

УДК 551.465

## СПЕКТР МЕЗОМАСШТАБНЫХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ: ПРИЛИВЫ, СЕЙШИ, ИНЕРЦИОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

© 2016 г. И. П. Медведев, Е. А. Куликов

*Институт океанологии РАН им. П.П. Ширшова, Москва**e-mail: medvedev@ocean.ru*

Поступила в редакцию 26.05.2015 г.

После доработки 07.06.2015 г.

Длительные ряды наблюдений по 23 мареографам были использованы для анализа спектра мезомасштабной изменчивости уровня Черного моря. Приливы, имеющие в спектрах характер острых дельтаобразных пиков, проявляются на суточных и полусуточных приливных частотах на всех станциях. Между суточными и полусуточными спектральными пиками был выделен широкий локальный максимум на периодах инерционных колебаний. Если в спектрах изменения скорости течений в Черном море этот пик хорошо известен, то в спектрах колебаний уровня моря он выявлен впервые. На частотах выше 3 цикл/сут характерными особенностями спектра изменчивости уровня Черного моря являются широкие максимумы в непрерывной части спектра, которые соответствуют основным сейшевым модам моря с периодами 5.6, 4.8, 4.1, 3.1 ч, и острые дельтаобразные пики радиационных гармоник  $S_3$ ,  $S_4$ ,  $S_5$ ,  $S_6$ . Основными факторами, влияющими на формирование радиационных приливов в Черном море, предположительно, являются бризовый ветер и сток крупных рек. Заметное преобладание составляющей колебаний уровня с частотой 5 цикл/сут ( $S_5$ ) над другими радиационными гармониками вызвано влиянием сейши с частотой  $\sim 5$  цикл/сут. Близость периодов этих колебаний приводит к резонансу и увеличению амплитуды радиационной гармоники  $S_5$ .

DOI: 10.7868/S0030157416010093

### ВВЕДЕНИЕ

Поверхность уровня моря испытывает постоянные изменения под действием различных астрономических, метеорологических, гидрологических и геологических факторов. Эти факторы формируют сложный спектр колебаний уровня моря. Если в открытом океане наибольший энергетический вклад в общую дисперсию колебаний уровня моря вносят приливы – до 85–90% [22], а вклад метеорологических колебаний уровня, вследствие их нерегулярного характера, не превышает 10%, то в окраинных морях энергетический баланс колебаний уровня иной.

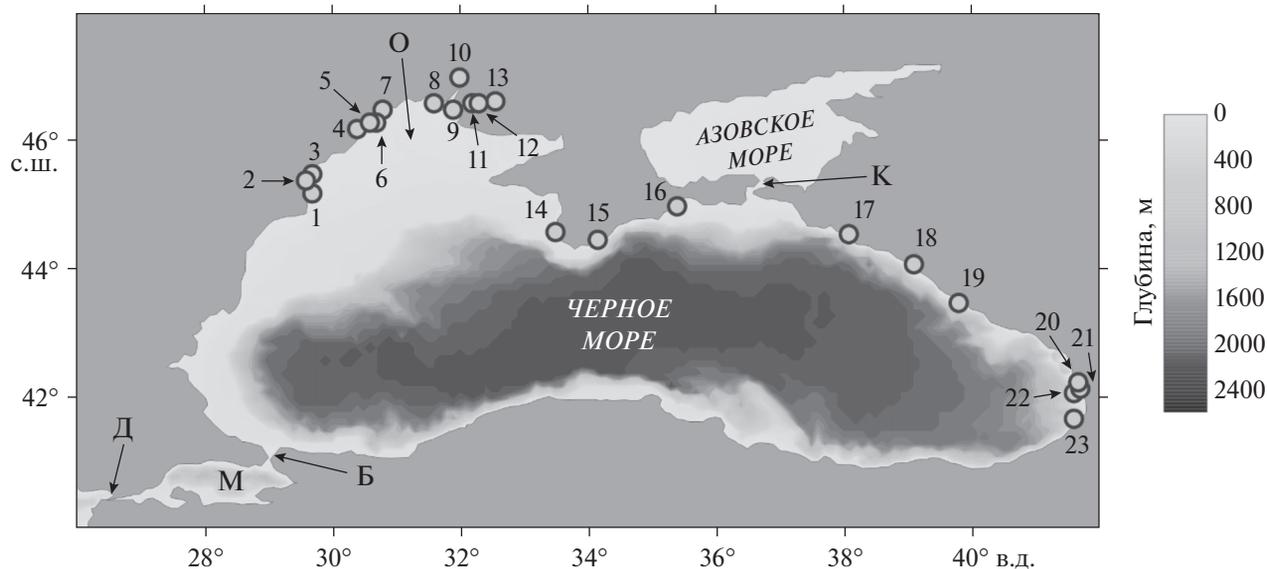
Черное море – одно из самых изолированных морей Мирового океана, что приводит к формированию уникального режима мезомасштабной изменчивости уровня внутри моря. Например, внутри моря формируется собственный прилив, который представляет собой реакцию водной массы бассейна на непосредственное воздействие приливообразующих сил [12]. Сгонно-нагонные колебания в Черном море принимают характер вынужденных стоячих волн, и их генерация связана с атмосферными процессами естественного синоптического периода [5].

