

УДК 551.464:543.30

## ОСОБЕННОСТИ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДНЕГО УРОВНЯ ЧЁРНОГО МОРЯ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РЕАНАЛИЗА GLORYS12v.1)

Холопцев А. В.<sup>1,2</sup>, Подпорин С. А.<sup>2</sup>, Курочкин Л. Е.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова», Севастополь, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация

E-mail: [kholoptsev@mail.ru](mailto:kholoptsev@mail.ru), [SAPodporin@sevsu.ru](mailto:SAPodporin@sevsu.ru), [l.kurochkin.mj@mail.ru](mailto:l.kurochkin.mj@mail.ru)

Оценивается применимость данных глобального реанализа GLORYS12.v1 при определении среднемесячных и среднегодовых значений уровней Черного моря. Выполняется сравнение данных реанализа с результатами фактических измерений на уровневых постах. На основе полученных результатов выявляются некоторые значимые особенности многолетних изменений среднего уровня Черного моря, проявившиеся в период 1993–2018 гг.

**Ключевые слова:** Черное море, уровень, реанализ GLORYS12.v1, многолетние изменения, систематические и абсолютные погрешности

### ВВЕДЕНИЕ

Многолетние изменения уровня водной поверхности различных районов Мирового являются существенными факторами переформирования их берегов, а также изменений экологических условий на прибрежных территориях и глубин на фарватерах. Поэтому выявление их особенностей является актуальной проблемой физической географии, океанографии, экологической безопасности, а также судоходства.

Наибольший интерес решение указанной проблемы представляет для регионов Мирового океана, побережья которых густонаселены и обладают значительным рекреационным потенциалом. Одним из таких регионов является Черное море, омывающее побережья России, Украины, Румынии, Болгарии, Турции и Грузии.

Основой существующих представлений о закономерностях изменения уровня Черного моря являются работы Ф. Ф. Врангеля, Э. В. Майделя, Э. А. Брюкнера, Н. М. Книповича, В. П. Зенковича, Д. Я. Беренбейма, Р. К. Клиге, Г. Мънгова. Их развитию посвящены работы современных отечественных и зарубежных ученых.

Установлено, что к числу основных факторов изменений среднего уровня Черного моря относятся процессы, влияющие на динамику его водного баланса. Важнейшее место среди них занимают перемены характеристик климата в его бассейне. Значимое влияние оказывают также неотектонические процессы, вызывающие изменения объема Черноморской впадины [1; 2].

Наблюдения за изменениями уровня водной поверхности Черного моря впервые начали осуществляться в 1858 г. на постах Констанца и Сулина (Румыния). С 1974 г. они ведутся также в Очакове, с 1875 г. — в Одессе и Севастополе (Российская империя), с 1881 г. в Варне (Болгария). Всего на участках побережья Черного моря, относящихся к СССР, в различные годы функционировало 44 уровневых поста. До начала последней четверти XX века на большинстве таких постов измерения уровня проводились по футштоку. В современном периоде подобные наблюдения осуществляются с

использованием мареографов, что позволило снизить абсолютные погрешности результатов измерений до приблизительно 1 см.

В отличие от России, Украины, Болгарии и Грузии, где принята Балтийская система, в Турции применяется система измерения уровня Türkiye ulusal düzey kontrol ağı (TUDKA-99), где за ноль принят средний уровень Средиземного моря за период с 1936 по 1971, измеренный в районе п. Анталия. В Румынии для измерения высот используются Черноморская (с 1930 г.) и Европейская вертикальные референсные системы (EVRS) (с 2007 г.) [1; 3].

Все упомянутые наблюдения производятся лишь на прибрежных участках акватории Черного моря, хотя для оценки среднего уровня всей его поверхности аналогичная информация необходима для всех участков моря.

Мониторинг изменений уровня некоторых неприбрежных участков водной поверхности Черного моря начал осуществляться лишь с 1993 г. Эти исследования выполняются с применением радиолокационной альтиметрии [4]. Данный метод позволяет определять средний уровень участка земной поверхности, попадающего в момент зондирования в пределы диаграммы направленности антенны радиолокатора. Так как радиус зондируемого участка, как правило, составляет единицы километров, абсолютная погрешность таких измерений составляет 5–6 см.

Упомянутые измерения проводятся на участках акватории моря, через которые проходят трассы соответствующих искусственных спутников Земли [5]. В прибрежных районах моря зондируемый участок частично включает также сушу, возвышающуюся над уровнем водной поверхности, вследствие чего погрешности измерений возрастают. Поскольку спутников, оснащенных радиолокационными альтиметрами, довольно мало, подобный мониторинг охватывает далеко не все участки акватории моря, а временной интервал между последующими измерениями уровня в пунктах, где он возможен, составляет единицы суток.

