

## Климатические спектры колебаний уровня Азовского моря

Б. В. Дивинский<sup>1</sup> ✉, В. В. Фомин<sup>2</sup>, Р. Д. Косьян<sup>1</sup>, Н. Н. Дьяков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

<sup>3</sup> Севастопольское отделение Государственного океанографического института  
им. Н. Н. Зубова, Севастополь, Россия  
✉ [divin@ocean.ru](mailto:divin@ocean.ru)

Поступила в редакцию 09.03.2023; одобрена после рецензирования 17.04.2023;  
принята к публикации 05.07.2023.

### Аннотация

**Цель.** Цель работы – исследование климатических колебаний уровня Азовского моря на масштабах мезомасштабной и синоптической изменчивости.

**Методы и результаты.** Исходными данными для анализа служат ежечасные возвышения уровня на акватории моря с 1979 по 2020 г., полученные методами численного моделирования с использованием объединенной гидродинамической (ADCIRC) и волновой (MIKE 21 SW) моделей. Определены основные гармоники колебания уровня моря в диапазонах мезомасштабной и синоптической изменчивости, а также оценены пространственные и сезонные особенности колебаний.

**Выводы.** Основные колебания уровня моря в диапазонах синоптической и мезомасштабной изменчивости сосредоточены на следующих периодах (в сутках): 0,5; 1; 1,8–2,5; 3–5; 5,5–7; 8,5–11; 12,5–13,5; 14,5–17. Колебания уровня с периодами, превышающими двое суток, имеют вид одноузловой сейши с максимумами амплитуд в прибрежной зоне двух противоположных районов: на юго-западе моря (вдоль Арабатской косы) и на северо-востоке (от Ясенской до Белосарайской кос). Условно центральная линия сейши проходит от Темрюкского залива через центр моря к заливу между Обиточной и Бердянской косами. В случае полусуточных колебаний центральная линия колебаний проходит от середины Арабатской косы через центр моря до косы Долгой. Колебания уровня с периодами, превышающими двое суток, наблюдаются в основном в весенне-осенний сезоны, а именно с марта по апрель и с сентября по ноябрь. Суточные колебания практически не зависят от сезона. Полусуточные гармоники наиболее выражены весной и осенью, значительно ослабевая в летние месяцы. Колебания уровня моря и зональная компонента скорости ветра обладают высокими коэффициентами когерентности во всем диапазоне частотно-временной изменчивости. Связь между колебаниями уровня и меридиональной компонентой скорости ветра проявляется в основном в суточных и полусуточных циклах.

**Ключевые слова:** численное моделирование, Азовское море, колебания уровня, спектры, климатическая изменчивость

**Благодарности:** постановка задачи и математическое моделирование выполнены в рамках проекта РНФ № 20-17-00060. Вычислительная часть исследований проведена в рамках темы госзадания ФГБУН ФИЦ МГИ № FNNN-2021-0005. Анализ результатов выполнен в соответствии с темой госзадания ИО РАН № FMWE-2021-0013.

**Для цитирования:** Климатические спектры колебаний уровня Азовского моря / Б. В. Дивинский [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 5. С. 584–598. EDN BFLGTJ.

## Climatic Spectra of Surface Elevation Fluctuations in the Sea of Azov

B. V. Divinsky <sup>1</sup> ✉, V. V. Fomin <sup>2</sup>, R. D. Kosyan <sup>1</sup>, N. N. Dyakov <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

<sup>3</sup> Sevastopol Branch of the N. N. Zubov State Oceanographic Institute, Sevastopol, Russia

✉ divin@ocean.ru

### Abstract

**Purpose.** The article is purposed at studying climatic fluctuations of the Azov Sea level on the scales of mesoscale and synoptic variability.

**Methods and Results.** Hourly sea level rises in 1979–2020 obtained by the methods of numerical modeling using the coupled hydrodynamic (ADCIRC) and wave (MIKE 21 SW) models constitute the initial data for the analysis. The basic harmonics of sea level oscillations in the ranges of mesoscale and synoptic variability were determined, and spatial and seasonal characteristics of the oscillations were assessed.

**Conclusions.** Main sea level oscillations in the ranges of synoptic and mesoscale variability are concentrated in the following periods (within a day): 0.5; 1; 1.8–2.5; 3–5; 5.5–7; 8.5–11; 12.5–13.5; 14.5–17. Sea level fluctuations with the periods exceeding two days have a form of a uninodal seiche whose amplitude maxima are in the coastal zone of two opposite areas: in the southwest of the sea (along the Arabat Spit) and in the northeast region (from the Yasenskaya to the Belosarayskaya spits). The seiche central line runs conventionally from the Temryuk Bay through the sea center to the bay between the Obitochnaya and the Berdyansk spits. In the case of semi-diurnal variations, the central line of fluctuations runs from the middle of the Arabat Spit through the sea center to the Dolgaya Spit. The level fluctuations with the periods exceeding two days are observed mainly in spring and autumn, namely from March to April and from September to November. Diurnal variations are virtually independent of the season. Semi-diurnal harmonics are most pronounced in spring and autumn, and weaken considerably in the summer months. The sea level fluctuations and the zonal component of wind speed have high coherence coefficients over the entire range of frequency-time variability. The relationship between the sea level fluctuations and the meridional component of wind speed is manifested mainly in the diurnal and semidiurnal cycles.

**Keywords:** numerical modeling, Sea of Azov, level fluctuations, spectra, climatic variability

**Acknowledgements:** The problem statement and mathematical modeling were carried out within the framework of the RSF project No. 20-17-00060. The computational part of the research was carried out within the framework of state assignment of the FSBSI FRC MHI No. FN NN-2021-0005. The results were analyzed in accordance with the theme of state assignment of IO RAS No. FMWE-2021-0013.

**For citation:** Divinsky, B.V., Fomin, V.V., Kosyan, R.D. and Dyakov, N.N., 2023. Climatic Spectra of Surface Elevation Fluctuations in the Sea of Azov. *Physical Oceanography*, 30(5), pp. 549-562.