История изучения колебаний уровня Черного моря насчитывает не одно столетие (см., например, монографии [14, 6, 8]). Однако лишь небольшая часть исследований была посвящена изучению спектра мезомасштабных колебаний уровня Черного моря [4, 3, 10, 23]. Некоторые особенности периодических и непериодических колебаний уровня до сих пор остаются плохо изученными. Так, в работах [4, 5] авторы обращают внимание на спектральный пик с периодом около 5 часов, причина формирования которого остается неясной.

В настоящем исследовании по длительным рядам наблюдений для 23 станций был проведен анализ спектра колебаний уровня Черного моря. Спектральный анализ позволил выявить ряд интересных эффектов: в частности, существование радиационных приливов в некоторых районах моря и наличие инерционных колебаний уровня в северо-восточной части моря.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе были использованы приведенные к единому отсчету времени (по Гринвичу) длительные ряды наблюдений по 23 прибрежным марео-



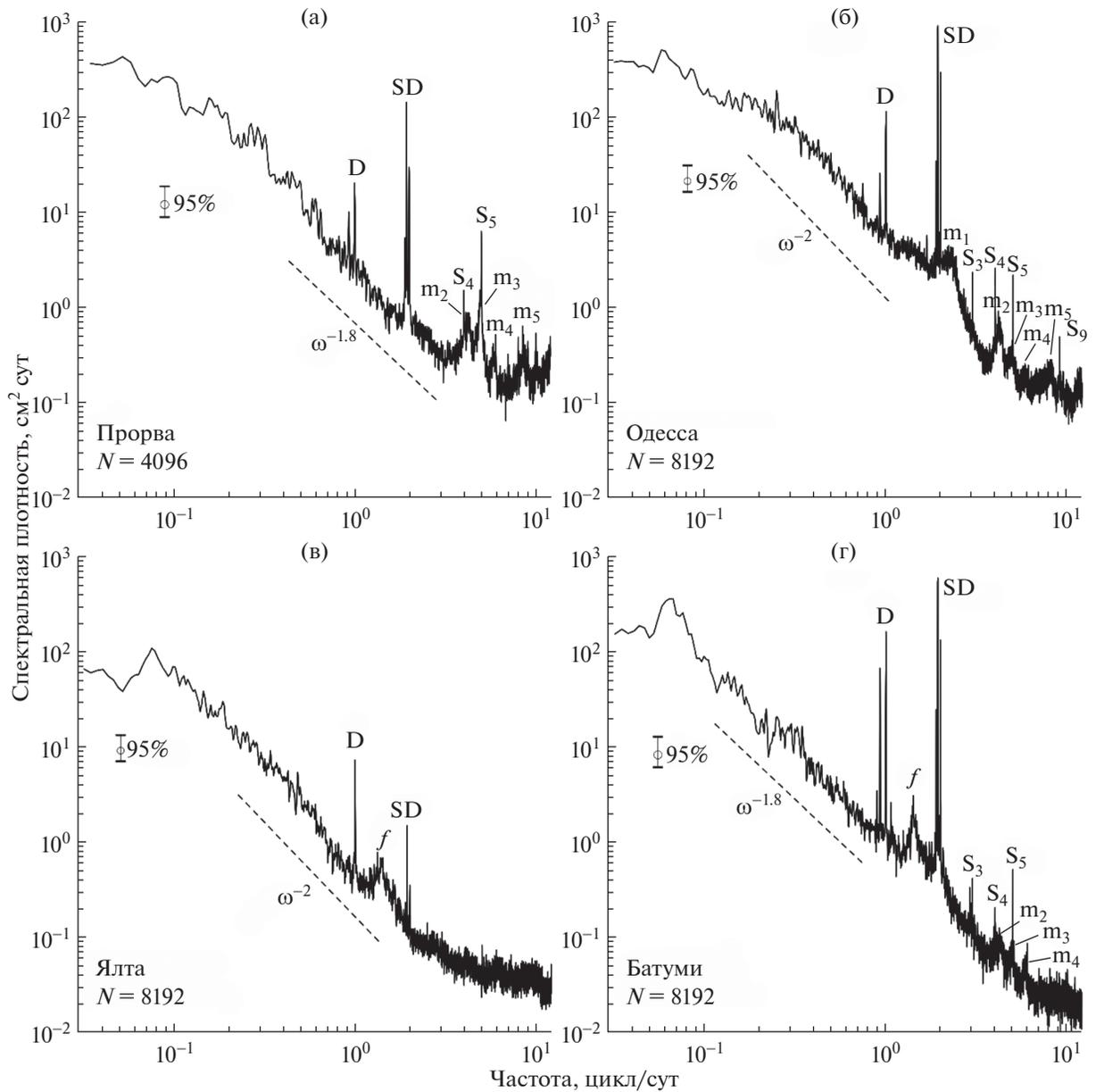
**Рис. 1.** Схема расположения мареографов, данные которых были использованы в настоящем исследовании. Номера (1–23) на рисунке соответствуют номерам станций в таблице. Другие обозначения: М – Мраморное море, Б – пролив Босфор, Д – пролив Дарданеллы, О – Одесский залив, К – Керченский пролив.