Единственным на сегодняшний день методом, позволяющим выполнять мониторинг синхронных изменений уровня всех участков акватории моря, является математическое моделирование. Этот метод, основанный на применении глобальных гидродинамических моделей, верифицированных с использованием результатов фактических измерений, позволяет осуществить ретроспективный анализ (далее — реанализ) вариаций конфигурации водной поверхности моря.

Одним из наиболее совершенных и точных реанализов изменений уровня Мирового океана считается GLORYS12.v1 (Global Ocean Physics Reanalysis), который поддерживается сервисом Copernicus [6]. Представленные в нем сведения получены с использованием океанической модели NEMO [7]. При ее верификации используются результаты глобального спутникового мониторинга (радиолокационная альтиметрия).

Информация об уровне того или иного участка акватории Мирового океана в период с 1.01.1993 характеризуется разрешением по времени 1 сутки, а по координатам — 5 угловых минут. Для уменьшения дисперсии ошибок моделирования применен фильтр Калмана.

Учитывая ограничения данных радиолокационной альтиметрии, результаты упомянутого реанализа могут отличаться от данных фактических измерений на уровнях постах, внося соответствующий вклад в суммарные погрешности оценок

## ОСОБЕННОСТИ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДНЕГО УРОВНЯ ЧЁРНОГО МОРЯ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РЕАНАЛИЗА GLORYS12v.1)

среднего уровня изучаемого водного объекта.

Для Черного моря адекватность информации об изменениях его уровня, представленной в реанализе GLORYS12.v1, ранее не оценивалась. Поэтому проверка такой информации, а также (в случае положительного результата проверки) ее применение для выявления особенностей многолетних изменений среднего уровня Черного моря представляет теоретический и практический интерес.

Цель настоящего исследования — выявление особенностей многолетних изменений уровня Черного моря с использованием результатов реанализа GLORYS12.v1.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Оценка достоверности статистического вывода о наличии соответствия многолетних изменений оценок среднемесячных и среднегодовых значений уровня водной поверхности различных районов Черного моря, полученных по данным указанного реанализа и результатам фактических измерений.

2. Определение систематических и абсолютных погрешностей оценок указанных характеристик, полученных с использованием результатов реанализа GLORYS12.v1.

3. Выявление особенностей многолетних изменений уровня Черного моря с использованием результатов реанализа GLORYS12.v1.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При решении поставленных задач в качестве источника данных о многолетних изменениях уровня Черного моря использованы мониторинговые данные по ряду уровенных постов, имеющиеся в архиве Севастопольского отделения ГОИН им. Н. Н. Зубова, а также результаты реанализа GLORYS12.v1.

Координаты уровенных постов, расположенных на побережье Черного моря, по которым имеются репрезентативные данные, приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Координаты уровенных постов на побережье Черного моря, данные которых использованы в исследовании

№	Наименование	Широта (°N)	Долгота (°E)	№	Наименование	Широта (°N)	Долгота (°E)
1	Севастополь	44,6167	33,533	5	Новороссийск	44,733	37,78333
2	Ялта	44,4833	34,166	6	Геленджик	44,55	38,03333
3	Феодосия	45,0333	35,383	7	Туапсе	44,083	39,05
4	Анапа	44,9	37,3	8	Сочи	43,583	39,71667

Как видно из таблицы 1, в состав использованных уровенных постов вошли пункты, расположенные на Черноморском побережье Крымского полуострова и Кавказа. На указанных постах уровенные измерения производились непрерывно в период 1993–2018 гг. с использованием мареографов.

Исходные данные, полученные с уровенных постов и по результатам реанализа GLORYS12.v1, позволили сформировать временные ряды оценок среднемесячных (для всех месяцев) и среднегодовых значений уровня Черного моря за период 1993–2018 гг.

При решении первой задачи применен метод корреляционного анализа и критерий Стьюдента [8]. Предварительно в сопоставляемых временных рядах скомпенсированы линейные тренды. Решение о наличии соответствия многолетних изменений оценок среднемесячных и среднегодовых значений уровня водной поверхности различных районов Черного моря, полученных по данным реанализа и результатам фактических измерений, принималось, если достоверность статистического вывода превышала 0,95. Соответствующее значение порога значимой корреляции вычислено с учетом числа степеней свободы сопоставляемых рядов (26). Это значение составило 0,4.

При решении второй задачи в качестве фактических значений уровня Черного моря использовались его оценки, полученные по результатам измерений на уровневых постах.

Значения систематической погрешности оценок среднемесячных (для всех месяцев) и среднегодовых значений уровня Черного моря, полученных по данным реанализа и по результатам измерений, вычислялось как математическое ожидание разности соответствующих членов их временных рядов за 1993–2018 гг. Значения абсолютной погрешности тех же оценок вычислялись как среднеквадратические отклонения разностей соответствующих членов их временных рядов за тот же период (в рядах предварительно были скомпенсированы систематические погрешности).