### Введение

Основными факторами, определяющими уровень режим Азовского моря, выступают непосредственное ветровое воздействие, колебания атмосферного давления, ветровое волнение, волновые и штормовые нагоны, речной сток, приливные движения. Кроме этого, уровень моря подвержен влиянию местных морфодинамических и батиметрических особенностей, а также зависит от ледового покрытия акватории в зимний период.

К настоящему времени наиболее изученными являются свободные (сейшевые) колебания уровня бассейна, т. е. колебания в диапазоне периодов от

нескольких до десятков часов [1–6]. В монографии <sup>1</sup> на основании анализа инструментальных наблюдений в двенадцати пунктах по периметру Азовского моря определены первые три моды колебаний уровня с периодами около 24, 15 и 12,5 ч. В диссертационной работе Ю. В. Манилюка <sup>2</sup>, целиком посвященной сейшевым и сгонно-нагонным явлениям Азовского моря, расчетным путем оценены периоды собственных колебаний моря в 27,9; 16,3 и 12,5 ч. Иные периоды первых мод колебаний, составляющие 38,4; 23,7 и 12,1 ч, приведены в статьях [7, 8]. Интересный взгляд на природу суточных и полусуточных колебаний уровня предложен в работах [9, 10], в которых анализируется вклад в колебания уровня гравитационных и радиационных (термических) приливов и сделан вывод о преобладании в северной части моря гравитационных приливов, а в южной – смешанных, гравитационно-радиационных.

В любом случае, как показали исследования, природа колебаний уровня мелководного и сравнительно незначительного по размерам Азовского моря носит комплексный характер. Гидродинамические факторы, определяющие колебания уровня, в высшей степени взаимосвязаны.

Указанными обстоятельствами определяются цели настоящей работы:

1) построение климатических спектров колебаний возвышения уровня и анализ спектральной структуры в диапазонах мезо- и синоптической изменчивости,

2) оценка пространственных особенностей колебаний уровня на акватории Азовского моря,

3) исследование внутригодовой (сезонной) изменчивости колебаний.

Основной метод исследований – численное моделирование.

### **Материалы и методы**

Результаты исследований, изложенные во введении, базировались, как правило, на рассмотрении неких искусственных ситуаций (стационарный ветер, прохождение циклона над акваторией и т.д.), оправданных с точки зрения постановки конкретной задачи, но все же несколько упрощенных. Наша основная цель – анализ климатических спектров возвышений уровня, сформированных под влиянием большого числа разнообразных взаимосвязанных факторов, другими словами, получение реальной климатической картины колебаний уровня.

В отсутствие достаточно продолжительных, непрерывных, географически разнесенных, с приемлемой временной дискретностью данных прямых натуральных наблюдений за уровнем моря единственным, пожалуй, средством исследований выступает численное моделирование. В рамках численного моделирования возможен корректный учет всех основных механизмов взаимодействия атмосферных условий, системы течений, поверхностного волнения, волновых и штормовых нагонов.

---

<sup>1</sup> Герман В. Х., Левиков С. П. Вероятностный анализ и моделирование колебаний уровня моря. Ленинград : Гидрометеоздат, 1988. 231 с.

<sup>2</sup> Манилюк Ю. В. Сейшевые и сгонно-нагонные колебания в Черном и Азовском морях : дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Севастополь, 2021. 168 с.

В нашем распоряжении имеются рассчитанные за 42 года (с 1979 по 2020 г.) поля основных гидродинамических параметров Азовского моря, полученные с применением объединенной трехмерной гидродинамической и спектральной волновой моделей [11]. Кратко остановимся на основных подходах, используемых при моделировании динамики вод Азовского моря:

1. Выборка необходимых полей атмосферного форсинга (приземного давления, компонентов скорости ветра), а также концентрации льда на акватории моря производится из общедоступной базы данных *ERA5*, предоставляемой Европейским центром среднесрочных прогнозов (*ECMWF*). Расчетная область:  $34,75^{\circ}$ – $39,50^{\circ}$  в. д.,  $45,25^{\circ}$ – $47,50^{\circ}$  с. ш. Пространственные шаги по широте и долготе составляют  $0,125^{\circ}$ ; по времени – 3 ч для полей атмосферного давления и ветра, одни сутки – для концентрации льда. Расчетная сетка (рис. 1) построена на основе современной батиметрической карты Азовского моря [12].



**Р и с. 1.** Батиметрическая карта, морфометрические особенности Азовского моря, а также положение экспериментальных и расчетных станций анализа уровня

**F i g. 1.** Bathymetric map, morphometric features of the Azov Sea, and location of the experimental and calculated stations for analyzing the level

2. Параметры ветрового волнения рассчитываются с использованием спектральной волновой модели *MIKE 21 SW*. Проведена тщательная верификация модели для условий Черного и Азовского морей [13]. На основе 5-слойной  $\sigma$ -координатной (по вертикали) трехмерной гидродинамической модели *ADCIRC* получены поля параметров морских течений и возвышений уровня. Данная модель показала свою эффективность при исследованиях экстремаль-

ных штормовых нагонов в Азовском море [14]. Объединение гидродинамической и волновой моделей в единый расчетный блок позволяет учитывать важнейшие аспекты взаимодействия течений и поверхностного волнения.

Поскольку цель работы – исследование климатической изменчивости уровня моря, объединенная модель должна быть верифицирована по достаточно продолжительным экспериментальным данным. Здесь мы сталкиваемся с определенными трудностями. Во-первых, несмотря на довольно густую сеть наблюдений за уровнем Азовского моря, сами данные не лишены ряда недостатков, к примеру в данных присутствуют пропуски, исключающие возможность корректной интерполяции, разная частота измерений, неодинаковая и не всегда совершенная приборная база. Во-вторых, ледовые карты, доступные в реанализе ERA5, могут (с неизбежной, пожалуй, вероятностью) отличаться от реальных наблюдаемых, что влечет за собой ошибки в расчетах уровня моря. Исходя из этого, для дальнейшего анализа сформированы выборки, состоящие из ежечасных отметок уровня за девять безледных месяцев (март – ноябрь) каждого из восьми лет наблюдений в следующих пунктах: Геническе, Мариуполе, Опасном (1997–2004 гг.), Темрюке (1980, 1982–1986, 1988, 1989 гг.) Для сравнения с экспериментальными данными за эти же сроки образованы расчетные ряды возвышений уровня дискретностью также в 1 ч.