графам (далее станциям), располагающимся на северном побережье Черного моря (рис. 1, таблица). Дискретность наблюдений составляла 1 час; выбросы и сбои в рядах были устранены; корот-

кие пропуски (несколько суток) – интерполированы. Ряды, содержащие длинные пропуски, были исключены из анализа. Расчеты спектров были выполнены с помощью быстрого преобразования

Мареографы, ряды наблюдений по которым были использованы в настоящем анализе

№	Название	Широта (с.ш.)	Долгота (в.д.)	Время покрытия, гг.
1	Большое	45.2	29.7	1977–1984
2	Вилково	45.4	29.6	1977–1984
3	Прорва	45.5	29.7	1977–1984
4	Белгород-Днестровский	46.2	30.4	1977–1995
5	Паромная Переправа	46.3	30.6	1980–1995
6	Ильичевск	46.3	30.7	1977–1995
7	Одесса	46.5	30.8	1977–1995
8	Очаков	46.6	31.6	1977–1995
9	Геройское	46.5	31.9	1985–1995
10	Николаев	47.0	32.0	1977–1995
11	Станислав	46.6	32.2	1989–1991
12	Касперовка	46.6	32.3	1977–1995
13	Херсон	46.6	32.6	1977–1995
14	Севастополь	44.6	33.5	1977–1995
15	Ялта	44.5	34.2	1977–1995
16	Феодосия	45.0	35.4	1977–1995
17	Геленджик	44.6	38.1	1977–1992
18	Туапсе	44.1	39.1	1977–2014
19	Сочи	43.5	39.8	1977–2014
20	Кулеви	42.3	41.7	1977–1979
21	Поти (Риони)	42.2	41.7	1977–1979
22	Поти	42.1	41.6	1977–1991
23	Батуми	41.7	41.6	1977–1991



**Рис. 2.** Спектры колебаний уровня Черного моря в пунктах Прорва, Одесса, Ялта и Батуми. D и SD – спектральные пики, соответствующие суточным и полусуточным приливам соответственно;  $f$  – пик с частотой инерционных колебаний,  $m_{1-5}$  – моды собственных колебаний Черного моря,  $S_{3,4,5}$  – радиационные пики,  $N$  – длина спектрального окна.

Фурье с использованием спектрального окна Кайзера–Бесселя с половинным перекрытием.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 представлены спектры колебаний уровня моря для четырех станций, расположенных в различных частях Черного моря: Прорва на северо-западном побережье вблизи устья Дуная, Одесса в Одесском заливе в северной части моря, Ялта на южном побережье Крыма, Батуми в во-

сточной части моря. Длина спектрального окна варьировалась в зависимости от общей длины записи. Так, для рядов наблюдений в Одессе, Ялте и Батуми длина окна составила 8192 измерений (спектральное разрешение  $\Delta\omega \approx 0.00293$  цикл/сут), в Прорве – 4096 измерений ( $\Delta\omega \approx 0.00586$  цикл/сут). В зависимости от длины ряда различались количество степеней свободы ( $\nu$ ) для различных станций (60 – для Прорвы и Батуми, 70 – для Одессы и Ялты) и, как следствие, доверительные интервалы (показаны на рис. 2).

Основная энергия в рассматриваемых спектрах сосредоточена на низких частотах. В сторону высоких частот наблюдается быстрое падение энергии. В частотном диапазоне от 0.1 до 2.5 цикл/сут закон спада спектров близок к  $\omega^{-2}$ , где  $\omega$  — частота спектральной гармоники (на рис. 2 обозначена штриховой линией). Этот закон является типичным для спектров длинных волн в открытом океане [7]. В зависимости от природы колебаний уровня спектр может носить **континуальный** характер с непрерывным распределением энергии по частоте, что присуще “шумовым” турбулентным процессам, или характер **дискретного** спектра в виде резких дельтаобразных пиков, соответствующих регулярным гармоническим составляющим с фиксированными частотами. Изменения уровня, вызываемые переменным атмосферным давлением и ветром, в основном носят характер случайного шума и имеют спектр в виде непрерывной функции от частоты. Приливные колебания уровня проявляются в спектре в виде дельтаобразных пиков с частотами основных приливных гармоник ( $K_1$ ,  $O_1$ ,  $M_2$ ,  $S_2$  и др.). На спектрах колебаний уровня Черного моря, представленных рис. 2, наблюдаются оба типа спектра.

