

Дисперсионный анализ колебаний уровня Черного моря в широком диапазоне частот

И. П. Медведев

*Институт океанологии им. П. П. Шириова РАН, Москва, Россия
Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова, Москва, Россия
E-mail: patamates@gmail.com*

Поступила в редакцию 06.07.2018 г., после доработки – 10.08.2018 г.

На основе длительных рядов наблюдений изучены особенности пространственного распределения дисперсии колебаний уровня Черного моря в 5 различных частотных диапазонах. Для анализа мезомасштабной и синоптической изменчивости использованы ряды ежечасных наблюдений колебаний уровня на 23 прибрежных станциях. Для оценки сезонных и межгодовых колебаний уровня моря были использованы длительные ряды среднемесячных значений уровня на станциях Варна, Усть-Дунайск, Одесса, Севастополь, Туапсе, Поти и Батуми. По ежечасным рядам наблюдений рассчитывались спектры колебаний уровня моря на периодах 2 ч – 70 сут, по среднемесячным – на периодах 70 сут – 10 лет. Проведен анализ формирования спектра колебаний уровня Черного моря в широком диапазоне частот. Для каждого из 5 выделенных частотных диапазонов изменчивости рассчитаны количественные оценки вклада в суммарную энергию непривливых колебаний уровня моря. Дисперсия межгодовых колебаний уровня в Черном море относительно однородна и меняется в интервале 28–37 см². Дисперсия сезонных колебаний изменяется в более широком диапазоне 16–37 см². Значения дисперсии внутригодовых колебаний уровня моря существенно изменяются: наименьшие наблюдаются на станции Севастополь – 20 см², наибольшие – на станциях Поти и Касперовка, до 35 см². В целом синоптические и мезомасштабные колебания уровня моря демонстрируют значительную неравномерность распределения дисперсии по акватории. Наибольшие значения наблюдаются в мелководной северо-западной части Черного моря, они вызваны влиянием приземного ветра. Если на станциях Кавказского побережья Черного моря (Туапсе, Поти, Батуми) и вблизи Крымского побережья (Севастополь) дисперсия сезонных и внутригодовых колебаний уровня моря превышает дисперсию синоптических колебаний уровня примерно в 1,5–2 раза, то в северо-западной части наибольший вклад в суммарную дисперсию уровня вносит синоптическая составляющая.

Ключевые слова: колебания уровня моря, Черное море, синоптическая изменчивость, спектр, дисперсия, энергия.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России по теме № 0149-2018-0015 «Тектоника деформируемых литосферных плит и геодинамическая эволюция океанской литосферы: геодинамическая эволюция Арктики и зоны перехода от Тихого океана к Евразии; развитие катастрофических и потенциально опасных процессов в зонах субдукции, окраинных, внутренних морях и береговой зоне, анализ их геоэкологических последствий; оценка и генезис полезных ископаемых континентальных окраин и внутриокеанических областей, окраинных и внутренних морей» и при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-35-60071 «Изучение механизмов формирования колебаний уровня Балтийского, Черного и Каспийского морей в диапазоне периодов от часов до лет по данным прибрежных и спутниковых наблюдений и численного моделирования».

Для цитирования: Медведев И. П. Дисперсионный анализ колебаний уровня Черного моря в широком диапазоне частот // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 6. С. 489–500. doi:10.22449/0233-7584-2018-6-489–500

Analysis of Variance of the Black Sea Level Oscillations in a Wide Range of Frequencies

I. P. Medvedev

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow, Russia
e-mail: patamates@gmail.com

Based on the long-term observations in the Black Sea, the features of spatial distribution of the sea level oscillations' variance in five different frequency ranges were studied. The series of the hourly sea level observations carried out at 23 coastal tide gauges were used to analyze mesoscale and synoptic variability. To assess seasonal and inter-annual sea level variability, long-term monthly average level values obtained at the stations of Varna, Ust-Dunaisk, Odessa, Sevastopol, Tuapse, Poti, and Batumi were used. The hourly observations permitted to calculate the sea level spectra for the periods 2 hours – 70 days, and the monthly average sea level values – the spectra for the periods 70 days – 10 years. Formation of the Black Sea level oscillations' spectrum was analyzed in a wide frequency range. For each of five chosen ranges of frequency variability, its contribution to the total energy of non-tidal sea level variations was quantitatively assessed. Variance of inter-annual sea level fluctuations in the Black Sea is relatively homogenous and is within 28 to 37 cm². The range of seasonal sea level fluctuations is wider: 16–37 cm². The intra-annual sea level oscillations differ significantly depending on the region: the smallest values are recorded in Sevastopol – 20 cm², the largest ones – in Poti and Kasperovka – up to 35 cm². In general, synoptic and mesoscale sea level fluctuations testify to substantial inhomogeneity in the variance distribution over the water area. The highest values resulting from the surface wind effect are observed in the shallow northwestern part of the Black Sea. At the stations of the Caucasian coast of the Black Sea (Tuapse, Poti, Batumi) and near the Crimean coast (Sevastopol), variance of the seasonal and intra-annual sea level oscillations exceeds that of the synoptic ones by about 1.5–2 times, whereas in the Black Sea northwestern part, the greatest contribution to the total sea level variance is made by the synoptic component.

