

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 551.465

И.П. Медведев<sup>1</sup>, В.С. Архипкин<sup>2</sup>КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ МОРЯ В ГОЛУБОЙ БУХТЕ (ГЕЛЕНДЖИК)<sup>3</sup>

Данные акустического волнографа, записывающего флуктуации уровенной поверхности с частотой 5 Гц, использованы для изучения особенностей колебаний уровня в Голубой бухте Черного моря. Спектральный анализ непрерывных рядов наблюдений позволил выделить основные суточные и полусуточные приливные составляющие в спектрах колебаний уровня моря. В спектрах выявлен пик с периодом ~4,8 ч, который, возможно, обусловлен резонансом собственных колебаний моря и мелководных составляющих прилива. При помощи гармонического анализа оценены амплитуды и фазы основных суточных и полусуточных гармонических постоянных приливов для Голубой бухты. В диапазоне периода от 2 мин до 1 ч при помощи спектрального анализа выявлены собственные колебания в Голубой бухте с периодами 17,6; 15,5; 13 и 6 мин. Пики на частотах <5 цикл/ч, вероятно, определяются частотно-избирательными свойствами шельфа этой акватории и собственными колебаниями в соседней Геленджикской бухте. Спектральные пики  $f > 7$  цикл/ч формируются собственными колебаниями уровня непосредственно в Голубой бухте.

*Ключевые слова:* колебания уровня моря, приливы, сейши, спектральный анализ, акустический волнограф, Голубая бухта, Черное море, Геленджикская бухта.

**Введение.** Черное море — почти полностью замкнутый внутриматериковый бассейн. В юго-западной части оно сообщается через проливы Босфор, Дарданеллы и Мраморное море со Средиземным морем; в северо-восточной части — через Керченский пролив с Азовским морем. Черное море одно из самых изолированных морей Мирового океана, что приводит к формированию уникального режима изменчивости уровня внутри бассейна. Приливы, высота которых в открытом океане достигает нескольких метров, почти не проникают в Черное море. Вследствие этого внутри моря формируется собственный прилив, который представляет собой реакцию водной массы бассейна на непосредственное воздействие приливообразующих сил. Несмотря на относительно небольшую амплитуду приливов Черного моря, их точная оценка чрезвычайно важна для понимания общей динамики моря. Приливо-отливные явления — это регулярные периодические колебания уровня моря и течений, постоянно присутствующие в Черном море, и все другие процессы происходят на их фоне. Наибольшей амплитуды в Черном море достигают непериодические и квазипериодические колебания уровня (сгонно-нагонные, сезонные).

Систематические наблюдения за колебаниями уровня Черного моря начались в конце XIX в. Подробный обзор особенностей изменчивости уровня Черного моря и его отдельных акваторий приведен

в работах [Фомичева и др., 1991; Горячкин, Иванов, 2006]. В межгодовой изменчивости уровня Черного моря выделяются сезонные колебания, размах которых составляет до 30 см и зависит в большей степени от изменчивости суммарного речного стока [Фомичева и др., 1991]. Изменения атмосферного давления и ветрового напряжения генерируют метеорологические колебания уровня. При экстремальных значениях скорости ветра в мелководных частях моря формируются штормовые нагоны, высота которых достигает нескольких метров [Герман, Левиков, 1988].

Несмотря на длительную историю изучения периодических и непериодических колебаний уровня Черного моря, отдельные особенности уровенной изменчивости до сих пор остаются неясными. Так, в спектрах мезомасштабных колебаний уровня в отдельных пунктах моря — кроме основных энерго-несущих составляющих — выявлен спектральный пик с периодом ~5 ч, механизм формирования которого составляет предмет дискуссий [Герман, Левиков, 1988]. В статье рассмотрены колебания уровня в Голубой бухте (Геленджик), в которой в течение нескольких лет работал акустический волнограф, регистрирующий флуктуации уровня моря с частотой 5 Гц. Полученные при помощи этого прибора измерения позволяют исследовать особенности уровенной изменчивости как в самой Голубой бухте (собственные колебания в бухте), так и во всем

<sup>1</sup> Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, мл. науч. с.; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория комплексных эколого-географических исследований Арктики, мл. науч. с., канд. физ.-мат. н.; e-mail: medvedev@ocean.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, доцент, канд. геогр. н.; e-mail: victor.arkhipkin@gmail.com

<sup>3</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 13-05-41360 и № 15-0505986) и РНФ (гранты № 14-37-00038 и № 14-50-00095).

Черном море (собственные колебания моря и приливы).

**Материалы и методы исследований.** Начиная с лета 2007 г. на базе Южного отделения Института океанологии имени П.П. Ширшова РАН в Голубой бухте (рис. 1) каждый год силами студентов и преподавателей кафедры океанологии МГУ имени М.В. Ломоносова при помощи дистанционного акустического волнографа “LOG\_aLevel” фирмы “General Acoustics” проводятся инструментальные измерения изменчивости уровня поверхности. Волнограф устанавливается ежегодно в летний сезон (с конца мая по середину июля) и в зимний сезон (конец января — начало февраля) и регистрирует флуктуации уровня поверхности с частотой 5 Гц и разрешением 1 мм. По результатам измерений, проведенных с 2007 по 2013 г., удалось сформировать 7 отдельных рядов наблюдений, характеристики которых представлены в табл. 1. Эти ряды и послужили материалом исследований. Все ряды были проверены на наличие выбросов и сбоев. Для изучения мезомасштабных и синоптических колебаний уровня путем фильтрации исходных данных сформированы ежечасные ряды наблюдений. Для анализа собственных колебаний в Голубой бухте использованы ежеминутные ряды наблюдений.