Приливы, несмотря на свои малые амплитуды (несколько сантиметров), ярко выражены в спектрах колебаний уровня (рис. 2) в виде узких и острых пиков, соответствующих частотам главных приливных гармоник: суточных  $K_1$  (период — 23.93 ч),  $O_1$  (25.82 ч) и полусуточных  $M_2$  (12.42 ч),  $S_2$  (12.00 ч). В западной и восточной частях Черного моря (Прорва, Одесса и Батуми на рис. 2) наблюдается неправильный полусуточный характер приливных колебаний [14], и в спектрах полусуточные пики заметно преобладают над суточными. Узловая точка полусуточной амфидромии, в которой амплитуда колебаний близка к нулю, располагается в центральной части Черного моря, вследствие чего полусуточные приливы на побережье Крыма (Ялта на рис. 2) слабее суточных.

В высокочастотной части спектра (на частотах  $>2.5$  цикл/сут) на многих станциях в Черном море (к примеру, в Прорве, Одессе и Батуми на рис. 2) наблюдаются спектральные максимумы на частотах 3, 4, 5, 6, 7 и 8 цикл/сут, кратных **циклу солнечных суток**. Обычно спектры длинноволновых колебаний на частотах выше приливных имеют монотонный характер, который нарушается на частотах порядка 3, 4, 5, 6 циклов в лунные сутки. Эти спектральные максимумы связаны с высокочастотными приливными гармониками, которые образуются в зоне мелководья в результате нелинейного взаимодействия главных гравитационных приливных волн, вызванных преимущественно движениями Луны. В Черном море приливы слабые, и условия для образования нелинейных мелководных гармоник отсутствуют. В рассматрива-

емом случае строгая суточная цикличность заставляет предположить, что данные колебания связаны не с Луной, а с Солнцем, и обусловлены не гравитационными эффектами, а радиационным воздействием Солнца на уровень моря. Движения, непосредственно или косвенным образом связанные с излучением Солнца, называются **радиационными приливами** [19]. Радиационные приливы формируются под совместным воздействием различных периодических факторов: (1) колебания температуры воздуха и вызванные ими колебания температуры поверхности океана, (2) атмосферные приливы и (3) бризовый ветер [11]. Преобладание того или иного фактора зависит от конкретных физико-географических условий района наблюдений. В работах [14, 15] обращалось внимание на роль бризов в усилении суточных колебаний уровня Черного моря.

На частотах выше 2.5 цикл/сут в спектре колебаний уровня Черного моря также наблюдаются локальные увеличения **непрерывной части спектра** (континуума), которые формируются под влиянием собственных колебаний моря ( $m_{1-5}$  на рис. 2). На спектре колебаний уровня моря в Одессе (рис. 2б) можно выделить 5 локальных “горбов”, соответствующих сейшевым модам с центральными периодами  $m_1 - 10.72$  ч,  $m_2 - 5.62$  ч,  $m_3 - 4.96$  ч,  $m_4 - 4.12$  ч,  $m_5 - 3.06$  ч. В Прорве (рис. 2а) выделяются локальные максимумы непрерывной части спектра с центральными периодами  $m_2 - 5.64$  ч,  $m_3 - 4.84$  ч,  $m_4 - 4.12$  ч,  $m_5 - 3.06$  ч. В Батуми ярко выражены три локальных “горба” с периодами  $m_2 - 5.76$  ч,  $m_3 - 4.8$  ч,  $m_4 - 4.1$  ч. В высокочастотной части спектра колебаний уровня на станции Ялта заметных пиков, которые могли бы идентифицироваться как сейши, в непрерывной части спектра не наблюдается.

Интересной особенностью некоторых спектров, представленных на рис. 2 (Ялта и Батуми), является наличие локального широкого пика между суточными и полусуточными острыми пиками. Центральной период этого широкого пика составляет  $\sim 17.2$  ч, что близко к инерционному периоду для акватории Черного моря. Период инерционных колебаний определяется как  $f = 12 \text{ ч} / \sin \varphi$ , где  $\varphi$  — географическая широта. Так, для Черного моря характерен  $f = 16.4 - 18.1$  ч. Подобный пик наблюдается на спектрах всех станций, которые располагаются на северном и восточном побережьях Черного моря (крымское и кавказское побережья). Инерционным движениям в Черном море посвящено большое количество исследований (см. [3, 8]), но обычно эти колебания проявляются в записях измененной скорости течений или плотности воды и являются бароклинным процессом. Вероятно, отклик в колебаниях уровня на инерционных периодах формируется изменениями поля плотности при ме-

андрировании прибрежных течений и прохождении мезомасштабных вихрей.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Спектральные различия между колебаниями разной природы позволяют выделить и рассмотреть отдельные составляющие колебаний уровня Черного моря: приливы, сейши, инерционные волны.