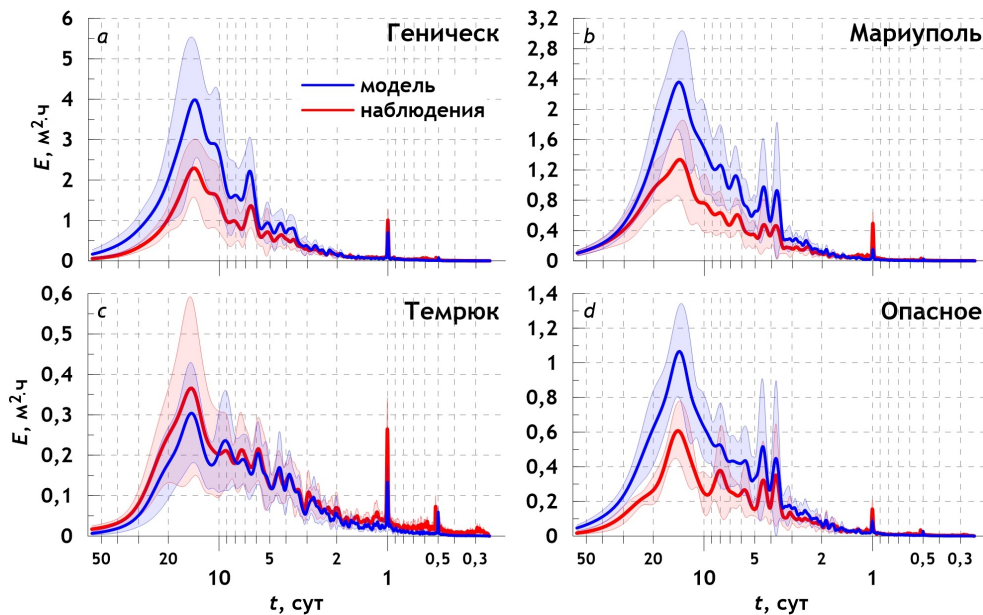
Анализ климатической изменчивости выполнен на основании расчетных данных за весь доступный период, с 1979 по 2020 г., в 29 точках, покрывающих основную акваторию Азовского моря (рис. 1). Поскольку зимние месяцы не рассматриваются, из анализа исключена межгодовая изменчивость. Необходимые вычисления проведены в среде *Matlab* с использованием периодограммного метода Уэлча.

### Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены осредненные за восемь лет экспериментальные и расчетные спектры колебаний уровня в Геническе, Мариуполе, Темрюке и Опасном. Заштрихованные области на рис. 2 соответствуют 95%-ным доверительным интервалам.

Как следует из рис. 2, колебания уровня, присутствующие как в экспериментальных, так и в модельных рядах возвышения свободной поверхности, почти синхронны. Модель корректно воспроизводит основные спектральные пики на периодах синоптических и мезомасштабных колебаний. Небольшое различие просматривается в амплитудах колебаний. Энергия синоптических колебаний с периодами, превышающими 2–3 сут, для модельных рядов несколько больше, чем для экспериментальных. Обратная картина наблюдается в диапазоне колебаний с периодами 12–48 ч, что связано, вполне возможно, с довольно грубым пространственным и временным разрешением исходных полей ветра, представляемым реанализом ERA5. Глобальный реанализ недостаточно учитывает локальные мелкомасштабные атмосферные особенности, в частности, возникающие на границе раздела море – суша. Заметим также, что рассмотрение экспериментальных данных в качестве некоего эталона является, по сути, вынужденной мерой. Несмотря на относительную конструктивную простоту, используемые на гидрометеостанциях мареографы требуют обязательного и тщательного обслуживания. Ни в коем случае не ставя под

сомнение квалификацию персонала, напоминаем, что не следует забывать о возможных объективных источниках ошибок (износ и люфт механизмов, состояние колодцев и пр.). Таким образом, исходя из рис. 2, заключаем, что гидродинамическая модель достаточно корректно воспроизводит основные закономерности формирования уровня Азовского моря и может служить инструментом дальнейших исследований.

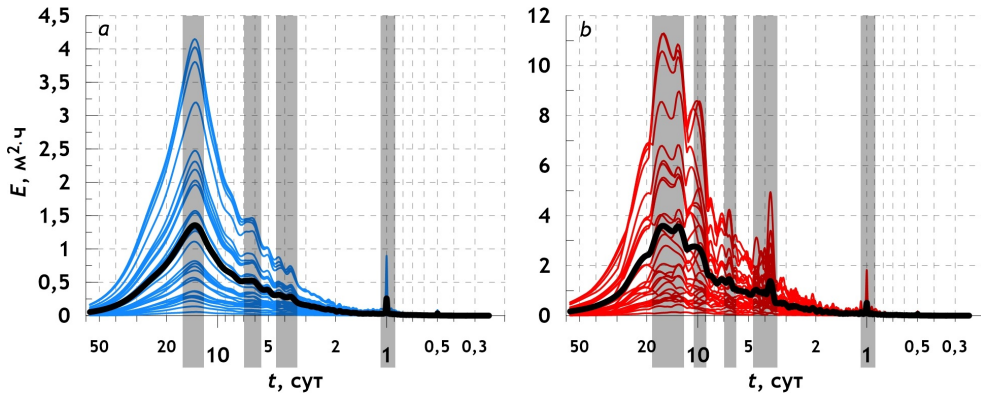


**Рис. 2.** Среднегодовые экспериментальные (красные линии) и модельные (синие линии) спектры колебаний уровня за безледный период в выбранных пунктах Азовского моря

**Fig. 2.** Mean annual experimental (red lines) and model (blue lines) spectra of level fluctuations over the ice-free period in the selected points of the Azov Sea

Для каждой из 29 выбранных точек (рис. 1) получены 42 спектра, характеризующие колебания уровня за период с марта по ноябрь каждого года с 1979-го по 2020-й. Статистическая обработка этих спектров дает возможность построить средние и максимальные климатические спектры колебаний. На рис. 3 представлены рассчитанные для всех 29 точек средние (рис. 3, *a*) и максимальные (рис. 3, *b*) спектры.