**Результаты исследований и их обсуждение. Спектр колебаний уровня моря в Голубой бухте.** Колебания уровня моря представляют собой суперпозицию многочисленных волн с разными частотой и амплитудой. Для оценки распределения энергии колеба-

Таблица 1

Характеристики наблюдений, использованных в статье

Номер п/п	Год	Период наблюдений	Длина ряда, ч	Длина ряда, мин
1	2007	02.06.—11.07.	962	57 736
2	2008	10.06.—11.07.	768	46 058
3	2009	04.05.—07.07.	1560	47 284
4	2010	03.06.—26.07.	1296	77 723
5	2011	01.06.—10.07.	950	57 087
6	2012	03.06.—06.07.	808	48 494
7	2013	03.06.—25.06.	522	31 340

ний уровня по частоте удобно использовать методы спектрального анализа случайных процессов. Колебания уровня моря не являются строго стохастическим процессом. Приливные колебания уровня — регулярный детерминированный процесс, который проявляется в спектрах в виде резких дельтаобразных пиков (дискретный спектр). Изменения уровня, вызванные воздействием на поверхность моря переменного атмосферного давления и ветра, в основном носят характер случайного шума и имеют спектр в виде непрерывной функции от частоты (континуум).

В рамках исследований сформированы ряды наблюдений длительностью до 2 мес, по которым

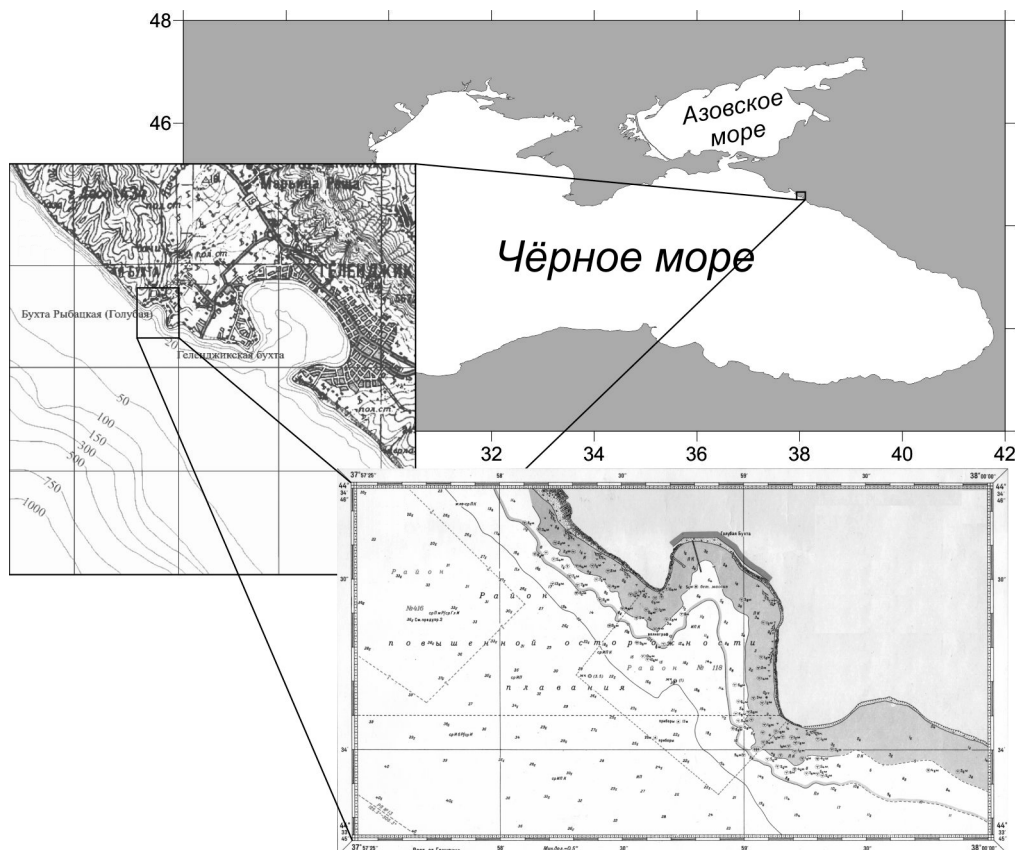


Рис. 1. Географическое положение исследуемой акватории

рассчитаны спектры колебаний уровня Черного моря в мезомасштабном диапазоне изменчивости — от нескольких часов до нескольких суток. Рассчитывали спектры с помощью быстрого преобразования Фурье с использованием прямоугольного спектрального окна длиной  $N = 768$  ч и спектральным разрешением  $\Delta f \approx 0,03125$  цикл/сут. Полученные для каждого года спектры оказались однотипны, вследствие чего построен общий осредненный спектр за летние периоды 2007–2012 гг. (рис. 2). Осреднение летних спектров позволило увеличить число степеней свободы ( $\nu = 14$ ) и сузить доверительный интервал.

Основная часть спектральной энергии колебаний уровня моря в Голубой бухте сосредоточена на низких частотах (рис. 2). В сторону высоких частот наблюдается быстрый спад энергии, который соответствует закону “красного шума” ( $\omega^{-2}$ , где  $\omega$  — частота спектральной гармоники). Этот закон является основным в теории случайных процессов [Демченко, Кислов, 2010] и характерен для многих геофизических явлений в природе. В частности, он типичен для спектров длинных волн в открытом океане [Рабинович, 1993]. Узкие и острые дельтаобразные спектральные пики, нарушающие равномерное уменьшение энергии с увеличением частоты, вызваны приливами. На спектре (рис. 2) можно выделить следующие приливные пики: суточные  $K_1$  (период 23,93 ч) и  $O_1$  (период 25,82 ч) и полусуточные  $M_2$  (период 12,42 ч) и  $S_2$  (период 12,00 ч). Известно, что приливы в Черном море невелики [Фомичева и др., 1991], но вследствие регулярности и детерминированности процесса пики, соответствующие основным приливным гармоникам, отчетливо проявляются в спектре изменчивости уровня.

