

УДК 551.465

ПРИЛИВЫ В КАСПИЙСКОМ МОРЕ

© 2017 г. И. П. Медведев^{1,2}, Е. А. Куликов¹, А. Б. Рабинович^{1,3}¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия²Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова, Москва, Россия³Институт океанских наук, Сидни, Британская Колумбия, Канада

e-mail: ratamates@gmail.com

Поступила в редакцию 29.06.2016 г.

После доработки 22.09.2016 г.

Длительные ряды ежечасных наблюдений на 12 прибрежных мареографах использованы для изучения особенностей приливных колебаний уровня Каспийского моря. Суточные и полусуточные приливы четко выражены в спектрах колебаний уровня моря в Среднем и Южном Каспии. С помощью спектрального анализа с высоким разрешением показано, что суточные приливные колебания уровня моря в Среднем Каспии имеют гравитационное происхождение, а в Южном Каспии – преимущественно радиационное: амплитуда радиационной гармоники S_1 в Южном Каспии превосходит амплитуды гравитационных гармоник O_1 , P_1 , K_1 . В Северном Каспии гравитационные приливы отсутствуют, а проявляются только слабовыраженные радиационные приливы. В Среднем и Южном Каспии преобладает полусуточный тип прилива. Гармонический анализ приливов для отдельных годовых серий уровня моря с последующим векторным осреднением за весь период наблюдений был использован для оценки амплитуд и фаз основных приливных гармоник. Амплитуда гармоники M_2 достигает 5.4 см в Южном Каспии (станция Аладжа). Максимальная величина (размах) приливных колебаний наблюдается в юго-восточной части Каспийского моря (Аладжа) – до 21 см, в западной части Южного Каспия и в Среднем Каспии эта величина составляет от 5 до 10 см.

DOI: 10.7868/S0030157417020137

1. ВВЕДЕНИЕ

Приливы – один из основных видов движения вод в Мировом океане. Они формируются под воздействием приливообразующих сил Луны и Солнца. Их изменчивость во времени приводит к движению водных масс, которое проявляется в виде периодических колебаний уровня моря и связанных с ними течений. Приливы в Мировом океане представляют собой сумму двух типов приливных колебаний: **индуцированного (соколебательного) прилива**, являющегося реакцией на периодическое воздействие со стороны смежного водоема, в котором происходят свои приливные движения, и **собственного прилива**, являющегося откликом водной массы бассейна на непосредственное воздействие приливообразующей силы [17, 26]. В окраинных морях преобладает **индуцированный** тип прилива, вызванный воздействием приливных волн, проникающих со стороны океанских бассейнов, к которым эти моря примыкают. В изолированные внутриматериковые моря, такие как Черное и Балтийское, приливные волны из соседних водоемов практически не проникают, и преобладающую роль в этих бассейнах играет **собственный** прилив [16, 26, 28]. Уникальным объектом для анализа формирования **собственно-**

го прилива является самый крупный замкнутый бассейн на нашей планете – Каспийское море. Приливы в Каспийском море генерируются под непосредственным действием приливообразующей силы и являются чисто собственными. Согласно [17], основными факторами, определяющими формирование собственного прилива, являются размеры и форма бассейна, его ориентация относительно сторон света и географическая широта.

Изучение приливов в Каспийском море имеют длительную, но нерегулярную историю исследований: почти за век было опубликовано всего несколько работ [3–5, 8, 12, 14, 23], дающих ограниченное представление об особенностях приливных колебаний в этой акватории. В “предварительном сообщении” Малиновского [14], опубликованном 90 лет назад и основанном на анализе 30-суточных ежечасных рядов наблюдений в трех пунктах Каспийского моря, было показано, что в данном бассейне преобладает полусуточный характер прилива, а высота сизигийного прилива может достигать 7.7 см. В работах [3, 4] на основе спектрального анализа 3-месячных рядов наблюдений на 8 пунктах побережья Каспийского моря авторы выделили суточную и полусуточные составляющие, имеющие, по мнению

Таблица 1. Характеристика мареографических станций, использованных для анализа колебаний уровня Каспийского моря