Keywords: sea level oscillations, Black Sea, synoptic variability, spectrum, dispersion, energy.

Acknowledgements: the investigation is carried out within the framework of the state task of FASO, Russia on the theme № 0149-2018-0015 “Tectonics of the deformed lithosphere plates and geodynamic evolution of the ocean lithosphere: geodynamic evolution of the Arctic and the transition zone from the Pacific Ocean to Eurasia; development of catastrophic and potentially dangerous processes in the subduction zones, marginal and internal seas, and coastal zone, analysis of their geo-ecological consequences; assessment and genesis of minerals of the continental remote areas and intra-oceanic regions, marginal and internal seas” and at financial support of the RFFI grant № 16-35-60071 “Study of the mechanism of the level oscillation formation in the Baltic, Black and Caspian seas in the period ranges from hours to years based on the data of coastal and satellite observations, as well as numerical modeling”.

For citation: Medvedev, I. P., 2018. Analysis of variance analysis of the Black Sea level oscillations in a wide range of frequencies. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, [e-journal] 34(6), pp. 489-500. doi:10.22449/0233-7584-2018-6-489-500 (in Russian).

Введение

Черное море – одно из самых изолированных морей Мирового океана, что приводит к формированию уникального режима изменчивости уровня внутри него. Узость и мелководность проливов Босфор и Дарданеллы препятствуют проникновению мезомасштабных колебаний уровня из смежных бассейнов (Средиземное, Эгейское и Мраморное моря) в акваторию Черного моря. Вследствие этого внутри моря формируется собственный прилив, который представляет собой реакцию водной массы бассейна на непосредственное воздействие приливообразующих сил [1–3]. Сгонно-нагонные колебания уровня также формируются преимущественно внутри моря и принимают характер вынужденных стоячих волн, генерация которых связана с атмосферными процессами естественного синоптического периода [4].

Если в окраинных морях, сообщающихся с открытым океаном, максимальный энергетический вклад в суммарную дисперсию колебаний уровня

вносят приливы (около 85–90%) [5], то в изолированных морях, таких как Черное, наблюдается иная картина распределения энергии: вклад приливов не превышает нескольких процентов, а основная доля энергии приходится на колебания уровня моря метеорологического происхождения. В работе [6] показано, что вклад приливов в общую дисперсию колебаний уровня Балтийского моря не превышает 2%, энергия долгопериодных процессов однородна на всей акватории системы Северное – Балтийское море. Короткопериодные процессы, характерные для отдельных бухт и заливов, демонстрируют значительную пространственную неравномерность распределения энергии.

В работе [7] на основе ежечасных рядов наблюдений на 9 станциях в Черном море проведен анализ формирования синоптических и мезомасштабных колебаний уровня. Также были оценены энергетические характеристики различных видов колебаний уровня моря в трех пунктах (Поти, Туапсе, Феодосия). Авторы использовали относительно короткие серии наблюдений (период 1980–1983 гг.), что не позволило им оценить вклад долгопериодных колебаний уровня Черного моря.

Колебания уровенной поверхности моря – это «дыхание» океана, формирующееся под влиянием различных факторов: приливообразующих сил, метеорологического воздействия, компонентов водного баланса, изменений плотности воды. Эти факторы захватывают широкий диапазон периодов, причем влияние отдельных процессов в различных акваториях неодинаково. Для понимания динамических процессов вод Черного моря необходимо иметь представление о формировании всего спектра колебаний уровня – с периодами от часов до десятков лет.

Цель настоящей работы – на основе длительных рядов наблюдений исследовать широкий спектр колебаний уровня Черного моря с периодами 2 ч – 10 лет и получить количественные оценки вклада его различных составляющих в общую дисперсию изменчивости уровня.

