятся те же циклы (с периодами 2.85 г. и предположительно 33 года). В дальнейшем средний уровень солнечной активности начнет повышаться, что станет дополнительным фактором потепления. Следовательно, СОЛ Европейского сектора Арктики до 2060–2070 г. будет, как и ранее, изменяться по колебательному закону, а далее, вполне возможно, начнет стремительно сокращаться. В той же фазе будут происходить и изменения уровней Черного, Азовского, а, возможно, и других внутренних морей Атлантики.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, установлено:

1. Изменения суммарного объема ледяного покрова акваторий Европейского сектора Арктики является значимым фактором многолетних вариаций среднего уровня водной поверхности таких внутренних морей Атлантического океана, как Черное и Азовское с запаздыванием на 1 год.

2. Подобная связь существует благодаря влиянию изменений состояния ледяного покрова рассматриваемого сектора Арктики на суммарную продолжительность действия циркуляционных механизмов, которые приводят к образованию над бассейнами рассматриваемых морей блокингов.

3. Предложенная Л.С. Бергом концепция о связи изменений уровня Каспийского моря с переменами климата Арктики может быть распространена и на внутренние моря, относящиеся к бассейну Атлантического океана.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абдусаматов Х.И. 2012. Двухвековое уменьшение солнечной постоянной приводит к несбалансированному тепловому бюджету Земли и глубокому похолоданию климата // Кинематика и физика небесных тел. Т. 28, № 2. С. 22-33. [Abdusamaton Kh.I. 2012. Dvukhvekovoje umen'shenie solnechnoi postoyannoi privodit k nesbalansirovannomu teplovomu byudzhetu Zemli i glubokomu pokholodaniyu klimata // Kinematika i fizika nebesnykh tel. V. 28, N. 2. P. 22-33. (in Russian)]

Айвазян С.А., Мхитарян В.С. 1998. Прикладная статистика и основы эконометрики. М.: Юнити. 1022 с. [Aivazyan S.A., Mkhitaryan V.S. 1998. Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki. M.: Yuniti. 1022 P. (in Russian)]

Алексеев Г.В. 2015. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // Фундаментальная и прикладная климатология. Т. 1. С. 11–26. [Alekseev G.V. 2015. Proyavlenie i usilenie global'nogo potepleniya v Arktike // Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya. V. 1. P. 11–26. (in Russian)]

Берг Л.С. 1934. Уровень Каспийского моря за историческое время // Проблемы физической географии. Т.1. С.11-64. [Berg L.S. 1934. Uroven' Kaspiiskogo morya za istoricheskoe vremya // Problemy fizicheskoi geografii. V.1. P.11-64. (in Russian)]

Веретененко С.В., Распопов О.М. 2009. Солнечная активность и космические лучи: влияние на облачность и процессы в нижней атмосфере (памяти и к 75-летию М.И. Пудовкина) // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 49. № 2. С. 147-155. [Veretenenko S.V., Raspopov O.M. 2009. Solnechnaya aktivnost' i kosmicheskie luchy: vliyanie na oblachnost' i protsessy v nizhnei atmosfere (pamyati i k 75-letiyu M.I. Pudovkina) // Geomagnetizm i aeronomiya. V. 49. N. 2. P. 147-155. (in Russian)]

Гансвинд И.Н. 2017. Современные космические технологии изучения Земли как системы // Электронные библиотеки. Т. 20. №1. Режим доступа: <http://ojs.kpfu.ru/index.php/elbib/article/viewFile/189/67>. [Gansvind I.N. 2017. Sovremennye kosmicheskie tekhnologii izucheniya Zemli kak sistemy // Elektronnye biblioteki. V. 20. №. 1. Rezhim dostupa: <http://ojs.kpfu.ru/index.php/elbib/article/viewFile/189/67>. (in Russian)]