Средние спектры (рис. 3, *a*) сильно сглажены и демонстрируют, по сути, две основные особенности: доминирующие колебания в диапазоне периодов 12–16 сут с основным пиком в районе 13,5 сут, а также устойчивые суточные колебания и флуктуации с периодами 5,5–7,0 и 3,5–4,5 сут. Указанные гармоники, но со своими особенностями гораздо сильнее выражены на максимальных спектрах (рис. 3, *b*). Основная энергия колебаний сосредоточена в промежутке 12,4–18,3 и 8,9–10,4 сут. Хорошо различимы пики в диапазонах 6–7 и 3,4–4,7 сут, а также суточный цикл. Крайне слабая в абсолютном выражении полусуточная гармоника проявляется тем не менее и на средних, и на максимальных спектрах.



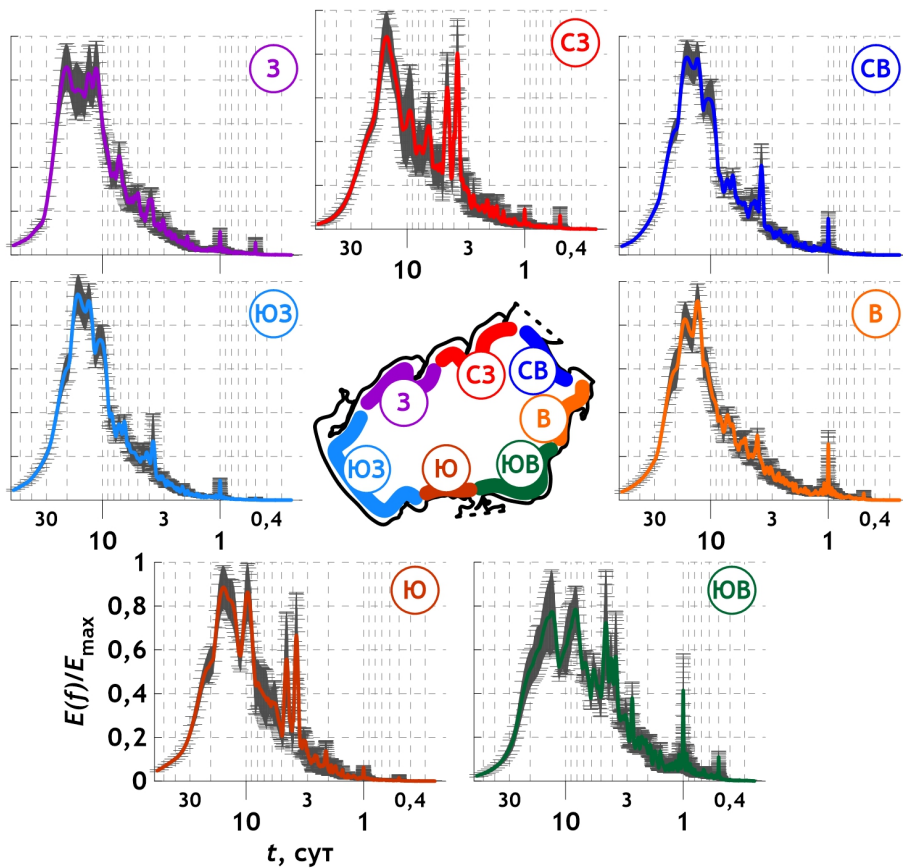
**Р и с. 3.** Средние (а) и максимальные (b) спектры колебаний уровня за период с 1979 по 2020 г. в 29 точках акватории моря

**F i g. 3.** Mean (a) and maximum (b) spectra of sea level fluctuations for the period from 1979 to 2020 at 29 points in the sea area

Черные линии на рис. 3, соответствующие осредненным по всем 29 точкам спектрам, свидетельствуют о том, что отмеченные периоды колебаний характерны для всей акватории моря. Выясним, существуют ли пространственные особенности формирования спектров колебаний уровня. Анализ максимальных спектров в соседних точках позволил выявить участки побережья Азовского моря со сходными спектральными структурами колебаний. На рис. 4 представлены осредненные максимальные спектры и их 95%-ные доверительные интервалы, характеризующие закономерности в флуктуациях уровня в диапазонах синоптической и мезомасштабной изменчивости прибрежной зоны моря. Спектры нормализованы, поскольку так удобнее оценивать соотношение амплитуд колебаний на разных частотах. Заметим также, что принятые наименования участков, естественно, несколько условны. На рис. 5 в иллюстративной форме отражены основные периоды, соответствующие пикам спектральных плотностей на рис. 4.

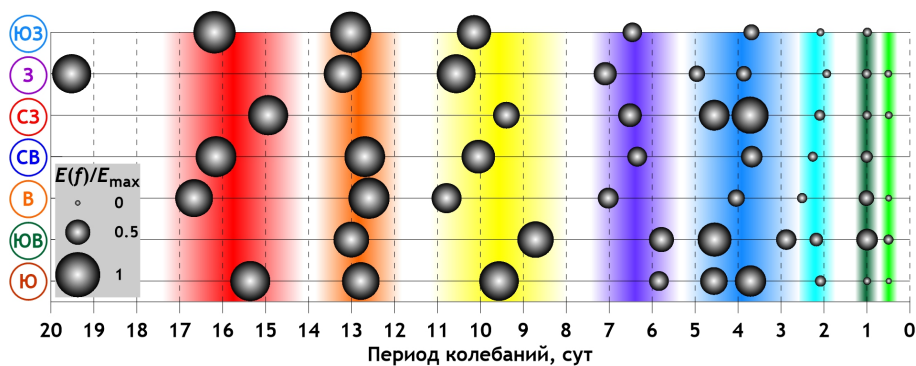
Как следует из рис. 4, основные колебания уровня моря в диапазонах синоптической и мезомасштабной изменчивости сосредоточены на следующих периодах (в сутках): 0,5; 1; 1,8–2,5; 3–5; 5,5–7; 8,5–11; 12,5–13,5; 14,5–17. Полусуточные колебания – самые незначительные по амплитуде, и при этом они почти незаметны лишь в двух противоположных районах: на юго-западе и северо-востоке моря. Двухсуточные колебания довольно слабые по всей акватории моря. Сильные суточные колебания, сравнимые по мощности с остальными пиками, наблюдаются на юго-востоке моря, цикличностью в 3–5 сут – на северо-западе, юго-востоке и юге. Во всей прибрежной зоне моря хорошо выражены колебания на периодах в 5,5–7 и 8,5–11 сут. Устойчивые колебания с периодами в 12,5–13,5 сут наблюдаются практически везде, кроме северо-запада. Флуктуации с периодами, превышающими 15 сут, сосредоточенные в основном в диапазоне 15–17 сут, характерны для всего моря, исключая юго-восток. При этом наибольшие периоды колебаний (почти 20 сут) обнаруживаются на западе моря. Отметим важную деталь. Вряд ли уместны утверждения о полном отсутствии колебаний на тех или иных частотах. Речь

идет о наличии (или отсутствии) явных пиков на осредненных (климатических) спектрах.