Данные

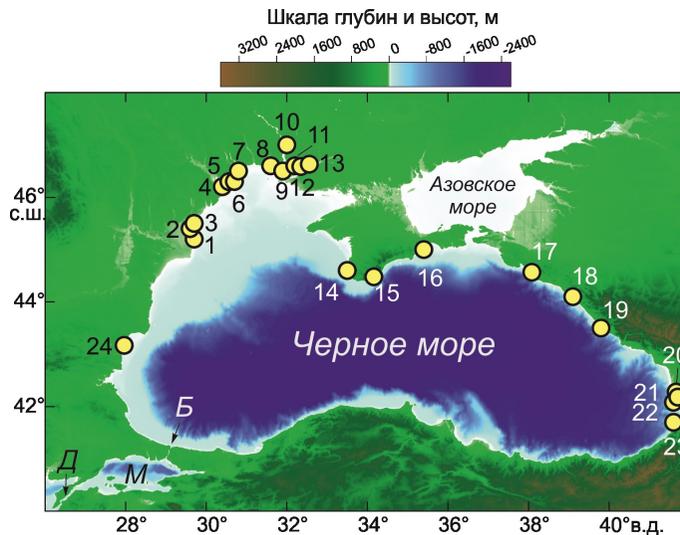
Для анализа были подготовлены ряды ежечасных наблюдений колебаний уровня на 23 прибрежных станциях, частично использованные ранее в [8] для изучения особенностей спектра колебаний уровня Черного моря (таблица, рис. 1). Станции были расположены на постсоветском побережье моря – территории России, Украины и Грузии. Длина записей составляла от 3 до 38 лет. Данные по всем станциям были приведены к одному часовому поясу (*GMT*) и тщательно проверены, выбросы и сбои устранены.

Для оценки сезонных и межгодовых изменений уровня использованы среднемесячные значения уровня Черного моря на ст. Варна, Усть-Дунайск, Одесса, Севастополь, Туапсе, Поти, Батуми, которые были сформированы на основе данных порталов Единой системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) и Постоянной службы среднего уровня моря (*PSMSL*) (таблица, рис. 1).

Сведения о станциях в Черном море (название, координаты, период измерений), ряды наблюдений по которым были использованы в настоящем анализе

Information on the stations in the Black Sea (names, coordinates, period of measurements) observation series of which were used in the present analysis

№	Станция/Station	Координаты/Coordinates		Период, гг./ Period, years
		°с. ш./N	°в. д./E	
Ежечасные данные/Hourly data				
1	Большое/Bolshoe	45,2	29,7	1977–1984
2	Вилково/Vilkovo	45,4	29,6	1977–1984
3	Прорва/Prorva	45,5	29,7	1977–1984
4	Белгород-Днестровский/ Belgorod-Dnestrovsky	46,2	30,4	1977–1995
5	Паромная Переправа/ Paromnaya Pereprava	46,3	30,6	1980–1995
6	Ильичевск/Ilichivsk	46,3	30,7	1977–1995
7	Одесса/Odessa	46,5	30,8	1977–1995
8	Очаков/Ochakov	46,6	31,6	1977–1995
9	Геройское/Heroiskoe	46,5	31,9	1985–1995
10	Николаев/Nikolaev	47,0	32,0	1977–1995
11	Станислав/Stanislav	46,6	32,2	1989–1991
12	Касперовка/Kasperovka	46,6	32,3	1977–1995
13	Херсон/Kherson	46,6	32,6	1977–1995
14	Севастополь/Sevastopol	44,6	33,5	1977–1995
15	Ялта/Yalta	44,5	34,2	1977–1995
16	Феодосия/Feofosia	45,0	35,4	1977–1995
17	Геленджик/Gelendzhik	44,6	38,1	1977–1992
18	Туапсе/Tuapse	44,1	39,1	1977–2014
19	Сочи/Sochi	43,5	39,8	1977–2014
20	Кулеви/Kulevi	42,3	41,7	1977–1979
21	Поти (Риони)/Poti (Rioni)	42,2	41,7	1977–1979
22	Поти/Poti	42,1	41,6	1977–1991
23	Батуми/Batumi	41,7	41,6	1977–1991
Среднемесечные данные/Monthly average data				
3	Усть-Дунайск/Ust-Dunaisk	45,5	29,7	1985–2005
7	Одесса/Odessa	46,5	30,8	1977–2005
14	Севастополь/Sevastopol	44,6	33,5	1910–1994
18	Туапсе/Tuapse	44,1	39,1	1917–2015
22	Поти/Poti	42,1	41,6	1874–2015
23	Батуми/Batumi	41,7	41,6	1882–2015
24	Варна/Varna	43,2	27,9	1929–1996



Р и с. 1. Схема расположения мареографов. Номера 1–24 соответствуют номерам станций в таблице. Обозначения: *М* – Мраморное море, *Б* – Босфор, *Д* – Дарданеллы
F i g. 1. Scheme of location of mareographs. Numbers 1–24 correspond to the numbers of the stations in the Table. Notations: *M* is the Sea of Marmara, *B* is the Bosphorus, *D* is the Dardanelles

Формирование спектра изменчивости уровня Черного моря

Основываясь на работе [9], для классификации колебаний уровня моря на периодах 2 ч – 10 лет мы выделили следующие 5 диапазонов изменчивости: межгодовой (1 год $\leq T < 10$ лет), сезонный ($T = 1, 1/2$ года), внутригодовой (1 мес $\leq T < 1$ год), синоптический (2 сут $\leq T < 1$ мес), мезомасштабный (2 ч $\leq T < 2$ сут).