При решении третьей задачи по результатам GLORYS12.v1. для каждого месяца выявлены особенности многолетних изменений за 1993–2018 гг. среднемесячных значений среднего уровня всей поверхности Черного моря, вычисленных с учетом всех расположенных на ней узлов координатной сетки этого реанализа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

В соответствии с изложенной методикой, оценена значимость статистических связей между временными рядами оценок среднемесячных уровней Черного моря в репрезентативных пунктах его побережья, полученных по результатам реанализа GLORYS12.v1 и данным фактических измерений.

В качестве примера, в таблице 2 представлены результаты корреляционного анализа этих связей для ряда рассматриваемых пунктов.

Таблица 2.

Значения коэффициентов корреляции между временными рядами оценок среднемесячных уровней Черного моря в ряде репрезентативных пунктов, которые получены по результатам реанализа GLORYS12.v1 и данным фактических измерений на уровневых постах

Месяц	Севастополь	Ялта	Феодосия	Новороссийск	Геленджик	Туапсе
1	2	3	4	5	6	7
январь	0,912	0,893	0,864	0,862	0,764	0,839
февраль	0,889	0,879	0,776	0,834	0,742	0,764
март	0,92	0,919	0,829	0,821	0,768	0,731
апрель	0,883	0,859	0,765	0,752	0,721	0,721

**ОСОБЕННОСТИ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДНЕГО УРОВНЯ  
ЧЁРНОГО МОРЯ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РЕАНАЛИЗА GLORYS12v.1)**

Продолжение таблицы 2.

1	2	3	4	5	6	7
май	0,881	0,862	0,728	0,821	0,795	0,733
июнь	0,905	0,897	0,801	0,655	0,592	0,681
июль	0,888	0,826	0,877	0,806	0,698	0,745
август	0,839	0,865	0,802	0,827	0,811	0,821
сентябрь	0,898	0,851	0,793	0,928	0,676	0,814
октябрь	0,831	0,792	0,707	0,817	0,716	0,747
ноябрь	0,841	0,824	0,724	0,827	0,605	0,677
декабрь	0,916	0,871	0,764	0,879	0,836	0,814
<b>год</b>	<b>0,952</b>	<b>0,948</b>	<b>0,874</b>	<b>0,926</b>	<b>0,776</b>	<b>0,831</b>

Из таблицы 2 видно, что в любые месяцы значения коэффициентов корреляции между временными рядами оценок среднемесячных уровней Черного моря в рассматриваемых пунктах его побережья, которые получены по результатам реанализа GLORYS12.v1 и данным фактических измерений, существенно превышают 0,4 (выбранный уровень значимости). Такие же выводы справедливы и для прочих репрезентативных пунктов.

Аналогичный вывод справедлив и для соответствующих рядов среднегодовых значений. Следовательно, между многолетними изменениями среднемесячных и среднегодовых уровней Черного моря в репрезентативных пунктах его побережья, которые оценены по результатам фактических измерений и по данным реанализа GLORYS12.v1, имеет место удовлетворительное соответствие.

При решении второй задачи для всех репрезентативных пунктов оценены систематические и абсолютные погрешности результатов реанализа GLORYS12.v1 изменений уровня Черного моря. В качестве примера, в таблице 3 представлены систематические погрешности оценок среднемесячных уровней Черного моря в некоторых пунктах его побережья, полученные по результатам реанализа GLORYS12.v1.

Таблица 3.

Систематические погрешности (м) оценок среднемесячных уровней Черного моря в репрезентативных пунктах его побережья, полученные по результатам реанализа GLORYS12.v1

Месяц	Севастополь	Ялта	Феодосия	Новороссийск	Геленджик	Туапсе
1	2	3	4	5	6	7
январь	0,124	0,166	0,167	0,135	0,088	0,107
февраль	0,141	0,171	0,183	0,145	0,099	0,108
март	0,171	0,204	0,216	0,169	0,131	0,128
апрель	0,226	0,252	0,269	0,201	0,184	0,177
май	0,235	0,265	0,271	0,214	0,189	0,196
июнь	0,251	0,278	0,286	0,241	0,219	0,216
июль	0,249	0,276	0,273	0,248	0,221	0,223
август	0,198	0,249	0,227	0,211	0,193	0,188

Продолжение таблицы 3.

1	2	3	4	5	6	7
сентябрь	0,144	0,178	0,165	0,149	0,111	0,113
октябрь	0,117	0,158	0,142	0,127	0,071	0,092
ноябрь	0,105	0,121	0,117	0,101	0,027	0,055
декабрь	0,122	0,157	0,147	0,124	0,062	0,086
<b>год</b>	<b>0,174</b>	<b>0,206</b>	<b>0,205</b>	<b>0,172</b>	<b>0,132</b>	<b>0,141</b>

Из таблицы 3 следует, что в указанных пунктах на побережье Черного моря систематические погрешности оценок его среднемесячных уровней положительны, а их значения в месяцы с апреля по август превышают среднегодовые уровни. Такие же выводы справедливы и для других репрезентативных пунктов. Во всех изучаемых рядах результатов реанализа систематические погрешности скомпенсированы.