Р и с. 4. Пространственные особенности климатических максимальных спектров колебаний уровня

Fig. 4. Spatial features of the climatic maximum spectra of sea level fluctuations

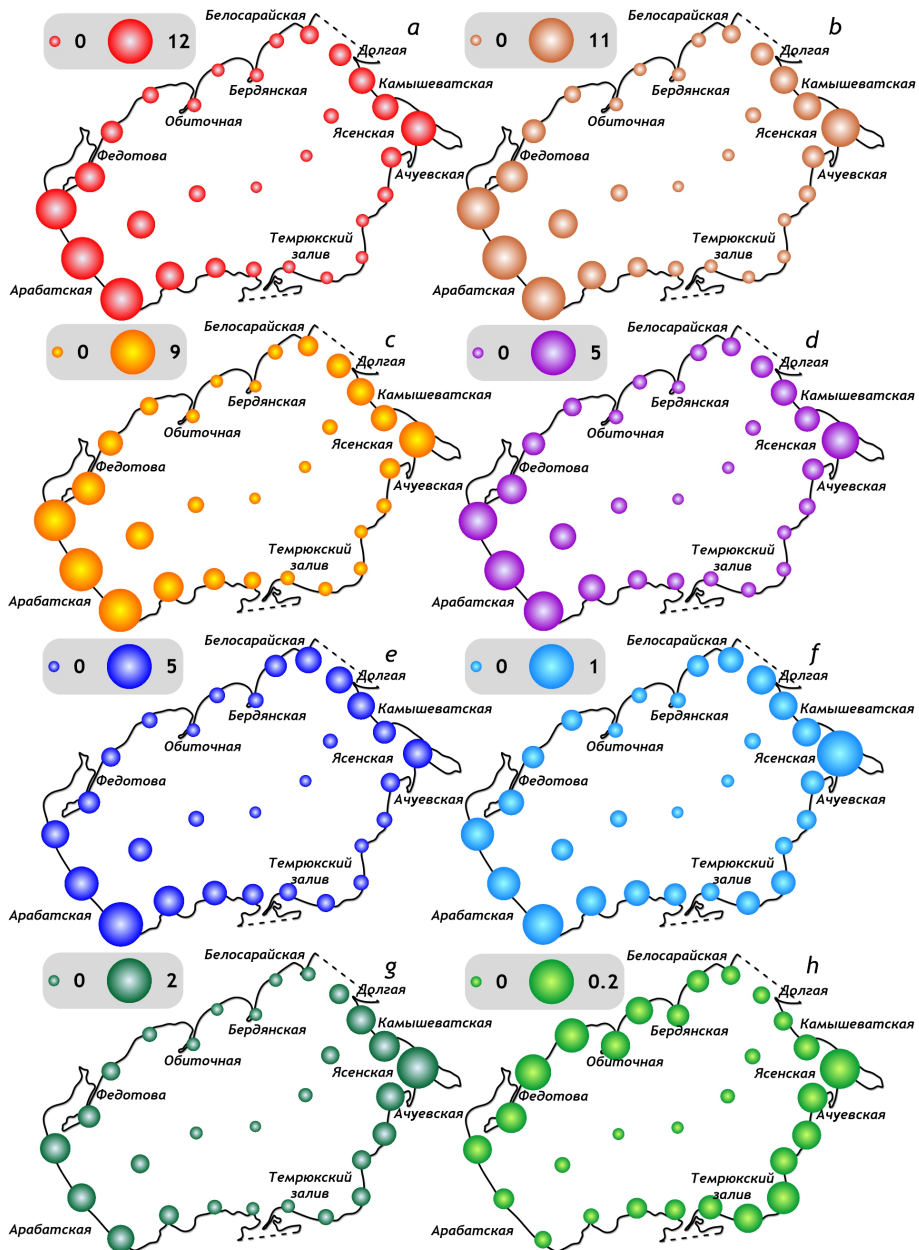


Р и с. 5. Основные периоды колебаний уровня в прибрежной зоне Азовского моря

Fig. 5. Main periods of sea level fluctuations in the Azov Sea coastal zone



Пространственная структура климатических колебаний уровня Азовского моря представлена на рис. 6. Здесь отображены максимальные значения спектральных плотностей по диапазонам временной изменчивости (в сутках): больше 14,5; 12,5–13,5; 8,5–11; 5,5–7; 3–5; 1,8–2,5; 1; 0,5.



**Рис. 6.** Максимальные спектральные плотности ( $\text{м}^2\cdot\text{ч}$ ) на периодах колебаний (сут): *a* – 14,5–17; *b* – 12,5–13,5; *c* – 8,5–11; *d* – 5,5–7; *e* – 3–5; *f* – 1,8–2,5; *g* – 1; *h* – 0,5

**Fig. 6.** Maximum spectral densities ( $\text{m}^2\cdot\text{h}$ ) for the fluctuation periods (day): *a* – 14.5–17; *b* – 12.5–13.5; *c* – 8.5–11; *d* – 5.5–7; *e* – 3–5; *f* – 1.8–2.5; *g* – 1; *h* – 0.5

Самыми сильными в общей структуре синоптической и мезомасштабной изменчивости являются колебания с периодами, превышающими 14,5 сут (рис. 6, *a*). С ними в целом сравнимы несколько меньшие по амплитуде колебания с периодами 12,5–13,5 (рис. 6, *b*) и 8,5–11 (рис. 6, *c*) сут. Мощности колебаний на периодах в 5,5–7 (рис. 6, *d*) и 3–5 (рис. 6, *e*) сут почти одинаковы. Циклы колебаний с периодами 1,8–2,5 сут (рис. 6, *f*) в два раза меньше суточных (рис. 6, *g*). Самыми слабыми являются полусуточные колебания (рис. 6, *h*), на порядок уступающие по величине суточным.