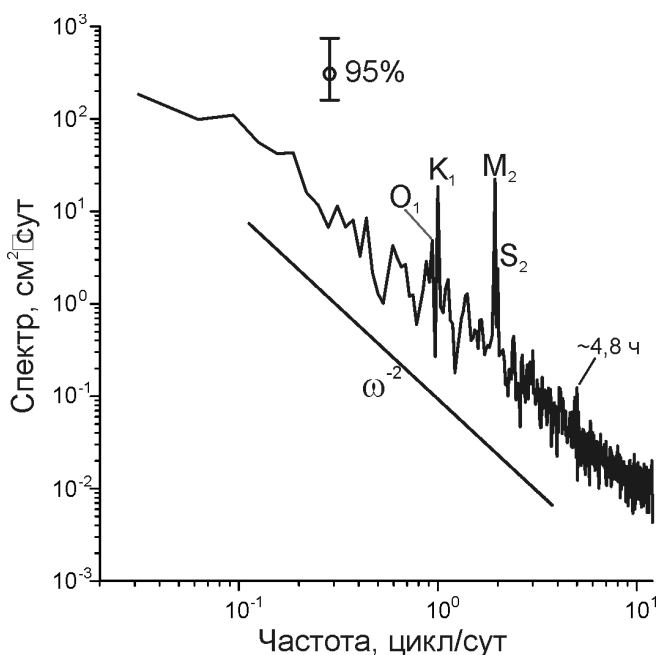


Рис. 2. Спектр уровня моря, осредненный за период наблюдений с 2007 по 2012 г. Прямая показывает закон спада спектра  $\omega^{-2}$

Нами использованы относительно короткие ряды наблюдений (несколько месяцев), вследствие чего в спектре изменчивости уровня моря удалось выделить только 4 основные приливные составляющие. Использование длительных рядов с периодом наблюдений  $>10$  лет (как это сделано в работе [Медведев и др., 2013] для анализа изменчивости уровня Балтийского моря) позволят выделить спектральные пики, соответствующие менее значимым приливным составляющим.

На частоте 4–5 цикл/сут наблюдается относительное увеличение спектральной энергии колебаний уровня, не соответствующее закону спадания энергии  $\omega^{-2}$ . Концентрация энергии в этом диапазоне частоты может быть вызвана влиянием собственных стоячих колебаний уровня (сейши) Черного моря с близким периодом на формирование спектра. Как показано в работе [Медведев и др., 2013], основные собственные моды (сейши) проявляются в спектре в виде широкого “горба”, увеличивающего энергию непрерывного спектра. Согласно [Марамзин, 1985; Архипкин и др., 1989], для Черного моря характерны собственные моды с периодами 9,5–10; 5,9–6,1; 5,6 и 4,8–5,1 ч. Последний из перечисленных периодов близок к выделенному на спектре на рис. 2. Кроме увеличения энергии непрерывной части спектра на частоте 4–5 цикл/сут выделяется дискретный пик с частотой  $\sim 5$  цикл/сут.

В работах [Герман, 1970; Герман, Левиков, 1988] отмечено наличие пика с этой частотой на спектрах колебаний уровня в пос. Вилково (Одесская область, Украина). Авторы указанных работ предложили две гипотезы происхождения этой волны. Согласно первой гипотезе выделяемый пик соответствует продольной одноузловой сейше Черного моря с периодом 4,5 ч, определенной теоретически в работе [Курчатов, 1926]. Исследователи отмечают, что столь близкого совпадения периодов недостаточно для доказательства подобного предположения. Согласно второй гипотезе этот спектральный пик соответствует приливной мелководной составляющей. Вилково расположено в 19 км от морского края дельты р. Дунай [Герман, 1970], что благоприятствует формированию нелинейных мелководных приливных составляющих. Сами авторы [Герман, 1970; Герман, Левиков, 1988] больше склоняются к второй гипотезе, так как если бы этот пик соответствовал сейше, то он бы наблюдался в спектрах колебаний уровня моря в разных районах бассейна. В работе [Герман, 1970] рассмотрены спектры в 8 пунктах Черного моря (Вилково, Севастополь, Ялта, Керчь, Туапсе, Поты, Батуми и Одесса), но острый пик с периодом  $\sim 4,8$  ч проявлялся только на спектрах изменчивости уровня моря в Вилково. Вследствие этого выдвинуто предположение, что составляющая с периодом 4,8 ч — индивидуальная особенность приливных колебаний уровня в пос. Вилково [Герман, 1970; Герман, Левиков, 1988]. Результаты наших исследований де-

монстрируют, что наличие пика с периодом 4,8 ч в спектре колебаний уровня проявляется и в районе Голубой бухты. Таким образом, этот пик характерен не только для устьевой зоны р. Дунай, поэтому указанные выше проблемы не теряют актуальность.