Периоды сейш, выделенных в спектрах колебаний уровня в настоящем исследовании, хорошо соотносятся с результатами численного моделирования собственных колебаний уровня Черного моря из работ [17, 18, 10, 2, 1, 16, 9, 21]. Так, в [9] была получена одноузловая сейшевая мода с периодом  $\sim 10.9$  ч. В [1, 10] не учитывалось вращение Земли, вследствие чего период низшей моды был немного занижен и составил 9.5–9.7 ч. В [17, 2] не учитывалась северо-западная мелководная часть Черного моря, вследствие чего полученные низшие моды имели период около 5–6 ч. Двухузловая сейша с периодом  $\sim 5.6$  ч, которая была обнаружена на спектрах Одессы, Батуми и Прорвы ( $m_2$  на рис. 2), успешно воспроизводилась в [17, 10, 1, 16, 9]; наибольших амплитуд эта сейша достигает в мелководном Одесском заливе. Как видно на рис. 2, эта мода наилучшим образом выражена именно на спектре колебаний уровня в Одессе. Сейшевая мода  $m_3$  с периодом  $\sim 4.8$ – $4.9$  ч лучше всего отображается на спектре колебаний уровня в Прорве, что также соответствует максимумам в пространственном распределении амплитуд собственных колебаний с этим периодом, полученным в [18, 10, 1, 16, 9]. Сейша с периодом  $\sim 4.1$  ч ( $m_4$  на рис. 2) воспроизводилась в [1, 16]. Сейша с периодом  $\sim 3.1$  ч проявляется, в основном, в северо-западной мелководной части моря (Прорва и Одесса на рис. 2) [10, 1, 16, 9]. Хорошее соответствие периодов выделенных локальных пиков непрерывной части спектра с результатами численного моделирования собственных колебаний Черного моря [17, 18, 10, 1, 16, 9] дает основание идентифицировать эти составляющие как сейши Черного моря.

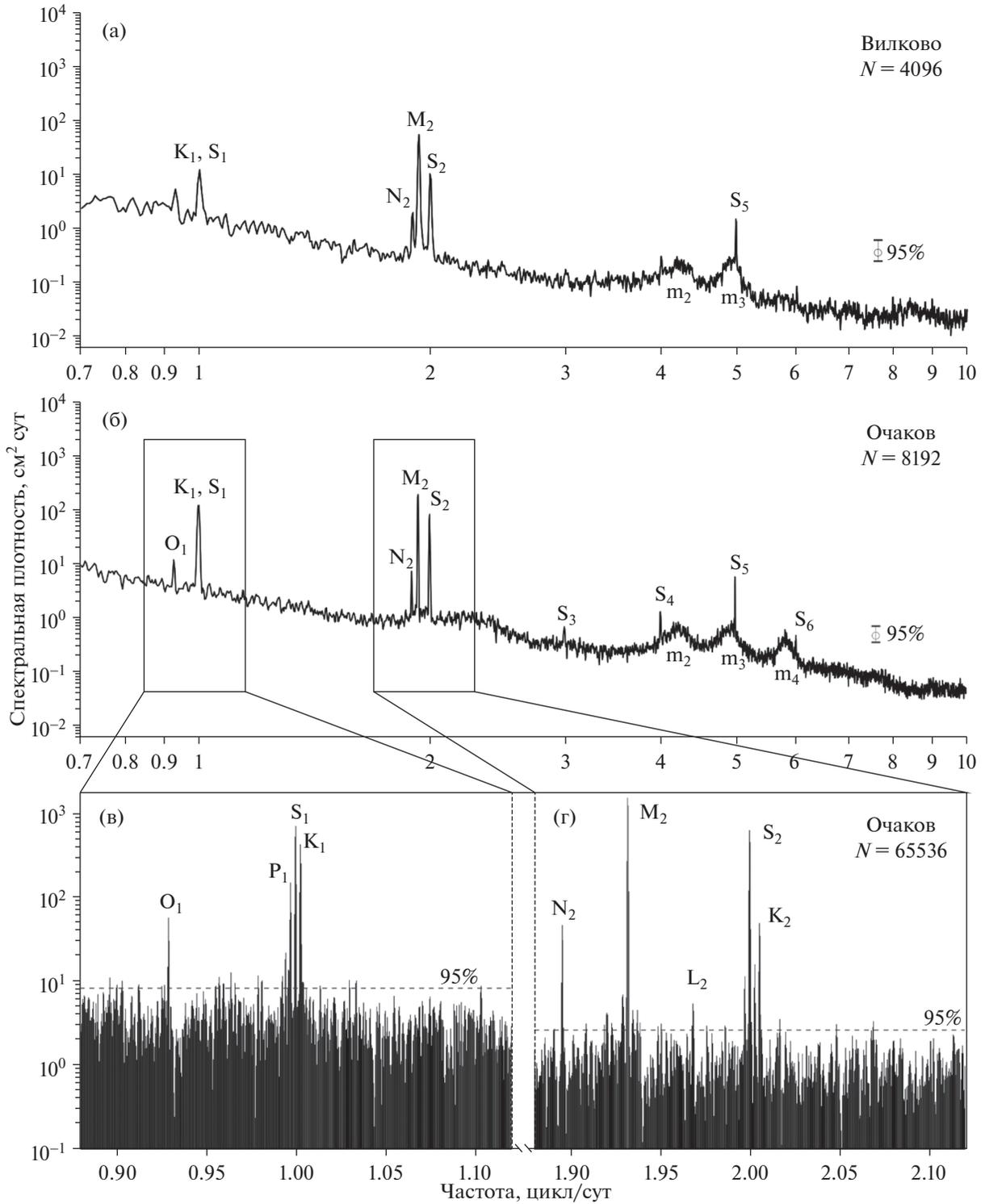
В [3, 8, 9], кроме перечисленных выше сейшевых колебаний уровня Черного моря, также были выделены сейши с периодами 24 и 12 ч. В [9] было выдвинуто предположение, что сейши с периодом около 12 часов вызваны совместным действием атмосферных возмущений и приливообразующих сил. Вероятно, одной из причин подобной интерпретации были широкие спектральные пики [4, 3, 10], полученные при спектральном анализе коротких рядов наблюдений (от нескольких месяцев до 1 года). Для длинных рядов приливные максимумы проявляются в спектрах как острые дельтаобразные пики, т.е. имеют совершенно