Как следует из рис. 6, в пространственном выражении колебания уровня с периодами больше двух суток имеют фактически вид одноузловой сейши с максимумами амплитуд в прибрежной зоне двух противоположных районов: на юго-западе моря, вдоль Арабатской косы, и на северо-востоке, от Ясенской косы до Белосарайской. Центр сейши проходит от Темрюкского залива через центр моря к заливу между Обиточной и Бердянской косами. При этом колебания на юго-западе в целом несколько мощнее колебаний на северо-востоке, исключая диапазон периодов 1,8–2,5 сут с явным максимумом в районе Ясенской косы.

Аналогичная пространственная картина наблюдается и для суточных колебаний, но в этом случае максимумы колебаний смещаются к северу для юго-запада акватории и к югу для северо-востока. Суточные колебания доминируют на севере Арабатской косы и косе Федотова, а также вдоль Ачуевской, Ясенской и Камышеватской кос.

В случае полусуточных колебаний ситуация несколько иная (рис. 6, *h*). Центральная линия колебаний проходит от середины Арабатской косы через центр моря до косы Долгой. Максимумы полусуточных колебаний сильнее всего проявляются в западной части моря между косами Федотова и Обиточной, и в восточной, между Темрюкским заливом и Ясенской косой.

Колебания уровня Азовского моря имеют ярко выраженную сезонную изменчивость. На рис. 7 представлены осредненные за период с 1979 по 2020 гг. вейвлет-спектры колебаний уровня в прибрежной зоне. Для каждого из участков побережья спектры нормализованы на максимальные значения, что дает возможность оценить вклад спектральных компонент в формирование общего спектра каждого конкретного участка.

Как следует из рис. 7, колебания уровня с периодами, превышающими двое суток, наблюдаются в основном в весенне-осенний сезоны, а именно с марта по апрель и с сентября по ноябрь. При этом наибольший вклад в синоптическую изменчивость вносят процессы, проистекающие в марте и ноябре. Самые значительные и, что характерно, не зависящие практически от сезона суточные колебания проявляются на юго-востоке, а также в меньшей степени на северо-востоке моря. Полусуточная гармоника лучше всего заметна в спектрах колебаний уровня западной, северо-западной, а также противоположных юго-восточной и южной частей моря. При этом полусуточные гармоники также наиболее выражены весной и осенью, значительно ослабевая в летние месяцы.

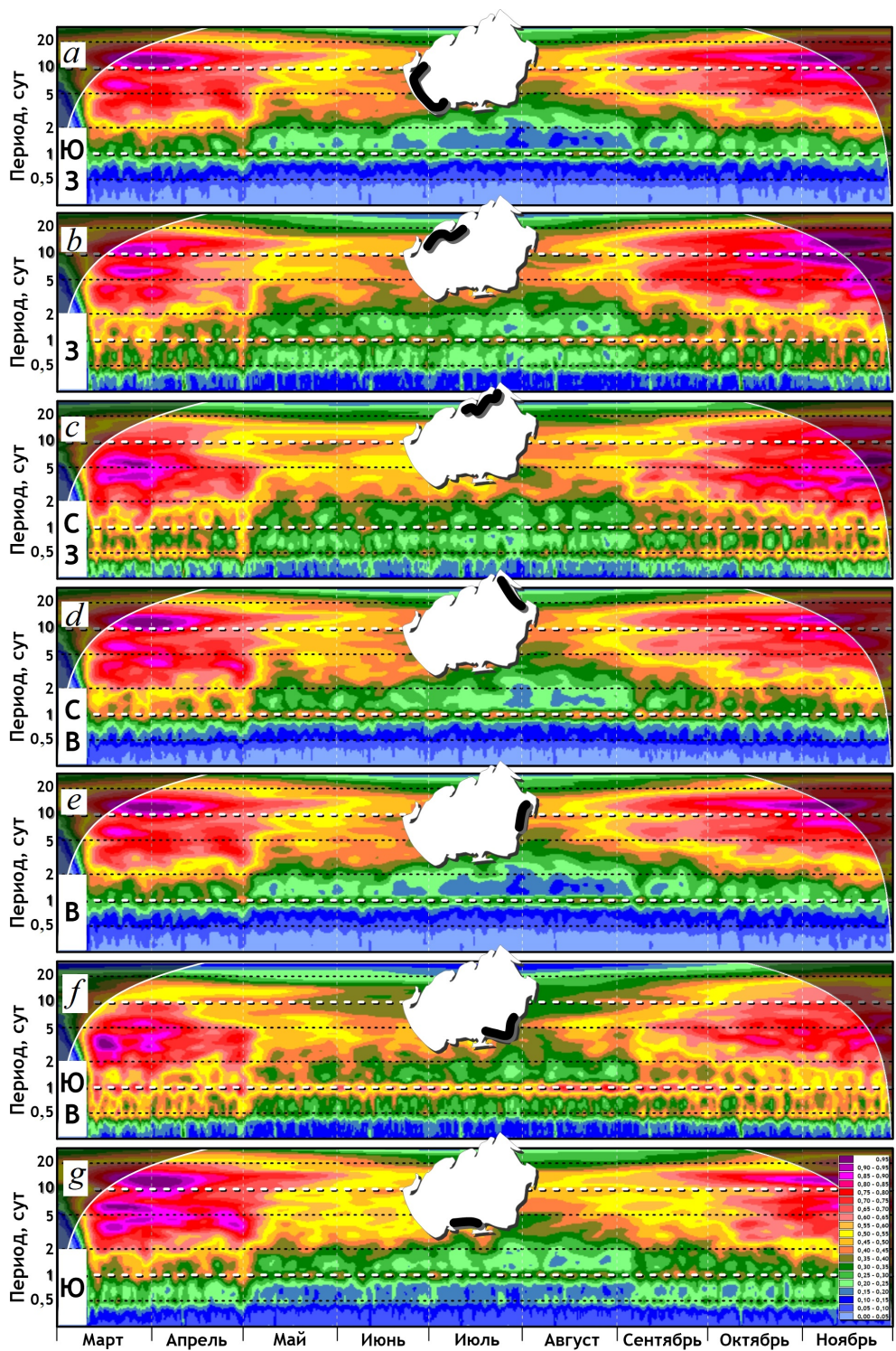
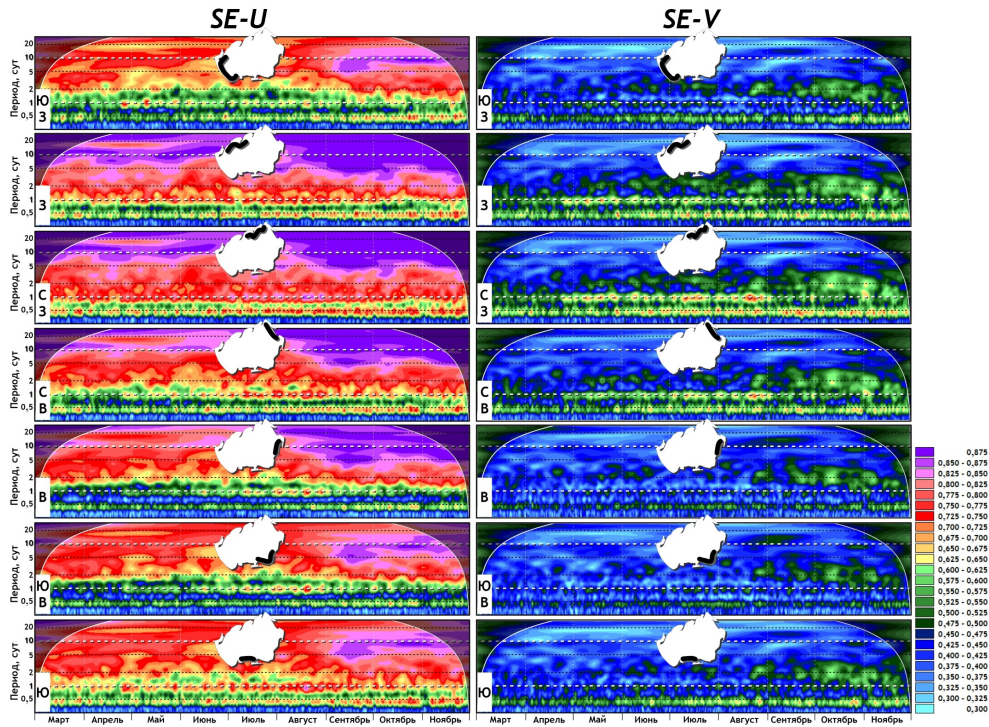