**Приливные колебания уровня моря в Голубой бухте.**

Суточные и полусуточные составляющие прилива ярко выражены в спектрах изменчивости уровня моря в Голубой бухте (рис. 2). Для получения характеристик основных компонент прилива с высокой точностью был применен гармонический анализ приливов [Pugh, 1987; Кондрин, 2008]. Нами для расчета гармонических постоянных приливов использовали метод наименьших квадратов [Parker, 2007; Кондрин, 2008]. Для расчета гармонических постоянных выбраны ежечасные ряды с периодом наблюдений около 1,5–2 мес в 2007, 2008, 2009, 2010, 2011 и 2012 гг. Рассчитано 14 приливных гармоник: 2 суточные ( $O_1$  и  $K_1$ ), 3 полусуточные ( $N_2$ ,  $M_2$ ,  $S_2$ ) и 8 высокочастотных мелководных ( $M_3$ ,  $S_3$ ,  $MK_3$ ,  $SK_3$ ,  $M_4$ ,  $MS_4$ ,  $S_4$ ,  $SK_4$ ,  $2SK_5$ ). В табл. 2 представлены гармонические постоянные основных приливных составляющих для отдельных годов наблюдений и векторно осредненные:  $H$  — амплитуда,  $G_L$  — фаза по местному времени,  $G_G$  — фаза по Гринвичу.

Основное внимание уделялось суточным и полусуточным гармоникам. Амплитуда главной лунной гармоники  $O_1$  составляет ~0,45 см, лунно-солнечной деклинационной гармоники  $K_1$  ~1,0 см. Отношение амплитуд основных суточных гармоник  $O_1/K_1 = 0,44$ , что существенно ниже их отношения в приливном потенциале (согласно [Pugh, 1987],  $H_{O_1}/H_{K_1} \approx 0,71$ ). Среди всех приливных составляющих наибольшей амплитуды достигает главная лунная полусуточная гармоника ( $M_2 = 1,2$  см). Амплитуда солнечной полусуточной гармоники равна 0,33 см, лунно-солнечной гармоники  $N_2$  — 0,22 см. Амплитуды некоторых гармоник существенно варьируют от года к году. Так, амплитуда гармоники  $K_1$  изменяется в пределах 0,86–1,20 см,  $N_2$  — от 0,15 до 0,44 см. Диапазон изменчивости амплитуды гармоник  $O_1$ ,  $M_2$  и  $S_2$  не превышает 0,1–0,2 см. Фазы рассматриваемых гармоник также варьируют от года к году в пределах 30–40°. Подобный разброс фаз вызван короткими рядами наблюдений и малой амплитудой приливных составляющих.

Кроме основных суточных и полусуточных гармоник были рассчитаны и мелководные гармонические постоянные. Выявлено, что значительной амплитуды от года к году достигает только гармоника  $2SK_5$  (4,7975 ч) — до 0,12 см.

По результатам анализа рассчитаны негармонические приливные постоянные, такие, как тип приливных колебаний и максимальная высота прилива. Тип приливных колебаний определяется отношением основных суточных гармоник к главным полусуточным [Pugh, 1987]:

Таблица 2  
Амплитуда ( $H$ ), локальная фаза ( $G_L$ ), фаза по Гринвичу ( $G_G$ ) основных гармонических приливных составляющих, рассчитанные для каждого года наблюдений в Голубой бухте

Гармоника	Частота, цикл/сут	Период, ч	2007		2008		2009		2010		2011		2012		Среднее		
			$H$ , см	$G$ , град.	$H$ , см	$G$ , град.	$H$ , см	$G$ , град.	$H$ , см	$G$ , град.	$H$ , см	$G$ , град.	$H$ , см	$G$ , град.	$H$ , см	$G_L$ , град.	$G_G$ , град.
$O_1$	0,9295	25,8193	0,53	271	0,45	281	0,41	282	0,40	280	0,42	277	0,63	322	0,45±0,08	287	246
$K_1$	1,0027	23,9345	0,86	238	1,08	258	1,16	232	1,04	239	1,20	243	0,99	264	1,03±0,11	246	201
$N_2$	1,8960	12,6584	0,21	220	0,19	252	0,34	315	0,44	281	0,21	260	0,15	271	0,22±0,10	273	188
$M_2$	1,9323	12,4206	1,18	291	1,08	314	1,38	289	1,17	272	1,38	284	1,25	310	1,20±0,11	293	206
$S_2$	2,0000	12,0000	0,35	298	0,25	291	0,36	273	0,33	280	0,43	288	0,35	326	0,33±0,05	292	202
$SK_3$	3,0027	7,9927	0,11	221	0,11	220	0,13	26	0,19	26	0,11	26	0,15	106	0,13±0,03	48	273
$2SK_5$	5,0027	4,7974	0,02	29	0,11	100	0,12	108	0,11	152	0,10	347	0,05	240	0,08±0,04	107	242

$$F = \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2} + H_{S_2}}.$$

Для Голубой бухты  $F = 0,96$ , что характерно для неправильного полусуточного прилива (классификация приливных колебаний приведена в работах [Pugh, 1987; Parker, 2007]). Согласно работе [Фомичева и др., 1991], полусуточные приливы преобладают в западной и восточной частях Черного моря, и только в центральной части (у побережья п-ова Крым) приливные колебания уровня имеют слабо-выраженный суточный характер. Преимущественное возбуждение полусуточных гармоник, вероятно, связано с близостью полусуточного периода к низшему периоду собственных колебаний Черного моря (одноузловой сейше) [там же].

Приблизительную оценку максимально возможной теоретической высоты прилива можно получить по формуле

$$I = 2 (H_{K_1} + H_{O_1} + H_{M_2} + H_{S_2}).$$

В Голубой бухте максимальная высота прилива составляет 6,1 см. Согласно работе [Фомичева и др., 1991], наибольшей высоты прилив в Черном море достигает в Одесском заливе — до 17 см.

Результаты анализа мы сравнили с результатами А.Б. Рабиновича, рассчитавшего гармонические постоянные по данным мареографа в г. Геленджик за 1979 г. [Фомичева и др., 1991]. Разница между гармоническими постоянными, рассчитанными по данным акустического волнографа, и значениями, полученными по данным мареографа в Геленджике, невелика — амплитуды гармоник отличаются на 0,1–0,2 см, фаза на 5–10° для полусуточных гармоник и до 20–30° для суточных.