другой характер, чем сейши – широкие максимумы в непрерывной части спектра (рис. 3). Таким образом, спектральные максимумы суточной и полусуточной периодичности имеют чисто **приливное** происхождение (астрономическое и радиационное), а предположение о том, что сейши с периодом  $\sim 12.5$  ч вызываются атмосферными возмущениями, ошибочно!

Длительные ряды мареографных наблюдений дают возможность провести подробную спектроскопию и выявить тонкую структуру приливных пиков. На рис. 3в–3г представлены спектры с высоким разрешением для суточного и полусуточного приливных диапазонов, которые позволяют более детально рассмотреть отдельные приливные гармоники. Для анализа использовался длительный ряд наблюдений в Очакове (18 лет). Длина спектрального окна была  $N = 65536$  ч, спектральное разрешение  $\Delta\omega \approx 0.000366$  цикл/сут, число степеней свободы  $\nu = 6$ . Спектральные пики, соответствующие главным приливному гармоникам  $O_1, P_1, S_1, K_1, N_2, M_2, S_2$  и  $K_2$ , четко выделяются над уровнем шума, заметно превышая 95%-ный доверительный интервал спектра.

В суточном приливном диапазоне удалось расщепить соседние гармоники из одной группы ( $P_1-S_1-K_1$ ). При этом амплитуда радиационной гармоники  $S_1$  превосходит амплитуды гармоник  $O_1, P_1, K_1$ . Если соотношение между амплитудами гармоник  $O_1$  и  $K_1$  близко к теоретическому (для разложения приливного потенциала, см. [20]), то отношение амплитуд гармоник  $P_1$  и  $O_1$  сильно отличается от теоретического (в приливном потенциале амплитуды этих гармоник соотносятся как  $H_{O_1}/H_{P_1} \approx 2.15$ ). Вероятно, гармоники  $K_1$  и  $P_1$  имеют не только гравитационное происхождение, но и радиационное – вследствие расщепления главной суточной радиационной гармоники  $S_1$  из-за сезонной модуляции. В отличие от гравитационных, радиационные гармоники не являются строго детерминированными: их частоты устойчивы, но амплитуды изменяются под влиянием различных гидрометеорологических факторов, испытывающих сильные сезонные вариации. Подобный механизм формирования радиационных приливов (и, в частности, радиационных гармоник  $P_1$  и  $K_1$ ) наблюдается в Куршском заливе Балтийского моря [13].

На рис. 3а–3б представлены спектры колебаний уровня в мезомасштабном диапазоне изменчивости для станций Вилково и Очаков. Если в низкочастотной части спектра мезомасштабных колебаний уровня пики, соответствующие суточным и полусуточным приливному гармоникам ( $O_1, K_1, M_2, S_2$  и др.), резко отличаются от непрерывного спектра, то в высокочастотном диапазоне наблюдается более сложная картина. Рядом с пи-



**Рис. 3.** Спектры колебаний уровня моря в Вилково (а) и Очакове (б). Отмечены основные приливные пики, высокочастотные радиационные гармоники ( $S_{3-6}$ ) и моды собственных колебаний ( $m_{2-4}$ ). Спектры с высоким разрешением колебаний уровня моря для суточного (в) и полусуточного (г) диапазонов частот в Очакове. Штриховой линией показаны 95% доверительные интервалы для суточных и полусуточных гармоник, рассчитанные в соответствии с  $\chi^2$  распределением для каждого диапазона.