Межгодовые колебания уровня Черного моря формируются преимущественно под влиянием речного стока (в первую очередь р. Дунай) и изменчивости атмосферной циркуляции над акваторией моря [10, 11]. Сезонные изменения уровня Черного моря происходят под влиянием сезонного хода стока рек, водообмена с Мраморным и Азовским морями, атмосферных осадков, испарения, а также сезонных изменений полей атмосферного давления и ветра над его акваторией. Также заметный вклад в сезонные колебания уровня моря вносят изменения плотности воды (стерические колебания уровня) [12].

Внутригодовая (внутрисезонная) изменчивость уровня Черного моря так же, как и межгодовая, определяется преимущественно речным стоком и изменением водообмена с Мраморным морем. В работе [13] показано, что внутригодовые колебания уровня в Черном море имеют значимую связь с колебаниями уровня в Мраморном и Эгейском морях на периодах более 1 мес. Разница в фазе между изменениями уровня в Эгейском/Мраморном и Черном морях увеличивается примерно от 10 дней на периодах около месяца до 40 дней на периодах около 250 дней [14]. Речной сток и водообмен с Мраморным морем также оказывают значительное влияние на образование низкочастотных синоптических колебаний уровня Черного моря [13], тогда как высокочастотные синоптические и мезомасштабные колебания формируются под воздействием меняющихся полей атмосферного давления и ветра.

Для исследования формирования спектра колебаний уровня Черного моря были выбраны 6 станций, три из которых располагаются рядом с глубоководными районами (ст. Севастополь, Туапсе, Поти), а три другие (ст. Прорва/Усть-Дунайск, Одесса, Касперовка) – в мелководной северо-западной части моря. Особенности географического положения станций влияют на формирование различных спектров колебаний уровня моря (рис. 2).

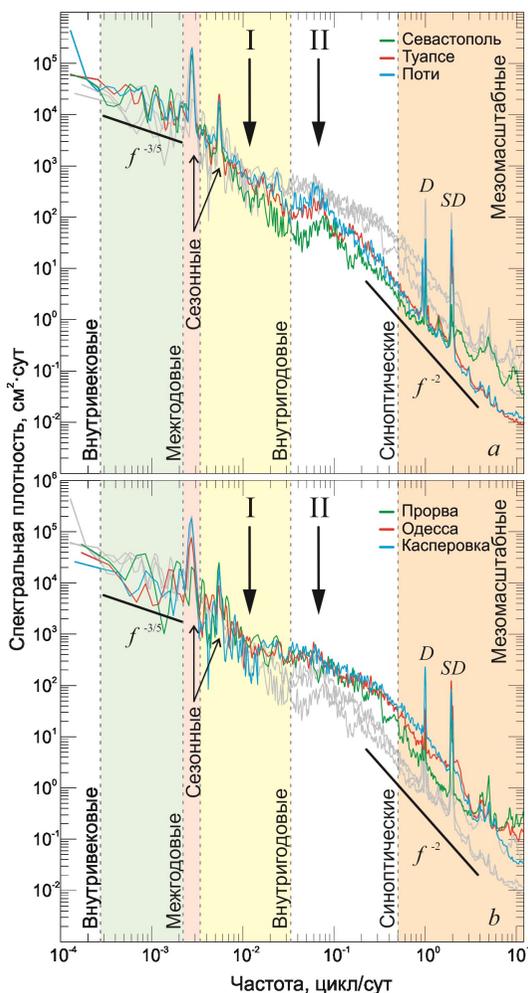


Рис. 2. Спектры колебаний уровня моря на станциях Севастополь, Туапсе, Поти (а) и Прорва, Одесса, Касперовка (b). Условные обозначения: $f^{-3/5}$ и f^{-2} – законы спада спектральной энергии; I – частота разделения «глубоководных» и «мелководных» спектров Черного моря; II – широкий пик с периодом ~16 сут; D – спектральный пик суточного прилива; SD – спектральный пик полусуточного прилива. Серым цветом показаны спектры колебаний уровня на фоновых станциях Прорва, Одесса, Касперовка (а) и Севастополь, Туапсе, Поти (b)

Fig. 2. Spectra of the sea level oscillations at the stations Sevastopol, Tuapse, Poti (a) and Prorva, Odessa, Kasperovka (b). Symbolic notations: $f^{-3/5}$ and f^{-2} are the laws of the spectral energy roll-off; I – frequency separating the “deep-sea” and “shallow” spectra of the Black Sea; II – wide peak with the period ~16 days; D is spectral peak of a diurnal tide; SD is spectral peak of a semi-diurnal tide. Grey color shows the level oscillations’ spectra at the background stations Prorva, Odessa, Kasperovka (a) and Sevastopol, Tuapse, Poti (b)