**Собственные колебания в Голубой бухте.** Голубая бухта представляет собой полузамкнутый морской бассейн с глубиной до 10 м, что приводит к формированию внутри нее собственных стоячих колебаний — сейш. Сейши в замкнутых акваториях возбуждаются в результате непосредственного воздействия внешних сил на поверхность океана — атмосферного давления, приземного ветра, осадков [Рабинович, 1993]. Период собственных колебаний определяется частотно-избирательными свойствами акватории (геометрией бассейна). В сейшах не наблюдается поступательное движение формы волны, происходят только перемещения поверхности уровня — поднятия и опускания. Неподвижная ось, около которой колеблется зеркало водоема, называется узловой линией. Период  $n$ -узловой сейши в случае закрытого прямоугольного невращающегося бассейна рассчитывается по формуле Мериана [Rabinovich, 2009]:

$$T_n = \frac{2L}{n\sqrt{gH}},$$

где  $n$  — число узлов,  $L$  — длина бассейна,  $g$  — ускорение свободного падения,  $H$  — средняя глубина бассейна. В заливах и бухтах собственные колебания генерируются через открытую границу и определяются следующим выражением:

$$T_n = \frac{4L}{(2n+1)\sqrt{gH}}. \quad (1)$$

При  $n = 0$  “раскачивается” низшая фундаментальная (нулевая) мода Гельмгольца, которая доминирует над всеми остальными видами собственных колебаний в бухтах и гаванях с узким входом [Rabinovich, 2009]. Узловая линия этой моды находится на входе в бассейн.

Для изучения собственных колебаний в Голубой бухте по данным волнографа сформированы ежеминутные ряды измерений изменчивости уровня. На рис. 3 представлены спектры колебаний уровня, рассчитанные по ежеминутным данным. Для улучшения качества расчетов и уменьшения эффекта Гиббса в соответствии с рекомендациями работы [Emeru, Thompson, 2003] использовано спектральное окно Кайзера–Бесселя с выбранной длиной  $N=2048$  мин с половинным перекрытием. На частоте ниже 3 цикл/ч спектральная энергия уменьшается с увеличением частоты. На периодах 85, 57, 28,8 и 24,6 мин (рис. 3) наблюдаются слабые спектральные пики, которые, вероятно, вызваны частотно-избирательными особенностями шельфовой зоны Черного моря в этом районе. Эти пики устойчиво проявляются на всех 6 представленных спектрах (рис. 3). В диапазоне частоты от 3 до 12 цикл/ч наблюдается существенное увеличение спектральной энергии. Два основных спектральных пика в этом частотном диапазоне имеют периоды 17,6 и 6 мин. Эти пики ярко выражены на всех 6 спектрах. На большинстве спектров также можно выделить пики с периодами 15,5 и 12,8 мин. В рассматриваемом частотном диапазоне выделяются два спектральных кластера: 1) относительно низкочастотные пики ( $f < 5$  цикл/ч, период  $> 12$  мин), которые, вероятно, определяются частотно-избирательными свойствами шельфа данной акватории; 2) относительно высокочастотные спектральные пики ( $f > 7$  цикл/ч, период  $< 8$ –9 мин), которые, возможно, формируются собственными колебаниями в Голубой бухте (сейши).

**Сейши.** Сейши с периодом от нескольких минут до 1–2 ч характерны для многих бухт и заливов Черного моря. Согласно [Фомичева и др., 1991], сейши с периодом несколько минут (2–6 мин) могут быть вызваны резкими порывами ветра одного направления. Сейши с периодами до 15–20 мин возникают при резких колебаниях атмосферного давления, а также при изменении направления и скорости ветра [Фомичева и др., 1991].

Таким образом, в широком спектре изменчивости уровня моря в Голубой бухте можно выде-