В таблице 4 в качестве примера приведены абсолютные погрешности оценок среднемесячных уровней Черного моря в некоторых репрезентативных пунктах его побережья, которые получены по результатам реанализа GLORYS12.v1.

Таблица 4.

Абсолютные погрешности (м) оценок среднемесячных уровней Черного моря в репрезентативных пунктах его побережья, полученные по результатам реанализа GLORYS12.v1

Месяц	Севастополь	Ялта	Феодосия	Новороссийск	Геленджик	Туапсе
январь	0,032	0,038	0,035	0,037	0,064	0,042
февраль	0,038	0,039	0,056	0,037	0,061	0,039
март	0,032	0,032	0,049	0,033	0,049	0,038
апрель	0,035	0,037	0,054	0,041	0,048	0,041
май	0,029	0,031	0,039	0,031	0,038	0,037
июнь	0,028	0,029	0,041	0,041	0,048	0,041
июль	0,046	0,049	0,052	0,043	0,051	0,051
август	0,036	0,036	0,046	0,035	0,043	0,034
сентябрь	0,036	0,036	0,048	0,032	0,052	0,035
октябрь	0,035	0,037	0,051	0,041	0,049	0,045
ноябрь	0,036	0,035	0,035	0,037	0,058	0,045
декабрь	0,038	0,041	0,041	0,033	0,046	0,041
<b>год</b>	<b>0,023</b>	<b>0,022</b>	<b>0,031</b>	<b>0,019</b>	<b>0,039</b>	<b>0,022</b>

Как видно из таблицы 4, абсолютные погрешности оценок среднемесячных уровней Черного моря в указанных репрезентативных пунктах его побережья, полученных по результатам реанализа GLORYS12.v1, не превышают значения аналогичных показателей качества спутниковой информации, которая применяется для верификации модели NEMO.

Тот же вывод справедлив и для прочих репрезентативных пунктов. Наименьшие значения абсолютных погрешностей рассматриваемых оценок соответствуют пунктам Севастополь и Ялта, а наибольшие — пункту Геленджик.

## ОСОБЕННОСТИ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДНЕГО УРОВНЯ ЧЁРНОГО МОРЯ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РЕАНАЛИЗА GLORYS12v.1)

При решении третьей задачи рассмотрены многолетние изменения оценок среднего уровня Черного моря, вычисленные с учетом всех 7 275 узлов координатной сетки реанализа GLORYS12.v1, расположенных на его акватории.

На рис. 1 в качестве примера представлены многолетние изменения отклонений (P, м) среднемесячных значений среднего уровня всей поверхности Черного моря для месяцев с января по апрель от соответствующих средних уровней, вычисленных за 1993–2018 гг.

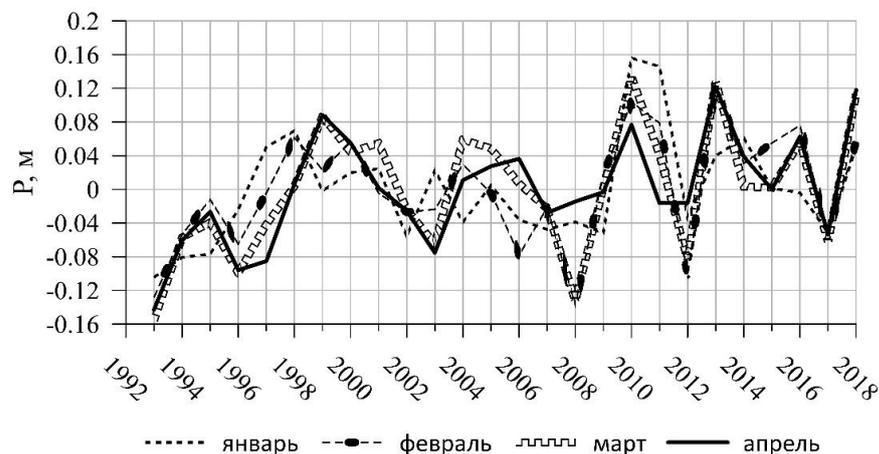


Рис. 1. Многолетние изменения отклонений (P, м) среднемесячных значений среднего уровня всей поверхности Черного моря для января–апреля от ее средних уровней за 1993–2018 гг.

Из рис. 1 видно, что рассматриваемые процессы представляют собой сложные колебания, наложенные на возрастающие тренды. Как показал анализ аналогичных процессов для прочих месяцев, средний уровень водной поверхности Черного моря в 1993–2018 гг. повышался со средними скоростями от 1 мм/год (сентябрь и октябрь) до 4,43 мм/год (апрель). Среднегодовые значения его среднего уровня повышались со скоростью 2,55 мм/год.