Рис. 7. Нормализованные климатические вейвлет-спектры колебаний уровня моря  
 Fig. 7. Normalized climatic wavelet spectra of sea level fluctuations

На рис. 8 представлены когерентности между колебаниями уровня моря и горизонтальными компонентами скорости приземного ветра. Рис. 8 показывает, что колебания уровня моря и зональная компонента скорости ветра ( $U$ ) обладают высокими коэффициентами когерентности во всем диапазоне частотно-временной изменчивости. При этом осенью когерентность  $SE - U$  несколько выше, чем в весенние и летние месяцы. Самые высокие значения коэффициента когерентности пары  $SE$  и  $U$  наблюдаются на периодах колебаний, превышающих 5 сут.



**Р и с. 8.** Когерентности между колебаниями уровня моря  $SE$  и  $U$ ,  $V$ -компонентами скорости ветра

**F i g. 8.** Coherence between the sea level fluctuations  $SE$  and the  $U$ ,  $V$ -components of wind speed

Связь между колебаниями уровня и меридиональной компонентой скорости ветра  $V$  проявляется в основном в суточных и полусуточных циклах. На этих временных масштабах особенно сильна когерентность между  $SE$  и  $V$  в западной, северо-западной и северо-восточной частях моря. В отличие от пары  $SE - U$ , когерентность между  $SE$  и  $V$  на периодах больше 5 сут довольно слабая, а на периодах меньше 5 сут заметна лишь в осенний сезон.

### Выводы

Цель настоящей работы – исследования климатических колебаний уровня Азовского моря на масштабах синоптической и мезомасштабной изменчивости. Основной метод исследований – математическое моделирование с исполь-

зованием объединенной гидродинамической и волновой моделей. Модель верифицирована по данным наблюдений на четырех прибрежных гидрометеостанциях (Геническ, Мариуполь, Опасное, Темрюк). Исходными данными анализа служат ежечасные возвышения уровня моря с марта по ноябрь за 42 года (с 1979 по 2020 г.)

Суммируем результаты проведенной работы:

1. Основные колебания уровня моря в диапазонах синоптической и мезомасштабной изменчивости сосредоточены на следующих периодах (в сутках): 0,5; 1; 1,8–2,5; 3–5; 5,5–7; 8,5–11; 12,5–13,5; 14,5–17. При этом самыми сильными являются колебания с периодами, превышающими 14,5 сут. Несколько меньше по амплитуде колебания с периодами 12,5–13,5 и 8,5–11 сут. Мощности колебаний на периодах в 5,5–7 и 3–5 сут почти одинаковы. Циклы колебаний с периодами 1,8–2,5 сут в два раза меньше суточных. Самыми слабыми являются полусуточные колебания, на порядок уступающие по величине суточным.

2. Колебания уровня с периодами, превышающими двое суток, имеют вид одноузловой сейши с максимумами амплитуд в прибрежной зоне двух противоположных районов: на юго-западе моря (вдоль Арабатской косы) и на северо-востоке (от Ясенской до Белосарайской косы). Условно центральная линия сейши проходит от Темрюкского залива через центр моря к заливу между Обиточной и Бердянской косами. Эти же закономерности характерны и для суточных колебаний, но в этом случае максимумы колебаний смещаются к северу для юго-запада акватории и к югу для северо-востока. Суточные колебания доминируют на севере Арабатской косы и косе Федотова, а также вдоль Ачужевской, Ясенской и Камышеватской кос. В случае полусуточных колебаний картина меняется. Центральная линия колебаний проходит от середины Арабатской косы через центр моря до косы Долгой. Максимумы полусуточных колебаний сильнее всего проявляются в западной части моря (в заливе между косами Федотова и Обиточной) и в восточной (между Темрюкским заливом и Ясенской косой).