Дзердзеевский Б.Л. 1968. Циркуляционные механизмы в атмосфере Северного полушария в XX столетии. Материалы метеорологических исследований. М.: Изд. ИГ АН СССР и Междувед. Геофиз. Комитета при Президиуме АН СССР. 240 с. [Dzerdzeevskii B.L. 1968. Tsirkulyatsionnye mekhanizmy v atmosfere Severnogo polushariya v KhKh stoletii. Materialy meteorologicheskikh issledovaniy. M.: Izd. IG AN SSSR i Mezhdoved. Geofiz. Komiteta pri Prezidiume AN SSSR. 240 P. (in Russian)]

Добровольский С.Г. 2003. Изменения климата и составляющих водного баланса // Актуальные проблемы водообеспечения / Под ред. С.Г. Добровольского. М.: Наука. С. 119–130. [Dobovol'skii S.G. 2003. Izmeneniya klimata i sostavlyayushchikh vodnogo balansa // Aktual'nye problemy vodoobespecheniya / Ed. S.G. Dobovol'skogo. M.: Nauka. P. 119–130. (in Russian)]

Думанская И.О., Федоренко А.В. 2008. Анализ связи ледовых характеристик морей европейской части России с макроциркуляционными атмосферными процессами // Метеорология и гидрология. № 12. С. 82-94. [Dumanskaya I.O.,