Нетрудно заметить, что в рассматриваемых процессах присутствуют квазигармонические составляющие с периодами 3–5 лет и амплитудами порядка 6–8 см. Указанные особенности характерны аналогичным процессам для всех прочих месяцев.

Сопоставление амплитуд этих составляющих с абсолютными погрешностями оценок среднемесячных значений уровня Черного моря у репрезентативных пунктов его побережья (таблица 4) позволяет утверждать, что выявленные колебания обусловлены не погрешностями моделирования, а существуют реально.

Из рис. 1 понятно также, что в рассматриваемых процессах могут присутствовать составляющие и с большими значениями периодов. Для выявления этих составляющих осуществлено сглаживание рассматриваемых временных рядов в скользящем окне длиной 5 лет.

Полученные при этом зависимости от времени сглаженных в скользящем окне длиной 5 лет отклонений (P, м) среднемесячных средних уровней всей поверхности

Черного моря от их средних значений за 1993–2018 гг. приведены на рис. 2.

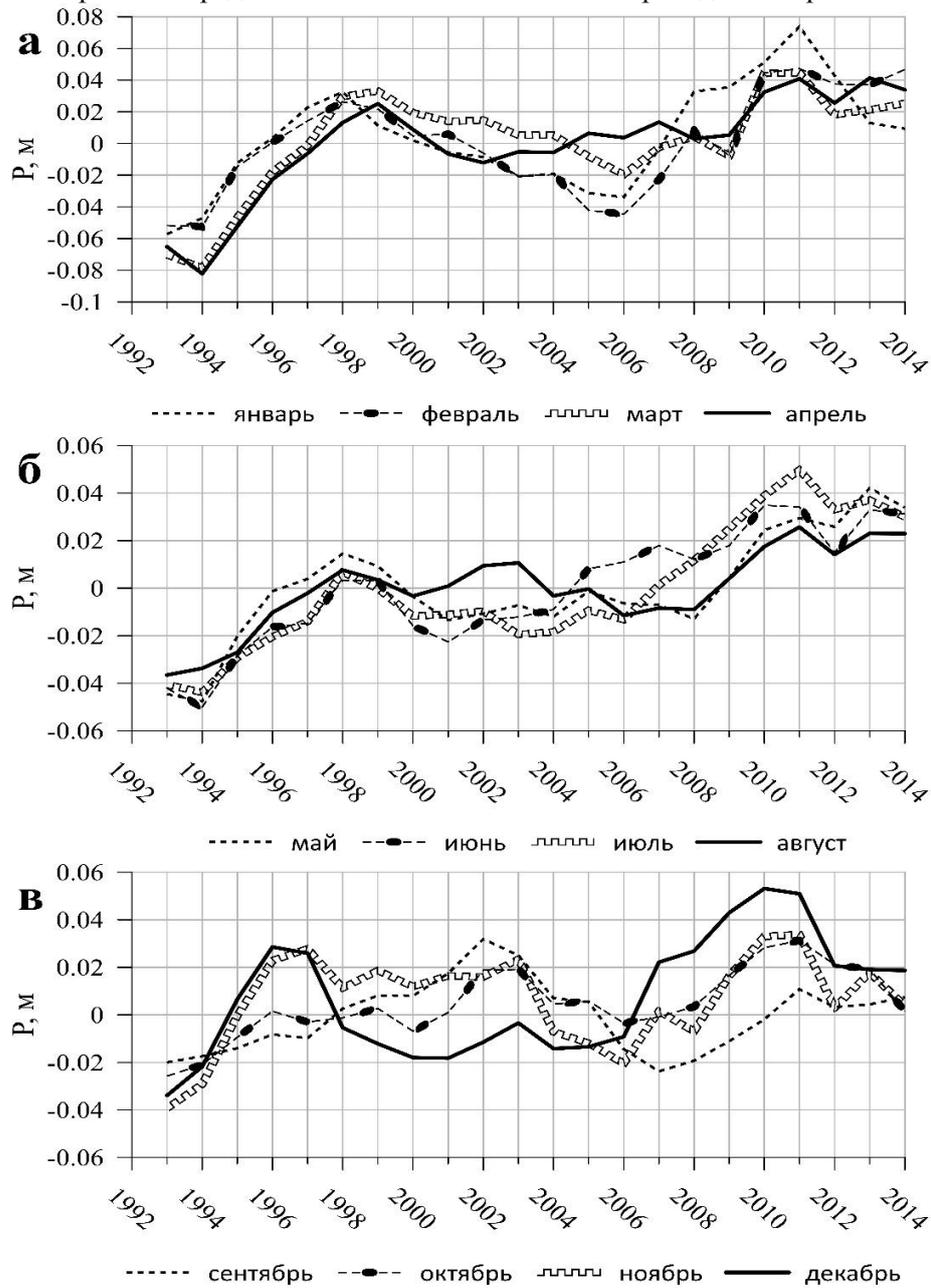


Рис. 2. Зависимости от времени сглаженных в скользящем окне длиной 5 лет отклонений (P, м) среднемесячных средних уровней всей поверхности Черного моря, от их средних значений за 1993–2018 гг. для месяцев:

а) январь–апрель; б) май–август; в) сентябрь–декабрь

Как видно из рис. 2, в многолетних изменениях, сглаженных в скользящем окне длиной 5 лет отклонений ( $P, m$ ), среднемесячных уровней всей поверхности Черного моря для всех месяцев от соответствующих средних значений за 1993–2018 гг., присутствуют возрастающие тренды. Вместе с тем очевидно, что в период 2009–2018 гг. средние скорости повышения среднемесячных уровней моря для января–сентября существенно уменьшились (в сравнении с их значениями за 1993–2018 гг.), а для октября–декабря произошло их заметное уменьшение.

Из рис. 2 следует также, что с декабря по май, а также в июле в рассматриваемых процессах преобладает составляющая с периодом 12–14 лет и амплитудой 2–4 см.

Поскольку количество узлов реанализа GLORYS12.v1., которые учитываются при вычислении среднего уровня Черного моря, составляет 7 275, амплитуды указанных составляющих значительно превосходят абсолютные погрешности его результатов.

Периоды выявленных квазипериодических составляющих многолетних изменений среднего уровня Черного моря в зимне-весенние месяцы близки по своим значениям к аналогичным показателям многолетних вариаций поступающего в него речного стока, а также сумм атмосферных осадков, выпадающих на его поверхность [1]. Последнее позволяет предполагать, что указанные особенности обусловлены действием климатических факторов.

Таким образом, результаты реанализа GLORYS12.v1. позволяют выявить следующие особенности многолетних изменений значений среднего уровня Черного моря в период 1993–2018 гг.:

- наличие возрастающих трендов (для любых месяцев и в целом за год);
- присутствие значимых квазигармонических составляющих с периодами 3–5 лет и 12–14 лет (для месяцев декабрь–май и июль, а также в целом за год).

### **ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Выявленные тенденции к повышению в 1993–2018 гг. среднемесячных и среднегодовых значений средних уровней Черного моря, которые наиболее ярко выражены в месяцы с апреля по август, соответствуют существующим представлениям о роли в этом процессе водно-балансовых (климатических) факторов [2; 10].

Наличие в рассматриваемых процессах возрастающих трендов может быть обусловлено потеплением регионального климата, которое вызвало повышение температуры, объема поверхностной водной массы моря и эвстатическое повышение его уровня, наиболее ощутимое в апреле–июле [1].

Причиной существования квазипериодических составляющих изучаемых процессов могут служить соответствующие изменения повторяемости над морем циклонов. Как известно [11], повторяемость циклонов над Азово-Черноморским регионом во многом определяется состоянием Североатлантического колебания (САК) [12]. Поэтому допустимо предположить, что многолетние изменения среднемесячных значений индекса САК могут быть значимо связаны с вариациями

среднемесячных значений среднего уровня Черного моря.

Для проверки данного предположения выполнен корреляционный анализ связей между этими процессами. В качестве источника данных об изменениях индекса САК использованы временные ряды его среднемесячных значений (число степеней их свободы — 26) [13]. Результаты анализа приведены в таблице 5 (жирным шрифтом выделены значения, превышающие по модулю 0,4 — выбранный порог значимости, при котором достоверность вывода о справедливости этого предположения выше 0,95).

Таблица 5.

Результаты корреляционного анализа многолетних изменения среднемесячных значений индекса САК, а также вариаций вычисленных среднемесячных значений среднего уровня Черного моря

месяц	корреляция	месяц	корреляция	месяц	корреляция
январь	<b>-0,573</b>	май	0,192	сентябрь	0,149
февраль	<b>-0,403</b>	июнь	0,102	октябрь	<b>-0,611</b>
март	<b>-0,448</b>	июль	-0,002	ноябрь	<b>-0,538</b>
апрель	-0,297	август	0,072	декабрь	<b>-0,459</b>

Из таблицы 5 следует, что выдвинутое предположение для месяцев с октября по март является вполне адекватным. Данный результат свидетельствует о том, что связи многолетних изменений оценок среднемесячных значений уровня Черного моря, основанные на реанализе GLORYS12.v1, с вариациями состояния САК удовлетворительно соответствуют представлениям [12] о сезонных изменениях их характеристик.

## ВЫВОДЫ

Результаты исследований позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Информация об изменениях уровня различных участков акватории Черного моря, представленная в реанализе GLORYS12.v1, может быть использована для выявления реально существующих особенностей многолетних изменений среднемесячных и среднегодовых его значений, а также их связей с другими природными процессами.