3. Для колебаний уровня Азовского моря весьма характерна сезонная изменчивость. Колебания уровня с периодами, превышающими двое суток, наблюдаются в основном в весенне-осенний сезоны, а именно с марта по апрель и с сентября по ноябрь. При этом наибольший вклад в синоптическую изменчивость вносят процессы, протекающие в марте и ноябре. Суточные колебания практически не зависят от сезона. Самые значительные из них проявляются на юго-востоке, а также в меньшей степени на северо-востоке моря. Полусуточные гармоники наиболее выражены весной и осенью, значительно ослабевают в летние месяцы.

4. Колебания уровня моря и зональная компонента скорости ветра обладают высокими коэффициентами когерентности во всем диапазоне частотно-временной изменчивости. Самые высокие значения коэффициента когерентности наблюдаются на периодах колебаний, превышающих 5 сут.

5. Связь между колебаниями уровня и меридиональной компонентой скорости ветра проявляется в основном в суточных и полусуточных циклах. Когерентность между ними на периодах больше 5 сут, довольно слабая, а на периодах меньше 5 сут заметна лишь в осенний сезон.

Небольшое замечание. Полученные результаты основаны на численном моделировании. Качество модели зависит в конечном счете от полноты учета физических процессов, формирующих уровенную поверхность моря. Мы используем объединенную гидродинамическую модель, учитывающую колебания атмосферного давления, непосредственное ветровое воздействие, поверхностное волнение, волновые и штормовые нагоны, приливные движения. За рамками модели остаются речной сток, термические характеристики водной среды, атмосферные условия (температура, влажность, облачность, солнечная радиация), влияющие, несомненно, на уровень Азовского моря. Тем не менее, как показали наши исследования, именно ветер и давление определяют колебания уровня моря в диапазонах синоптической и мезомасштабной изменчивости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моделирование длинных волн в Азовском море, вызываемых прохождением циклонов / В. Н. Еремеев [и др.] // *Океанология*. 2000. Т. 40, № 5. С. 658–665.
2. *Филиппов Ю. Г.* Свободные колебания уровня Азовского моря // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 2. С. 78–82. EDN OPLEGT.
3. *Иванов В. А., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я.* Исследование свободных колебаний уровня Азовского моря, возникающих после прекращения длительного действия ветра // *Морской гидрофизический журнал*. 2015 № 2. С. 15–25. EDN VDVCJ.
4. *Черкесов Л. В., Шульга Т. Я.* Исследование влияния параметров барических образований на свободные и вынужденные колебания уровня и течения в Азовском море // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 4. С. 13–26. EDN WINRBD.
5. *Черкесов Л. В., Шульга Т. Я.* Волны, течения, сгонно-нагонные процессы и трансформация загрязнений в Азовском море. Севастополь : ФГБУН МГИ, 2017. 228 с.
6. *Иванов В. А., Шульга Т. Я.* Влияние атмосферных фронтов на свободные и вынужденные колебания уровня Азовского моря // *Доклады Академии наук*. 2019. Т. 486, № 6. С. 737–741. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524866737-741>
7. *Матишов Г. Г., Инжебейкин Ю. И.* Численные исследования сейшевых колебаний уровня Азовского моря // *Океанология*. 2009. Т. 49, № 4. С. 485–493. EDN KWIFHR.
8. *Матишов Г. Г., Матишов Д. Г., Инжебейкин Ю. И.* Влияние сейш на формирование экстремальных уровней и течений в Азовском море // *Вестник Южного научного центра РАН*. 2008. Т. 4, № 2. С. 46–61. EDN KTMMMT.
9. *Корженовская А. И., Медведев И. П., Архипкин В. С.* Радиационные приливы в Азовском море // *Труды X Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2021)»*. Тверь : ООО «ПолиПРЕСС», 2021. Том I (III). С. 157–160. EDN NYLPBS.
10. *Корженовская А. И., Медведев И. П., Архипкин В. С.* Приливные колебания уровня Азовского моря // *Океанология*. 2022. Т. 62, № 5. С. 677–689. EDN AOZVNN. doi:10.31857/S0030157422050094
11. *Дивинский Б. В., Косьян Р. Д., Фомин В. В.* Климатические поля морских течений и ветрового волнения Азовского моря // *Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле*. 2021. Т. 501, № 1. С. 94–107. EDN ANVNAF. doi:10.31857/S2686739721090085
12. *Матишов Г. Г.* Геоморфологические особенности шельфа Азовского моря // *Вестник Южного научного центра РАН*. 2006. Т. 2, № 1. С. 44–48. EDN KVVSSX.
13. *Divinsky B., Kosyan R.* Parameters of wind seas and swell in the Black Sea based on numerical modeling // *Oceanologia*. 2018. Vol. 60, iss. 3. P. 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2017.11.006>

14. *Фомин В. В., Полозок А. А.* Технология моделирования штормовых нагонов и ветрового волнения в Азовском море на неструктурированных сетках // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2013. Вып. 27. С. 139–145. EDN VBFRPZ.

*Об авторах:*

**Дивинский Борис Васильевич**, ведущий научный сотрудник, лаборатория геологии и литодинамики, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-2452-1922**, **ResearcherID: C-7262-2014**, divin@ocean.ru

**Фомин Владимир Владимирович**, главный научный сотрудник, отдел вычислительных технологий и математического моделирования, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9070-4460**, v.fomin@mhi-ras.ru

**Косьян Рубен Дереникович**, заведующий лабораторией геологии и литодинамики, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), доктор географических наук, профессор, **ResearcherID: C-5154-2014**, rkosyan@hotmail.com

**Дьяков Николай Николаевич**, директор, Севастопольское отделение Государственного океанографического института им. Н. Н. Зубова (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Советская, 61), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-2622-7695**, **Scopus Author ID: 57210982889**, dyakoff@mail.ru