Как было сказано выше, в настоящем исследовании использовались ежедневные и среднемесячные значения уровня моря. По ежедневным рядам рассчитывались спектры на частотах выше 0,014 цикл/сут ($2 \text{ ч} \leq T < 70 \text{ сут}$), по среднемесячным – спектры на частотах ниже 0,014 цикл/сут ($70 \text{ сут} \leq T < 10 \text{ лет}$). Для характеристики колебаний уровня вблизи устья р. Дунай были использованы ежедневные данные со ст. Прорва и среднемесячные – со ст. Усть-Дунайск. Станции расположены очень близко друг к другу (менее 6 км), вследствие чего для периодов более месяца различия в спектральных свойствах колебаний уровня моря на этих двух станциях незначительны.

В настоящей работе расчет спектров выполнялся с помощью быстрого преобразования Фурье (метод Уэлча), при этом для улучшения качества расчета и уменьшения эффекта Гиббса использовалось спектральное окно Кайзера – Бесселя с половинным перекрытием. Предварительно из записей был исключен линейный тренд. Длина сегмента (N) при расчетах спектров по ежедневным данным для ст. Севастополь и Туапсе составляла 65536 ч, для ст. Касперовка, Одесса, Поты – 32768 ч, для ст. Прорва – 16384 ч. При расчетах спектров по среднемесячным данным длина ряда для ст. Поты, Севастополь, Туапсе составила 512 мес, для ст. Одесса, Усть-Дунайск, Касперовка – 192 мес.

Спектральная плотность колебаний уровня монотонно падает при возрастании частоты колебаний (рис. 2). В межгодовом частотном диапазоне спектральная плотность падает по закону $f^{-3/5}$, где f – частота. Подобная зависимость спада энергии колебаний в этом частотном диапазоне характерна для различных акваторий Мирового океана [15]. На частотах выше 0,003 цикл/сут (более 300 сут) спектральная энергия снижается с увеличением частоты по закону f^{-2} , т. е. соответствует «красному шуму». Этот закон спада энергии в спектре характерен для многих геофизических процессов, в том числе и для колебаний уровня моря [16]. Как было показано [15], закон f^{-2} хорошо описывает изменение энергии с частотой в широком диапазоне периодов, от 500 миллионов лет до 5 с. В Черном море нарушения этого закона вызваны преимущественно двумя основными факторами: приливными составляющими и частотно-избирательными свойствами бассейна. Приливы – это регулярные периодические колебания уровня моря, которые в спектре проявляются в виде острых пиков на фиксированных суточных и полусуточных частотах [3] (D и SD на рис. 2). Изменения уровня моря, генерируемые переменным атмосферным давлением и ветром, в основном носят характер случайного шума и имеют спектр в виде непрерывной функции от частоты (континуум). В зависимости от частотно-избирательных свойств всего моря и его отдельных частей (заливы и бухты) меняется характер непрерывной части спектра. Вблизи резонансных частот, где концентрируется энергия собственных колебаний уровня бассейна (сейши), образуются локальные «горбы» непрерывного спектра.

Если в низкочастотной области спектры рассматриваемых 6 станций слабо отличаются друг от друга, то на частотах выше 1/100 цикл/сут они различаются существенно. На мелководных станциях изменения спектральной плотности с увеличением частоты (рис. 2, *b*) приобретают характер «белого шума», т. е. уровень спектральной плотности в частотном диапазоне 1/100–

1/15 цикл/сут постоянный. На спектрах колебаний уровня вблизи более при-
глубых Крымского и Кавказского побережий (рис. 2, *b*) в синоптическом
диапазоне частот наблюдается широкий локальный максимум энергии коле-
баний с периодами 14–16 сут. В работе [7, с. 98] на основе расчета взаимных
характеристик сделан вывод, что колебания уровня с этим периодом распро-
страняются в Черном море «в виде волны, обходящей море по кругу со сред-
ней фазовой скоростью 165 км/сут» по часовой стрелке, и, вероятно, связаны
с «планетарными атмосферными волнами, отчетливо проявляющимися в по-
ле атмосферного давления в тропосфере на изобарических поверхностях 300
и 500 мб» [7, с. 99].

На мелководных станциях этот спектральный пик ярко не выражен
вследствие высокого уровня спектральной плотности во всем синоптическом
диапазоне частот (рис. 2, *b*). В целом на синоптических и мезомасштабных
частотах спектральная плотность колебаний уровня на станциях, располо-
женных в мелководной северо-западной части Черного моря (Прорва, Одесса,
Касперовка) (рис. 2, *b*), примерно на порядок выше, чем на глубоководных
станциях (рис. 2, *a*). Это вызвано топографическими особенностями северо-
западной части Черного моря: обширное мелководье приводит к усилению
колебаний уровня моря ветрового происхождения.