2. Многолетним изменениям среднего уровня Черного моря в период 1993–2018 гг. были присущи следующие особенности:

- наличие возрастающих трендов (для любых месяцев и в целом за год);
- присутствие значимых квазигармонических составляющих с периодами 3–5 лет и 12–14 лет (для месяцев декабрь–май и июль, а также в целом за год).

3. Учитывая выявленные особенности многолетних изменений среднего уровня Черного моря, представляется вероятным, что, несмотря на сохранение тенденции к его повышению, в ближайшем десятилетии его среднемесячные и среднегодовые значения будут снижаться.

## ОСОБЕННОСТИ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДНЕГО УРОВНЯ ЧЁРНОГО МОРЯ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РЕАНАЛИЗА GLORYS12v.1)

---

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и г. Севастополя в рамках научного проекта № 20-45-920007.*

### Список литературы

1. Горячкин Ю. Н., Иванов В. А. Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее / Под ред. В. Н. Еремеева. Севастополь: Морской гидрофизический институт НАН Украины, 2006. 210 с.
2. Каплин П. А., Павлидис Ю. А., Селиванов А. О. Прогноз развития береговой зоны морей России в условиях повышения их уровня и потепления климата // Человечество и береговая зона Мирового океана в XXI веке: XX Междунар. конф., посвящ. 90-летию В.П. Зенковича (4–5 февр. 2000 г.), Москва, 2001, С. 16–28.
3. Cazenave A. et al. Interannual sea level change at global and regional scales using Jason-1 altimetry [Electronic resource]. URL: <https://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/kiosque/newsletter/news08/cazenave.pdf>
4. Гансвинд И. Н. Современные космические технологии изучения Земли как системы // Электронные библиотеки. 2017. Т. 20, № 1. С. 39–49.
5. NCEI OSTM/Jason-2 and Jason-3 Satellite Products Archive. [Electronic resource]. URL: <https://www.nodc.noaa.gov/sog/jason/>
6. База данных Global Ocean Physics Reanalysis. [Электронный ресурс]. 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).
7. Lovato T., Vichi M., Butenschon M. Coupling BFM with Ocean models: the NEMO model vol. 3.6 (Nucleus for the European Modelling of the Ocean), BFM Report Series. 2020. no. 2. 31 p.
8. Айвазян С. А., Мхитарян В. С. Прикладная статистика и основы эконометрики. М.: Юнити, 1998. 1022 с.
9. Клиге Р. К. Современные изменения уровня Мирового океана. Уровень берега и дно океана. М.: Наука, 1978. С. 136–180.
10. Добровольский С.Г. Климатические изменения в системе «гидросфера-атмосфера». М.: Геос, 2002. 232 с.
11. Нестеров Е. С. Экстремальные циклоны над морями европейской части России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 1(367). С. 97–115.
12. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Североатлантическое колебание и увлажнение Европейской территории России // Общество. Среда. Развитие. 2014. № 2. С. 190–197.
13. North Atlantic Oscillation (NAO). [Electronic resource]. URL: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/nao/>

### FEATURES OF LONG-TERM VARIATIONS IN THE AVERAGE LEVEL OF THE BLACK SEA (BY RESULTS OF GLORYS12V.1 REANALYSIS)

*Kholoptsev A. V.<sup>1,2</sup>, Podporin S. A.<sup>2</sup>, Kurochkin L. E.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Sevastopol office of federal state budgetary institution "State Oceanographic Institute of N. N. Zubov", Sevastopol, Russian Federation*

*<sup>2</sup>FSAEI "Sevastopol state university", Sevastopol, Russian Federation*

*E-mail: kholoptsev@mail.ru, SAPodporin@sevsu.ru, l.kurochkin.mj@mail.ru*

This paper aims to assess the applicability of GLORYS12.v1 global reanalysis for estimation of monthly and annual mean levels of the Black Sea. The reanalysis results are tested through comparison with the actual sea level monitoring results at tide gauge stations. Some significant features of long-term variations in the average level of the Black Sea are identified based on the results of the reanalysis application.

Substantiating the importance of the raised issue, we point out that long-term level variations of the Black Sea not only significantly affect the process of coastal reshaping but also account for changes in ecological conditions of its coastal zones and marine fairway depths. Identifying features and patterns of such variations should be of key interest for the coastal countries, such as Russia, Ukraine, Turkey, Bulgaria, Romania, Georgia.

Sea level changes are monitored by use of direct measurements with help of tide gauges, as well as by satellite radar altimetry methods. These techniques, however, are not available throughout the whole area of the sea in question, nor can they be accessed at any time. Hence, mathematical modelling of sea topography implemented in global reanalyses is becoming increasingly important for studying long-term sea level variations. However, application of a particular reanalysis dataset for a particular sea needs to be verified prior to commencing the studies.