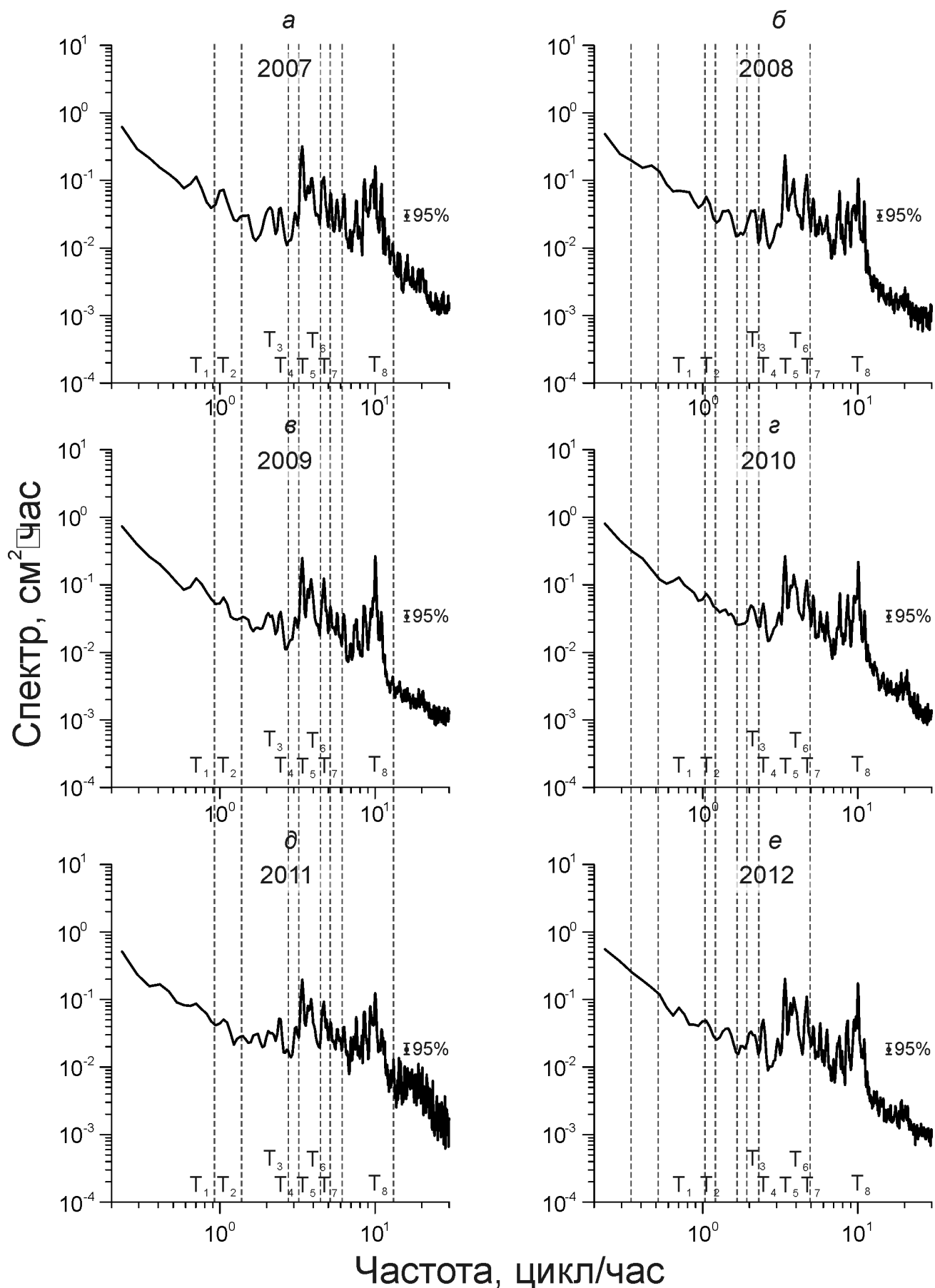


Рис. 3. Спектры колебаний уровня моря в Голубой бухте (*a–e*) в диапазоне частот от  $2 \cdot 10^{-1}$  до  $3 \cdot 10^1$  цикл/ч, построенные по ежеминутным измерениям уровня для каждого года. Вертикальными линиями показаны основные энергонесущие частоты, соответствующие спектральным пикам с периодами: T<sub>1</sub> ~85; T<sub>2</sub> ~57; T<sub>3</sub> ~28,8; T<sub>4</sub> ~24,6; T<sub>5</sub> ~17,6; T<sub>6</sub> ~15,5; T<sub>7</sub> ~12,8; T<sub>8</sub> ~6 мин

лить три типа (кластера) собственных колебаний: 1) сейши всего Черного моря с периодами от 4,8 до 9,8 ч; 2) собственные колебания северо-восточной части Черного моря вблизи Геленджикской бухты с периодами 17,6; 15,5 и 12,8 мин; 3) сейши в Голубой бухте с периодом от 4 до 8 мин. Каждый залив или бухта Черного моря характеризуется своим набором частот. Сейши всего моря должны проявляться в спектрах изменчивости уровня на всем побережье Черного моря, за исключением пунктов вблизи узловых линий. Согласно [Марамзин, 1985], узловые линии основных сейшевых мод расположены в центральной части Черного моря в направлении север–юг. Энергия собственных мод концентрируется в северо-западной части бассейна, где и наблюдаются максимальные амплитуды. Узловая линия низшей моды с периодом 9,52 ч проходит почти точно по 200-метровой изобате, фактически представляющей собой границу северо-западной части моря — Одесского залива [там же]. Амплитуда сейши в Одесском заливе приблизительно в 15 раз больше, чем у восточного побережья Черного моря.

Рассмотрим четвертую моду собственных колебаний Черного моря с периодом 4,8 ч [Марамзин, 1985]. Эта мода представляет собой трехузловую сейшу. Две узловые линии этой сейши расположены в Одесском заливе, третья проходит в центральной части моря в направлении от Крыма к побережью Турции. Наибольшие амплитуды колебаний, вызванных этой модой, должны наблюдаться в пунктах Очаков и Приморское (Одесский залив). Повышенные энергии должны наблюдаться также у западного и восточного побережий Черного моря. В районе Ялты находится узловая линия, как следствие амплитуда этой моды в этой части моря должна приближаться к нулю. Вероятно, эта сейшевая мода вызывает увеличение энергии на частоте 4,9–5,1 цикл/сут и происходит резонансное усиление мелководных приливов с близкими частотами. Вследствие этого в спектрах изменчивости уровня в Голубой бухте и около пос. Вилково выделяется спектральный пик с частотой 5 цикл/сут, имеющий приливное происхождение и резонансно усиливающийся собственными колебаниями Черного моря с близкой частотой. Похожее явление можно наблюдать в заливе Фанди, где полусуточный прилив усиливается собственными колебаниями залива, вследствие чего в заливе Фанди возникают самые высокие приливы в Мировом океане.