- Fedorenko A.V. 2008. Analiz svyazi ledovykh kharakteristik morei evropeiskoi chasti Rossii s makrotsirkulyatsionnymi atmosferynymi protsessami // Meteorologiya i gidrologiya. N. 12. P. 82-94. (in Russian)
- Иванов Г.С., Кондратьев В.И. 1970. О точности определения среднего уровня моря // Труды ГОИН. Вып. 99. С. 82–86. [Ivanov G.S., Kondrat'ev V.I. 1970. O tochnosti opredeleniya srednego urovnya morya // Trudy GOIN. Iss. 99. P. 82–86.]
- Каплин П. А., Леонтьев О. К., Лукьянова С. А., Никифорова Л. Г. 1991. Берега. М.: Мысль. 479 с. [Kaplin P. A., Leont'ev O. K., Luk'yanova S. A., Nikiforova L. G. 1991. Berega. M.: Mysl'. 479 P. (in Russian)]
- Кубряков А.А. 2009. Анализ пространственной и временной изменчивости уровня Черного моря на основе альтиметрических и натурных наблюдений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа / Под ред. А.А. Кубрякова и С.В. Станичного. Вып. 18. С. 101–113. [Kubryakov A.A. 2009. Analiz prostranstvennoi i vremennoi izmenchivosti urovnya Chernogo morya na osnove al'timetricheskikh i naturnykh nablyudenii // Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa / Ed. A.A. Kubryakova i S.V. Stanichno. Iss. 18. P. 101–113. (in Russian)]
- Манабе С., Вазеролд Р.Т. 2004. Долговременные изменения водных запасов вследствие глобального потепления по данным моделирования // Всемирная конференция по изменениям климата. М.: Паблик принт. С.47-56. [Manabe S., Vazerold R.T. 2004. Dolgovremennye izmeneniya vodnykh zapasov vsledstvie global'nogo potepleniya po dannym modelirovaniya // Vsemirnaya konferentsiya po izmeneniyam klimata. M.: Pablik print. P. 47-56. (in Russian)]
- Мохов И.И., Акперов М.Г., Прокофьева М.А. 2013. Блокинги в Северном полушарии и Евро-Атлантическом регионе: оценки изменений по данным реанализа и модельным расчетам // Доклады Академии наук. Т. 449. № 5. С. 1-5. [Mokhov I.I., Akperov M.G., Prokof'eva M.A. 2013. Blokingi v Severnom polusharii i Evro-Atlanticheskom regione: otsenki izmenenii po dannym reanaliza i model'nyim raschetam // Doklady Akademii nauk. V. 449. N. 5. P. 1-5. (in Russian)]
- Скворцов А. В., Мирза Н. С. 2006. Алгоритмы построения и анализа триангуляции. Томск: Изд. Томск. Университета. 168 с. [Skvortsov A. V., Mirza N. S. 2006. Algoritmy postroeniya i analiza triangulyatsii. Tomsk: Izd. Tomsk. Universiteta. 168 P. (in Russian)]
- Хайрулина Г.Р., Астафьева Н.М. 2011. Квазидвухлетние колебания в атмосфере Земли. Обзор: наблюдение и механизмы формирования. М.: ИКИ РАН. 60 с. [Khairulina G.R., Astaf'eva N.M. 2011. Kvazidvukhletnie kolebaniya v atmosfere Zemli. Obzor: nablyudenie i mekhanizmy formirovaniya. M.: IKI RAN. 60 P. (in Russian)]
- Шнитников А.В. 1957. Изменчивость общей увлажнённости материков Северного полушария. М.-Л.: АН СССР. 335 с. [Shnitnikov A.V. 1957. Izmenchivost' obshchei uvlazhnenosti materikov Severnogo polushariya. M.-L.: AN SSSR. 335 P.]
- Cherenkova E.A., Semenova I.G., Kononova N.K., Titkova T.B. 2015. Droughts and dynamics of synoptic processes in the south of the East European Plain at the beginning of the twenty-first century // Arid Ecosystems. V. 5. №2. P. 45–56.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2013: Chapter 8. Anthropogenic and natural radiative forcing. P. 659-740.
- Mörner N.-A. 2012. Sea level is not rising // Science and Public Police Institute Reprint Series / N.-A.Mörner (ed.). 26 p.
- Nerem R.S., Beckley D.D., Fasullo J.T. 2018. Climate-change driven accelerated sea – level rise detected in the altimeter era // Proceedings of the National Academy of Sciences. V. 115 (9). P. 2022-2025.
- Trenberth K. E., Fasullo J. T., Kiehl J. 2009. Earth's global energy bud get // Bull. Amer.Meteor. Soc. V. 90. №3. P. 311—324.
- Zuo H., Alonso-Balmaseda M., de Boisseson E., Hirahara S., Chrust M., de Rosnay P. 2017. A generic ensemble generation scheme for data assimilation and ocean analysis // ECMWF. Technical Memorandum. №795. 44 p. DOI: 10.21957/cub7mq0i4
- Банк данных PSMSL. Режим доступа: <http://www.psmsl.org/>
- База данных GLOREY12V1. Режим доступа: [http://resources.marine.copernicus.eu/?option=com\\_csw&view=details&product\\_id=GLOBAL\\_REANALYSIS\\_PHY\\_001\\_030](http://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030)(дата обращения 11 декабря 2019)
- Материалы ЕСИМО. Данные наблюдений за уровнем Черного моря. Режим доступа: [http://portal.esimo.ru/dataview/viewresourceconfidential?resourceId=RU\\_RIHMI-WDC\\_410](http://portal.esimo.ru/dataview/viewresourceconfidential?resourceId=RU_RIHMI-WDC_410). [Observation data for the Black Sea level. Access mode: [http://portal.esimo.ru/dataview/viewresourceconfidential?resourceId=RU\\_RIHMI-WDC\\_410](http://portal.esimo.ru/dataview/viewresourceconfidential?resourceId=RU_RIHMI-WDC_410)]
- Колебания циркуляции атмосферы Северного полушария в XX – начале XXI века. Режим доступа: URL: <http://www.atmospheric-circulation.ru> (дата обращения 11 февраля 2020). [Atmospheric circulation fluctuations in the Northern Hemisphere in the 20th – early 21st centuries. Access mode: URL: <http://www.atmospheric-circulation.ru> (Accessed February 11, 2020).]
- Сведения об ИСЗ, поставляющих оперативную информацию о топографии поверхности Мирового океана в GLOSS. Режим доступа. ([www.ceos.org](http://www.ceos.org); [www.wmo.int/pages/prog/sat/satellitestatus.php](http://www.wmo.int/pages/prog/sat/satellitestatus.php)). [Information about satellites that provide operational information about the topography of the surface of the World Ocean in GLOSS. Access mode. ([www.ceos.org](http://www.ceos.org); [www.wmo.int/pages/prog/sat/satellitestatus.php](http://www.wmo.int/pages/prog/sat/satellitestatus.php).)]

Поступила в редакцию: 17.04.2020  
Переработанный вариант: 10.07.2022