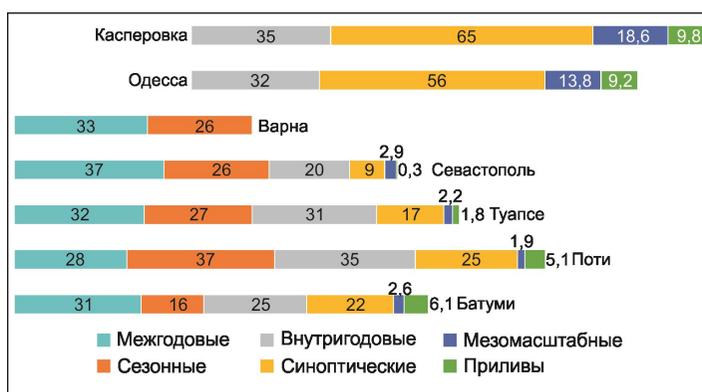
Отличительной особенностью спектра колебаний уровня Черного моря,
не характерной для других изолированных морей Мирового океана (напр.,
Балтийского и Каспийского), является наличие соответствующего инерцион-
ным колебаниям уровня моря относительно широкого спектрального пика
с центральным периодом $T_f \sim 17,2$ ч в мезомасштабном диапазоне. Период
инерционных колебаний определяется как $f = 12 \text{ ч}/\sin\varphi$, где φ – географиче-
ская широта. Для Черного моря он составляет 16,4–18,1 ч. Этот пик характе-
рен для всех спектров на Крымском (ст. Феодосия, Ялта, Севастополь) и Кав-
казском (ст. Геленджик, Туапсе, Сочи, Поты, Батуми) побережьях. Причем на
Кавказском побережье он выражен лучше, чем на Крымском (рис. 2, *a*).
Инерционным движениям в Черном море посвящено большое количество
исследований (см., напр., [17, 18]), но обычно эти колебания проявляются
в записях изменений скорости течений или плотности воды, являются барок-
линным процессом и не прослеживаются в спектрах колебаний уровня моря.

Локальные максимумы спектральной плотности, наблюдающиеся в спек-
трах на частотах более 2,5 цикл/сут, формируются под влиянием собственных
колебаний моря [8]. Эти широкие спектральные максимумы, соответствующие
основным сейшевым модам, имеют устойчивые периоды (5,6, 4,8, 4,1 ч)
как на западном побережье Черного моря, так и на восточном.

Дисперсионный анализ

Дисперсию для каждого из 5 выделенных диапазонов можно оценить как
сумму значений спектральной плотности внутри конкретного диапазона из-
менчивости $\sigma_k^2 = \Delta f \sum S(f_i)$, где Δf – спектральное разрешение, а i меняется
в пределах заданного диапазона. На рис. 3 показаны количественные оценки
вклада каждого из 5 выделенных частотных диапазонов в суммарную энер-
гию непривливаемых колебаний уровня моря. Для расчета использовались оста-

точные (неприливные) ряды изменения уровня. Они были получены путем вычитания из исходных рядов изменения уровня приливных колебаний, рассчитанных с помощью гармонического анализа по методу наименьших квадратов [19]. Дисперсия приливных колебаний уровня внутри Черного моря изменяется от 0,3 см² на ст. Севастополь до 9–10 см² на ст. Одесса и Касперовка. Относительный вклад в общую дисперсию изменяется от 0,3% на ст. Севастополь до 6% на ст. Батуми. На восточном побережье Черного моря (ст. Потти, Батуми) дисперсия приливов в 2,5 раза превышает дисперсию неприливно-мезомасштабных колебаний уровня. В мелководной северо-западной части Черного моря энергия приливов в 1,5–2 раза меньше, чем энергия мезомасштабных неприливно-колебаний. Это вызвано преобладанием в данной части акватории сгонно-нагонных колебаний уровня моря, имеющих ветровое происхождение.