This paper aims to describe the results of studying sea topography variations of the Black Sea using one of the most popular reanalyses — GLORYS12.v1. Its applicability is tested by means of comparison with the actual measurement results at several tide gauges. Applying the correlation analysis techniques including Student's t-test, we confirm the existence of a stable correlation between real measurements and the results of the reanalysis. Hence, we conclude that it can be used provided some systematic errors are allowed for.

A period from 1993 to 2018 is studied. All coordinate grid points available in the reanalysis database are analyzed (total of 7 225 points).

The most significant features of the sea level variations have been found as follows:

Rising trends exist in all months and years. This fact can most likely be attributed to the warming of the local climate, which in turn is responsible for rise in water temperature, surface water volume, as well as eustatic increase in sea level, which is most notable in April–July.

Significant quasiharmonic components with periodicity of 3–5 and 12–14 years have been found in December–May and July, as well as for the whole year. The reason for this may lie in corresponding variations in cyclonic frequency over the Black Sea, which, in turn, is significantly affected by the North Atlantic Oscillation (NAO) state. Hence, it is safe to assume that long term variations in the NAO index can be significantly correlated with the Black Sea level.

In the nearest decade, despite the identified rising trends in the Black Sea level, it is likely that the monthly and annual mean sea levels will tend to drop.

**Keywords:** Black sea, level, reanalysis, GLORYS12.v1, long-term variations, systematic and absolute errors

### References

1. Goryachkin Yu. N., Ivanov V. A. Uroven' Chernogo morya: proshloe, nastoyashchee i budushchee (Black Sea Level: Past, Present and Future), (ed.) V. N. Eremeev. Sevastopol': Morskoy gidrofizicheskij institut NAN Ukrainy (Publ.), 2006, 210 p. (in Russian).
2. Kaplin P. A., Pavlidis YU. A., Selivanov A. O. Prognoz razvitiya beregovoj zony morej Rossii v usloviyah povysheniya ih urovnya i potepeniya klimata (Forecast of the development of the coastal zone of the seas of Russia in conditions of increasing their level and climate warming). Chelovechestvo i

ОСОБЕННОСТИ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДНЕГО УРОВНЯ  
ЧЁРНОГО МОРЯ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РЕАНАЛИЗА GLORYS12v.1)

---

- beregovaya zona Mirovogo okeana v XXI veke: 20th Mezhdunar. konf., posvyashch. 90-letiyu V. P. Zenkovicha (Feb. 4–5, 2000), Moscow, 2001, pp. 16–28. (in Russian).
3. Cazenave A. et al. Interannual sea level change at global and regional scales using Jason-1 altimetry [Electronic resource]. URL: <https://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/kiosque/newsletter/news08/cazenave.pdf>
  4. Gansvind I. N. Sovremennye kosmicheskie tekhnologii izucheniya Zemli kak sistemy (Modern space technologies for studying the Earth as a system). Elektronnye biblioteki, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 39–49. (in Russian).
  5. NCEI OSTM/Jason-2 and Jason-3 Satellite Products Archive. [Electronic resource]. URL: <https://www.nodc.noaa.gov/sog/jason/>
  6. Global Ocean Physics Reanalysis. [Electronic resource]. URL: [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).
  7. Lovato T., Vichi M., Butenschon M. Coupling BFM with Ocean models: the NEMO model vol. 3.6 (Nucleus for the European Modelling of the Ocean), BFM Report Series, 2020, no. 2. 31 p.
  8. Ajvazyan S. A., Mhitaryan V. S. Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki (Applied Statistics and Bases of Econometrics). Moscow: Unity (Publ.), 1998, 1022 p. (in Russian).
  9. Klige R. K. Sovremennye izmeneniya urovnya Mirovogo okeana. Uroven' berega i dno okeana (Modern changes in sea level. Shore level and ocean floor). Moscow: Nauka (Publ.), 1978, pp. 136–180 (in Russian).
  10. Dobrovol'skij S.G. Klimaticheskie izmeneniya v sisteme "gidrosfera-atmosfera" (Climatic changes in the "hydrosphere-atmosphere" system). Moscow: Geos (Publ.), 2002, 232 p. (in Russian).
  11. Nesterov E.S. Ekstremal'nye ciklony nad moryami evropejskoj chasti Rossii (Extreme cyclones over the seas of the European part of Russia), Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy, 2018, no. 1 (367), pp. 97–115. (in Russian).
  12. Malinin V. N., Gordeeva S. M. Severoatlanticheskoe kolebanie i uvlazhnenie Evropejskoj territorii Rossii (North Atlantic Oscillation and Humidification of the European Territory of Russia), Obshchestvo. Sreda. Razvitie. 2014, no. 2, pp. 190–197. (in Russian).
  13. North Atlantic Oscillation (NAO). [Electronic resource]. URL: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/nao/>

*Поступила в редакцию 15.02.2021*