Вопрос о природе формирования выявленных нами пиков с периодами 17,6; 15,5; 12,8 и 6 мин в спектрах колебаний уровня в Голубой бухте также остается дискуссионным. Для интерпретации этих пиков в качестве сейш требуется расчет собственных частот колебаний уровня в бухте, что планируется осуществить в будущем при помощи численного моделирования путем решения задачи на собственные значения. Так, в работе [Архипкин,

2002] при помощи этого метода удалось рассчитать периоды собственных колебаний уровня в Геленджикской бухте: 38,4 ( $T_0$ , мода Гельмгольца); 18,6 ( $T_1$ ); 14,4 ( $T_2$ ); 12,6 ( $T_3$ ); 12 мин ( $T_4$ ). Одно- и трехузловая сейши, рассчитанные для Геленджикской бухты, имеют близкие периоды со спектральными пиками, полученными нами для Голубой бухты, что позволяет предположить существование связи между этими бухтами. Широко известно физическое явление, происходящее в случае двух маятников, соединенных между собой пружиной, — колебания одного маятника раскачивают другой, при этом в момент, когда первый маятник колеблется с максимальной амплитудой, амплитуда колебаний второго минимальна и наоборот [Rabinovich, 2009]. Подобный эффект наблюдается в некоторых акваториях Мирового океана: например, в японских бухтах Коазиро и Мороисо, расположенных на п-ве Миура недалеко от Токио, в бухтах Сьютаделла и Платья-Гран, расположенных на о. Менорка (Балеарские о-ва, Испания) [Rabinovich, 2009]. Доказать или опровергнуть представленные выше предположения будет возможно только после взаимного статистического (спектрального) анализа высокочастотных колебаний уровня в Голубой и Геленджикской бухтах.

Спектральный пик с периодом 6 мин, видимо, сформирован сейшей Голубой бухты. Оценка периода фундаментальной (нулевой) собственной моды в Голубой бухте по формуле (1) для бассейнов с открытой границей дает  $T = 5,85$  мин, т.е. значение, достаточно близкое к наблюдениям, здесь  $c = \sqrt{gH} \approx 7,75$  м/с — скорость длинных волн,  $H = 6$  м — средняя глубина бухты, а  $L \approx 680$  м — ее длина.

#### Выводы:

— по ежечасным наблюдениям удалось выделить основные суточные и полусуточные приливные пики ( $O_1$ ,  $K_1$ ,  $M_2$ ,  $S_2$ ), а также пик с частотой 5 цикл/сут;

— на спектрах изменчивости уровня моря, построенных по ежеминутным рядам измерений, выделены пики, соответствующие частотно-избирательным свойствам шельфа в северо-восточной части Черного моря ( $T = 17,6$ ; 15,5 и 12,8 мин) и сейши непосредственно в Голубой бухте с периодом  $T = 6$  мин;

— вывод о происхождении ярко выраженного спектрального пика на частоте  $\sim 5$  цикл/сут предварительный и требует более глубокого анализа.

Авторы благодарят С.А. Мысленкова и С.С. Мухаметова, а также студентов и сотрудников кафедры океанологии МГУ имени М.В. Ломоносова, которые на протяжении 7 лет (с 2007 по 2013 г.) проводили измерения изменения уровня моря в Голубой бухте и любезно предоставили материалы для исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