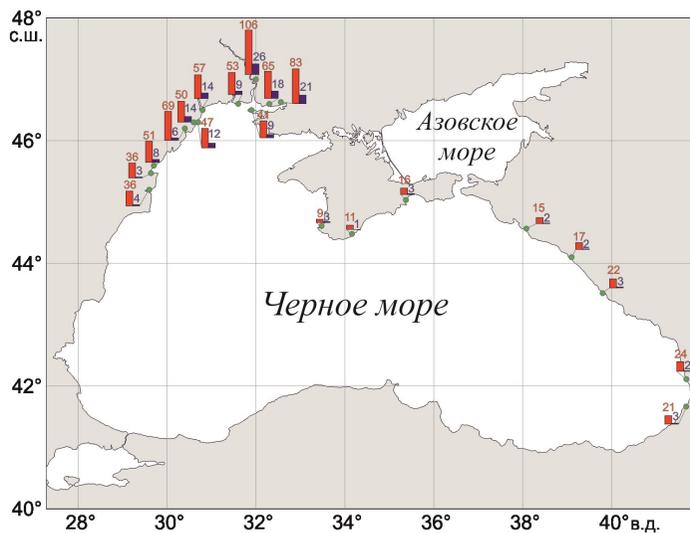
Р и с. 3. Энергетический бюджет неприливно-колебаний уровня Черного моря. На гистограммах указаны вклады (см²) в суммарную неприливную дисперсию отдельных диапазонов изменчивости уровня моря

F i g. 3. Energetic budget of the Black Sea level non-tidal oscillations. The histograms represent the contributions (cm²) of single ranges of the sea level variability to the total non-tidal variance

Энергия межгодовых колебаний уровня в Черном море меняется в интервале 28–37 см². Наибольшие значения получены для ст. Севастополь. Энергия сезонных колебаний имеет более широкий диапазон, 16–37 см². Примечательно, что наименьшие и наибольшие значения дисперсии наблюдаются на соседних станциях Батуми и Потти соответственно. Это можно объяснить влиянием речного стока р. Риони, впадающей в Черное море в районе ст. Потти, что приводит к увеличению дисперсии сезонных вариаций уровня моря.

Значения дисперсии внутригодовых колебаний уровня в разных частях моря существенно отличаются: наименьшие наблюдаются на ст. Севастополь – 20 см², наибольшие – на ст. Потти и Касперовка, до 35 см². Если на станциях Кавказского и Крымского побережий Черного моря (Туапсе, Потти, Батуми, Севастополь) энергия внутригодовых колебаний уровня превышает энергию синоптических колебаний примерно в 1,5–2 раза, то в северо-западной части моря наблюдается обратная ситуация. Здесь энергия синоптических колебаний уровня превышает энергию внутригодовых колебаний в 1,8 раза.

На рис. 4 показано распределение дисперсии синоптических и мезомасштабных колебаний уровня по 20 станциям в различных частях Черного моря. Наименьшие значения на синоптическом масштабе достигаются вблизи п-ова Крым, 9–16 см². В восточной части моря энергия этих колебаний возрастает до 21–24 см², в северо-западной части энергия синоптических колебаний уровня максимальна. Уже на ст. Вилково и Большое (устьевая зона Дуная), а также на кромке северо-западного шельфа дисперсия синоптических колебаний составляет 36 см². С уменьшением глубин (к северу) дисперсия колебаний уровня моря растет и достигает 83 см² на ст. Херсон и 106 см² на ст. Николаев. Эти две станции располагаются в эстуариях Днепра и Буга соответственно. Следовательно, мелководность северо-западной части Черного моря приводит к увеличению дисперсии синоптических колебаний уровня, связанных в первую очередь со сгонно-нагонными процессами. Абсолютные максимумы дисперсии синоптических колебаний уровня моря на ст. Херсон и Николаев вызваны дополнительным влиянием стока указанных крупных рек. Таким образом, подтверждается вывод, сделанный авторами работы [13]: речной сток – один из основных факторов формирования низкочастотных синоптических колебаний уровня Черного моря.



Р и с. 4. Распределение энергии неприливых колебаний уровня Черного моря в синоптическом (красные столбики) и мезомасштабном (синие столбики) диапазонах изменчивости
F i g. 4. Energy distribution of the Black Sea level non-tidal fluctuations in the synoptic (red columns) and meso-scale (blue columns) variability ranges

Дисперсия неприливых мезомасштабных колебаний уровня моря σ_{mes}^2 на Крымском и Кавказском побережьях Черного моря не превышает 3 см². В северо-западной части ее величина возрастает при перемещении от дельты Дуная (ст. Вилково) к Днепро-Бугскому лиману (рис. 4). На ст. Вилково σ_{mes}^2 составляет 3 см², вблизи ст. Одесса – 14 см², на ст. Херсон и Николаев – до 21 и 26 см² соответственно.