ками основных сейшевых мод  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_4$  располагаются острые дискретные пики  $S_4$ ,  $S_5$ ,  $S_6$ , соответствующие радиационным приливам. В [11] было показано, что радиационные приливы в Балтийском море проявляются в спектрах колебаний уровня в некоторых пунктах (Нарва и Даугава) в виде острых спектральных пиков на частотах 3, 4, 5, 6, 7 и 8 цикл/сут, кратных циклу солнечных суток. Радиационные пики в Балтийском море имеют близкие значения спектральной плотности, которые немного уменьшаются с увеличением частоты. В Черном море радиационные приливные пики проявляются выборочно. Так, на станции Вилково (рис. 3а) ярко выражен пик  $S_5$  с частотой 5 цикл/сут (период – 4.8 ч), а пики  $S_4$ ,  $S_6$  практически отсутствуют. В спектре колебаний уровня в Очакове (рис. 3б) проявляются гармоники  $S_3$ ,  $S_4$ ,  $S_5$ ,  $S_6$ , но радиационный пик с частотой 5 цикл/сут ( $S_5$ ) также существенно сильнее остальных.

Пик с частотой около 5 цикл/сут впервые был выделен в работе Германа [4], в спектре колебаний уровня моря в поселке Вилково (Одесская область, Украина). Герман предложил две гипотезы происхождения этой волны: 1) пик соответствует продольной одноузловой сейше Черного моря с периодом 4.5 ч; 2) пик соответствует приливной мелководной составляющей. Герман предполагал, что вследствие близости поселка Вилково от морского края дельты реки Дунай (~19 км) в этом районе могут формироваться нелинейные мелководные приливные составляющие [4]. Однако в работе [4] использовались относительно короткие ряды наблюдений (до трех месяцев), что не позволило автору определить более точно частоту и добротность пика с частотой 5 цикл/сут.

Результаты настоящего анализа показывают, что выделенный пик имеет частоту строго 5.00 цикл/сут, кратную циклу солнечных суток. В списке гравитационных мелководных гармоник, сформированных в результате нелинейного взаимодействия основных суточных и полусуточных составляющих, нет компоненты с этой частотой. Таким образом, эта компонента имеет не гравитационное приливное происхождение, а радиационное. Более того, пик с этой частотой проявляется в спектрах колебаний уровня не только в Вилково, но и в Прорве, Очакове, Одессе, Батуми и др. (рис. 2, 3). Вероятно, важным фактором при формировании радиационных приливов в Черном море является близость устьев крупных рек: Дунай для Прорвы и Вилково; Днестр для Одессы и Ильичевска; Южный Буг и Днепр для Очакова, Николаева, Херсона. Но причиной усиления именно пика  $S_5$  по сравнению с другими радиационными составляющими ( $S_3$ ,  $S_4$ ,  $S_6$ ), видимо, является влияние сейшевой моды с периодом

4.8–4.9 цикл/сут. Близость периодов этой сейши и радиационной гармоники  $S_5$  приводит к резонансу и увеличению амплитуды этой гармоники. Периоды других радиационных составляющих ( $S_3$ ,  $S_4$ ,  $S_6$ ) сильно отличаются от периодов основных сейшевых мод, вследствие чего усиления этих гармоник не происходит. Рис. 3б хорошо иллюстрирует формирование резонанса на частоте 5 цикл/сут и его отсутствие на других частотах, кратных циклу солнечных суток.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

На основе длительных рядов наблюдений мы рассмотрели спектр мезомасштабной изменчивости уровня Черного моря. Непрерывная часть спектра, формирующаяся под влиянием атмосферных процессов, спадает с частотой по закону  $\omega^{-2}$ . Приливы формируются внутри Черного моря и проявляются в спектрах в виде острых дельтаобразных пиков на суточных и полусуточных приливных частотах. Между этими спектральными пиками наблюдается широкий локальный максимум на периодах инерционных колебаний. В спектрах изменения скорости течений в Черном море этот пик хорошо известен (см. [3, 8]), но в спектрах колебаний уровня он выявлен впервые.

На частотах выше 3 цикл/сут характерными особенностями спектра изменчивости уровня Черного моря являются широкие максимумы в непрерывной части спектра, которые соответствуют основным сейшевым модам моря с периодами 5.6, 4.8, 4.1, 3.1 ч, и острые дельтаобразные пики радиационных гармоник  $S_3$ ,  $S_4$ ,  $S_5$ ,  $S_6$ . Периоды сейш на рассчитанных спектрах близки к периодам собственных колебаний уровня Черного моря, полученным при помощи численного моделирования в исследовании различных авторов (см., к примеру, [10, 1, 9]).

Основными факторами, влияющими на формирование радиационных приливов в Черном море, предположительно, являются бризовый ветер и сток крупных рек. Заметное преобладание составляющей колебаний уровня с частотой 5 цикл/сут ( $S_5$ ) над другими радиационными гармониками вызвано существованием сейши с близкой частотой, что приводит к резонансу и увеличению амплитуды радиационной гармоники  $S_5$ .