- Архипкин В.С.* Расчет сейшевых колебаний в Геленджикской бухте // Устойчивое развитие территорий юга России и Украины: эволюция, функционирование и ресурсы. Вып. 1. Севастополь: ЧФ МГУ, 2002. С. 81–89.
- Arkhipkin V.S. Raschet seishevyykh kolebanii v Gelendzhikskoi bukhte [Calculation of the seiches oscillations in the Gelendzhik Bay], *Ustoichivoe razvitie territorii yuga Rossii i Ukrainy: evolyutsiya, funktsionirovanie i resursy* [Sustainable development of the southern territories of Russia and Ukraine: evolution, functioning and resources], Sevastopol', ChF MSU, 2002, no 1, pp. 81–89 (in Russian).
- Архипкин В.С., Иванов В.А., Николаенко Е.Г.* Моделирование баротропных сейш в южных морях // Моделирование гидрофизических процессов и полей в замкнутых водоемах и морях. М.: Наука, 1989. С. 104–117.
- Arkhipkin V.S., Ivanov V.A., Nikolaenko E.G. Modelirovanie barotropnykh seish v yuzhnykh moryakh [Simulation of barotropic seiches in southern seas], *Modelirovanie gidrofizicheskikh protsessov i polei v zamknutykh vodoemakh i moryakh* [Modeling of hydrophysical processes and fields in closed reservoirs and seas], Moscow, Nauka, 1989, pp. 104–117 (in Russian).
- Герман В.Х.* Спектральный анализ колебаний уровня Азовского, Черного и Каспийского морей в диапазоне частот от одного цикла за несколько часов до одного цикла за несколько суток // Тр. ГОИН. 1970. Вып. 103. С. 52–73.
- German V.Kh. Spektral'nyi analiz kolebanii urovnya Azovskogo, Chernogo i Kaspiyskogo morei v diapazone chastot ot odnogo tsikla za neskol'ko chasov do odnogo tsikla za neskol'ko surok // *Tr. GOIN*. 1970, V. 103, pp. 52–73 (in Russian).
- Герман В.Х.* Спектральный анализ колебаний уровня Азовского, Черного и Каспийского морей в диапазоне частот от одного цикла за несколько часов до одного цикла за несколько суток // Тр. ГОИН. 1970. Вып. 103. С. 52–73.
- German V.Kh. Spektral'nyi analiz kolebanii urovnya Azovskogo, Chernogo i Kaspiyskogo morei v diapazone chastot ot odnogo tsikla za neskol'ko chasov do odnogo tsikla za neskol'ko surok // *Tr. GOIN*, 1970, V. 103, pp. 52–73 (in Russian).
- Герман В.Х., Левиков С.П.* Вероятностный анализ и моделирование колебаний уровня моря. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 231 с.
- German V.Kh., Levikov S.P. Veroyatnostnyi analiz i modelirovanie kolebanii urovnya morya [Probability Analysis and Modelling of Sea Level Oscillations], Leningrad, Gidrometeoizdat, 1988, 231 p. (in Russian).
- Горячкин Ю.Н., Иванов В.А.* Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006. 210 с.
- Goryachkin Yu.N., Ivanov V.A. Uroven' Chernogo morya: proshloe, nastoyashchee i budushchee [Black Sea Level: Past, Present, and Future], Sevastopol', MGI NAN Ukrainy, 2006, 210 p. (in Russian).
- Демченко П.Ф., Кислов А.В.* Стохастическая динамика эволюции природных объектов: броуновское движение и геофизические приложения. М.: ГЕОС, 2010. 189 с.
- Demchenko P.F., Kislov A.V. Stokhasticheskaya dinamika evoljucii prirodnykh obektov: brounovskoe dvizhenie i geofizicheskie prilozhenija [Stochastic Dynamics of Natural Objects: Brownian Motion and Geophysical Applications], Moscow, GEOS, 2010, 189 p. (in Russian).
- Кондрин А.Т.* Методы гармонического анализа приливов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2008. № 5. С. 26–30.
- Kondrin A.T. Metody garmonicheskogo analiza prilivov [Methods of the harmonic analysis of tides], *Vestnik Moskovskogo Universiteta, seria 5, Geografiya*, 2008, no 5, pp. 26–30 (in Russian).
- Курчатов И.В.* Сейши в Черном и Азовском морях // Изв. Центр. Гидромет. Бюро. 1925. Вып. 4. С. 149–158.
- Kurchatov I.V. Seishi v Chernom i Azovskom moryakh [Seiches in the Black and Azov seas], *Izv. Tsent. Gidromet. Byuro*, 1925, V. 4, pp. 149–158 (in Russian).
- Марамзин В.Я.* Расчет сейшевых колебаний методом конечных элементов в бассейнах произвольной формы // Теоретические и экспериментальные исследования длинноволновых процессов. Владивосток, 1985. С. 46–67.
- Maramzin V.Ya. Raschet seishevyykh kolebanii metodom konechnykh elementov v basseinakh proizvol'noi formy [Calculation of seiche oscillations finite element method in free-form swimming pool], *Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya dlinnovolnovykh protsessov* [Theoretical and experimental studies of long-wave processes], Vladivostok, 1985, pp. 46–67 (in Russian).
- Медведев И.П., Рабинович А.Б., Куликов Е.А.* Приливные колебания в Балтийском море // Океанология. 2013. Т. 53, № 5. С. 596–611.
- Medvedev I.P., Rabinovich A.B., Kulikov E.A. Tidal oscillations in the Baltic Sea, *Oceanology* (Engl. Transl.), 2013, Vol. 53, no 5, pp. 526–538.
- Рабинович А.Б.* Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 325 с.
- Rabinovich A.B. Dlinnyye gravitatsionnye volny v okeane: zakhvat, rezonans, izluchenie [Long Ocean Gravity Waves: Trapping, Resonance and Leaking], Saint-Petersburg, Gidrometeoizdat, 1993, 325 p. (in Russian).
- Фомичева Л.А., Рабинович А.Б., Демидов А.Н.* Уровень моря // Проект “Моря СССР”. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море. Вып. 1. СПб.: Гидрометеоздат, 1991. С. 329–354.
- Fomicheva L.A., Rabinovich A.B., Demidov A.N. Uroven' morya [Sea level] // *Proekt “Morya SSSR”. Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei SSSR* [Project “USSR’s seas”. Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of USSR], Vol. 4, Chernoe more (Black Sea), iss. 1, Saint-Petersburg, Gidrometeoizdat, 1991, pp. 329–354 (in Russian).
- Emery W.J., Thomson R.E.* Data analysis methods in physical oceanography. 2<sup>nd</sup> and revis. N.Y.: Elsevier, 2003. 638 p.
- Parker B.B.* Tidal Analysis and Prediction // NOAA spec. publ. NOS CO-OPS 3. Maryland: Silver Spring, 2007. 378 p.
- Pugh D.T.* Tides, Surges and Mean Sea-Level. Chichester: John Wiley, 1987. 472 p.
- Рабинович А.Б.* Сейши и harbor колебания. In: Handbook of Coastal and Ocean Engineering / Ed. Y.C. Kim. Chapter 9. Singapore: World Scientific Publ., 2009. P. 193–236.



**I.P. Medvedev, V.S. Arkhipkin**

**SEA LEVEL OSCILLATIONS IN THE GOLUBAYA BAY (THE TOWN OF GELENDZHİK)**

Sea level oscillations in the Golubaya Bay (the town of Gelendzhik) were studied using the data of the acoustic wave recorder that registers level fluctuations with 5 Hz frequency. Analysis of the continuous series of observations made it possible to identify principal daily and semi-daily tidal components in the spectra of the Black Sea level oscillations. A peak with about 4,8 hour periodicity probably results from the resonance of the sea level oscillations themselves and the shallow-water components of a tide. The harmonic analysis was used to evaluate the amplitudes and phases of the main daily and semi-daily harmonic constants of tides in the Golubaya Bay. The spectral analysis identify the following frequencies of the sea level oscillations themselves in the range of 2 min to 1 hour: 17,6 min, 15,5 min, 13 min and 6 min. Peak values at the frequencies below 5 cycles per hour depend on the frequency-selective characteristics of the Golubaya Bay shelf and the sea level oscillations in the nearby Gelendzhik Bay. Spectral peaks at  $f > 7$  cycles per hour are formed by the sea level oscillations in the Golubaya Bay itself.

*Key words:* sea level oscillations, tides, seiches, spectral analysis, acoustic wave recorder, the Golubaya Bay, the Black Sea.