Заключение

В настоящей работе исследован спектр колебаний уровня Черного моря в широком диапазоне периодов от 2 ч до 10 лет, получены количественные оценки вклада его различных частотных диапазонов в общую дисперсию колебаний уровня и исследованы особенности их пространственной изменчивости. Синоптические и мезомасштабные колебания уровня моря демонстрируют значительную неравномерность распределения энергии по акватории. Если на станциях восточного побережья Черного моря (Туапсе, Поти, Батуми) и у берега Крыма (Севастополь) энергия сезонных и внутригодовых колебаний уровня моря превышает энергию синоптических примерно в 1,5–2 раза, то в северо-западной части наибольший вклад в суммарную дисперсию уровня вносит синоптическая составляющая. Если сезонные, синоптические и мезомасштабные колебания уровня Черного моря традиционно являются объектом исследований, то внутригодовой диапазон изменчивости (период от месяца до года), вносящий существенный вклад (20–28%) в общую дисперсию колебаний уровня, до сих пор практически не изучался.

Распределение дисперсии непривливаемых колебаний уровня Черного моря в синоптическом диапазоне изменчивости является отображением распределения энергии сгонно-нагонных колебаний. При анализе таких колебаний уровня моря обычно рассчитываются экстремальные значения, тогда как среднюю оценку их энергии получить трудно. Результаты настоящего исследования позволили количественно оценить среднюю дисперсию сгонно-нагонных процессов и получить картину ее пространственной изменчивости. Распределение дисперсии мезомасштабных колебаний уровня является отображением суммарной энергии сейш Черного моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Defant A.* Physical Oceanography. Vol. 2. New York : Pergamon Press, 1961. 598 p.
2. *Medvedev I. P., Rabinovich A. B., Kulikov E. A.* Tides in Three Enclosed Basins: the Baltic, Black, and Caspian Seas // *Frontiers in Marine Science*. 2016. Vol. 3, Article 46. 7 p. doi:10.3389/fmars.2016.00046
3. *Medvedev I. P.* Tides in the Black Sea: Observations and Numerical Modelling // *Pure and Applied Geophysics*. 2018. Vol. 175, iss. 6. P. 1951–1969. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1878-x>
4. *Герман В. Х., Левиков С. П.* Вероятностный анализ и моделирование колебаний уровня моря. Л. : Гидрометеониздат, 1988. 231 с.
5. *Wunsch C.* Bermuda sea level in relation to tides, weather, and baroclinic fluctuations // *Reviews of Geophysics*. 1972. Vol. 10, iss. 1. P. 1–49. doi:10.1029/RG010i001p00001
6. *Медведев И. П.* О формировании спектра колебаний уровня Балтийского моря // *Доклады Академии наук*. 2015. Т. 463, № 3. С. 347–352. doi:10.7868/S0869565215210185
7. *Иванов В. А., Ястреб В. П.* О колебаниях уровня Черного моря // *Водные ресурсы*. 1989. № 2. С. 97–104.
8. *Медведев И. П., Куликов Е. А.* Спектр мезомасштабных колебаний уровня северной части Черного моря: приливы, сейши, инерционные колебания // *Океанология*. 2016. Т. 56, № 1. С. 10–17. doi:10.7868/S0030157416010093
9. *Монин А. С., Каменкович В. М., Корт В. Г.* Изменчивость Мирового океана. Л. : Гидрометеониздат, 1974. 261 с.

10. *Фомичева Л. А., Рабинович А. Б., Демидов А. Н.* Уровень моря // *Моря СССР. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Л. : Гидрометеоздат, 1991. С. 329–354.*
11. *Горячкин Ю. Н., Иванов В. А.* Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 210 с.
12. *Архипкин В. С., Бережной В. Ю.* Стерические колебания уровня Черного моря // *Океанология. 1996. Т. 35, № 6. С. 809–816.*
13. *Volkov D. L., Landerer F. W.* Internal and external forcing of sea level variability in the Black Sea // *Climate dynamics. 2015. Vol. 45, iss. 9–10. P. 2633–2646. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2498-0>*
14. *Volkov D. L., Johns W. E., Belonenko T. V.* Dynamic response of the Black Sea elevation to intraseasonal fluctuations of the Mediterranean sea level // *Geophysical Research Letters. 2016. Vol. 43, iss. 1. P. 283–290. <https://doi.org/10.1002/2015GL066876>*
15. *Harrison C. G. A.* Power spectrum of sea level change over fifteen decades of frequency // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2002. Vol. 3, no. 8. P. 1–17. doi:10.1029/2002GC000300*
16. Волны в пограничных областях океана / В. В. Ефимов [и др.]. Л. : Гидрометеоздат, 1985. 280 с.
17. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / А. С. Блатов [и др.]. Л. : Гидрометеоздат, 1984. 240 с.
18. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с.
19. *Pugh D., Woodworth P.* Sea-Level Science: Understanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea-Level Changes. Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2014. 409 p. doi:10.1017/CBO9781139235778

Об авторе:

Медведев Игорь Павлович, старший научный сотрудник, лаборатория цунами, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-0748-0062**, **Scopus Author ID: 55656381400**, **ResearcherID: L-6118-2013**, patamates@gmail.com