Авторы благодарят А.Б. Рабиновича за полезные обсуждения, Г.В. Резника и А.Ю. Медведеву за ценные замечания по рукописи.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 14-50-00095) и средств ИО РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архипкин В.С., Иванов В.А., Николаенко Е.Г. Моделирование баротропных сейш в южных морях // Моделирование гидрофизических процессов и по-

- лей в замкнутых водоемах и морях. М.: Наука, 1989. С. 104–117.
2. *Баклановская В.Ф., Блатов А.С., Кондрин А.Т., Чечель И.И.* Результаты численного моделирования поверхностных и внутренних сейшевых колебаний в Черном море // *Метеорология и гидрология*. 1986. № 6. С. 74–81.
  3. *Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А. и др.* Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 240 с.
  4. *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.
  5. *Герман В.Х., Левиков С.П.* Вероятностный анализ и моделирование колебаний уровня моря. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 231 с.
  6. *Горячкин Ю.Н., Иванов В.А.* Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006. 210 с.
  7. *Ефимов В.В., Куликов Е.А., Рабинович А.Б., Файн И.В.* Волны в пограничных областях океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 280 с.
  8. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Черного моря. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. 212 с.
  9. *Иванов В.А., Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В.* О сейшах Черного моря // *Метеорология и гидрология*. 1996. № 11. С. 57–63.
  10. *Марамзин В.Я.* Расчет сейшевых колебаний методом конечных элементов в бассейнах произвольной формы // *Теоретические и экспериментальные исследования длинноволновых процессов*. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1985. С. 104–114.
  11. *Медведев И.П., Рабинович А.Б., Куликов Е.А.* Приливные колебания в Балтийском море // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 5. С. 596–609.
  12. *Некрасов А.В.* Приливные волны в окраинных морях. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 247 с.
  13. *Рабинович А.Б., Медведев И.П.* Радиационные приливы у юго-восточного побережья Балтийского моря // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 3. С. 357–365.
  14. *Фомичева Л.А., Рабинович А.Б., Демидов А.Н.* Уровень моря // Проект “Моря СССР”. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV Черное море. Вып. 1. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. С. 329–354.
  15. *Кръстева Е.* Денонощни колебания на черноморско тонииво около Варна и Бургас (Суточните амплитуды уровней Черного моря у Варны и Бургаса) // *Пробл. геогр. (НРБ)*. 1981. № 2. С. 15–24.
  16. *Demirov E.K.* Numerical modelling of the Black Sea eigen-oscillations on a curvilinear boundary fitted coordinate system // *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 1994. V. 21. № 2. P. 83–103.
  17. *Endrös A.* Die Seiches des Schwarzen und Asowschen Meeres und die dortigen Hubhöhen der Gezeiten // *Ann. Hydrogr. Marit. Meteorol.* 1932. V. 60. P. 442–453.
  18. *Engel M.* Hydrodynamisch-numerische Ermittlung von bewegungsvorgängen im Schwarzen Meer // *Mitt. Gnst. Meersk. Univ. Hamburg*. № 22. Hamburg, 1974. 72 p.
  19. *Munk W.H., Cartwright D.E.* Tidal Spectroscopy and Prediction // *Phil. Trans. Roy. Soc. London. Ser. A*. 1966. V. 259. № 1105. P. 533–581.
  20. *Pugh D.T.* Tides, Surges and Mean Sea-Level. Chichester: John Wiley, 1987. 472 p.
  21. *Stanev E.V., Beckers J.M.* Barotropic and baroclinic oscillations in strongly stratified ocean basins: Numerical study of the Black Sea // *J. of Marine Systems*. 1999. V. 19. № 1. P. 65–112.
  22. *Wunsch C.* Bermuda sea-level in relation to tides, weather and baroclinic fluctuations // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1972. V. 10. № 1. P. 1–49.
  23. *Yüce H.* Analysis of the water level variations in the eastern Black Sea // *J. of Coastal Res.* 1993. V. 9. № 4. P. 1075–1082.

## The Spectrum of Mesoscale Sea Level Oscillations in the North Part of the Black Sea: Tides, Seiches, Inertial Oscillations

I. P. Medvedev, E. A. Kulikov

The long-term data from 23 tide gauges were used to analysis the spectrum of mesoscale sea level variability of the Black Sea. Tides have the sharp spectral peaks and they are defined at diurnal and semidiurnal frequencies for all stations. The local wide spectral maximum associated with the inertial oscillations is situated between the diurnal and semidiurnal tidal peaks. This peak is well known in the spectra of the current velocity variations of the Black Sea, but in the sea level spectrum it is identified for the first time. At frequencies  $>3$  cpd sea level variability spectra in the Black Sea have wide maxima in the continuous spectrum, which correspond to the main eigen modes of the sea with periods 5.6, 4.8, 4.1, 3.1 hours; and sharp peaks of radiational harmonics  $S_3, S_4, S_5, S_6$ . The periods of seiches calculated in this study are close to the periods of eigen modes of the Black Sea, obtained by numerical modelling of other authors. The main factors influencing the formation of radiational tides in the Black Sea are presumably wind breeze and large river runoff. The significant predominance of harmonic with the frequency 5 cpd ( $S_5$ ) over other radiational harmonics is caused by the influence of the eigen mode with frequency of about 5 cpd. The proximity of the periods of these oscillations leads to the resonance and to the increase of the amplitude of the radiational harmonic  $S_5$ .