№	Станции	Другие названия	Широта (° с.ш.)	Долгота (° в.д.)	Период наблюдений
1	Лагань	Каспийский ³	45.38	47.37	04.1977–09.1988
2	Форт-Шевченко	Форт-Урицкий ⁴	44.60	50.30	01.1977–03.1991
3	Махачкала	Петровск-Порт ⁵	42.97	47.55	01.1977–06.2014
4	Изберг	Избербаш	42.53	47.92	01.1977–06.1978
5	Баку	–	40.40	49.90	01.1977–05.1991
6	о. Жилой	о. Чиллов	40.40	50.60	06.1977–02.1983
7	о. Свиной	о. Санги-Мугань	39.80	49.60	11.1977–07.1990
8	Бекташ ⁶	Карабогаз ⁷	41.50	52.60	01.1977–12.1991
9	Кара-Богаз-Гол	–	41.10	52.90	02.1977–02.1992
10	Красноводск	Туркменбаши ⁸	40.00	53.00	01.1977–06.1988
11	Аладжа	Хазар, Челекен	39.45	53.12	02.1978–12.1984
12	о. Огурчинский	Огурджали	39.10	53.10	01.1977–11.1989

³ С 1871 по 1944 гг. и с 1991 г. по н.в. – Лагань, с 1944 по 1991 гг. – Каспийский.

⁴ С 1882 по 1924 гг. – Форт-Александровский, с 1924 по 1939 гг. – Форт-Урицкий, с 1939 г. – Форт-Шевченко.

⁵ До 1857 г. – Петровское, с 1857 по 1921 гг. – Петровск-Порт.

⁶ Также Бекдаш.

⁷ С 2002 г. – Карабогаз.

⁸ С 1993 г. – Туркменбаши.

авторов, различный генезис: полусуточные приливы имеют гравитационное происхождение, а суточные формируются под влиянием морских бризовых ветров. Максимальная величина прилива (размах колебаний), согласно [8], наблюдается вблизи о. Огурчинский и составляет 12 см. В работе [23] на основе месячных рядов наблюдений была рассчитана величина прилива для 7 станций Каспийского моря и представлены амплитуды и фазы трех полусуточных приливных гармоник для станции Баку. В работе [12], посвященной изучению сейш Каспийского моря, на основе годовых серий ежечасных наблюдений за 1979 г. на 6 станциях были построены спектры колебаний уровня и рассчитаны гармонические постоянные приливов¹. Спектральный анализ показал, что практически на всех станциях доминируют полусуточные приливы, а суточные на некоторых станциях не обнаруживаются вообще (о. Свиной) [12]. Полусуточная приливная волна представляет собой амфидромическую систему с центром в районе Апшеронского порога, вращающуюся против часовой стрелки (как круговая волна Кельвина).

С момента публикации рассмотренных выше работ прошло уже несколько десятков лет, но особенности приливов в Каспийском море до сих пор остаются плохо изученными. Так, требует детального исследования механизм формирования суточных приливов и роль бризовых ветров в их

¹ В работе [12] все фазы рассчитанных приливных гармоник содержали ошибку на 180°.

генерации. Также остается неясным происхождение пика с периодом 4.7 ч, который был выделен в спектрах колебаний уровня Каспийского моря в работах [3, 8, 12]. Длительные ряды мареографических наблюдений, ставшие доступными в последние годы, позволяют подробно изучить особенности приливных колебаний уровня Каспийского моря и существенно увеличить точность расчета гармонических постоянных приливов.

2. ДАННЫЕ

В работе были использованы ряды ежечасных наблюдений за колебаниями уровня Каспийского моря на 12 прибрежных станциях (табл. 1, рис. 1). Станции расположены на постсоветском побережье, включая территории современных государств: Российской Федерации, Казахстана, Азербайджана и Туркменистана. Длительность рядов наблюдений по станциям различается: от 3 до 38 лет (табл. 1). Самый длительный ряд ежечасных наблюдений, использованный в настоящем исследовании, был сформирован для Махачкалы – 38 лет. На станции Лагань наблюдения за колебаниями уровня проводились преимущественно только в теплое время года (с апреля по ноябрь). Данные по всем 12 станциям были приведены к единому отсчету времени (Гринвичскому). Ряды наблюдений были тщательно проверены, выбросы и сбои были устранены; короткие пропуски (менее суток) – интерполированы. Годовые серии наблюдений, содержащие длинные пропуски, были исключены из анализа.

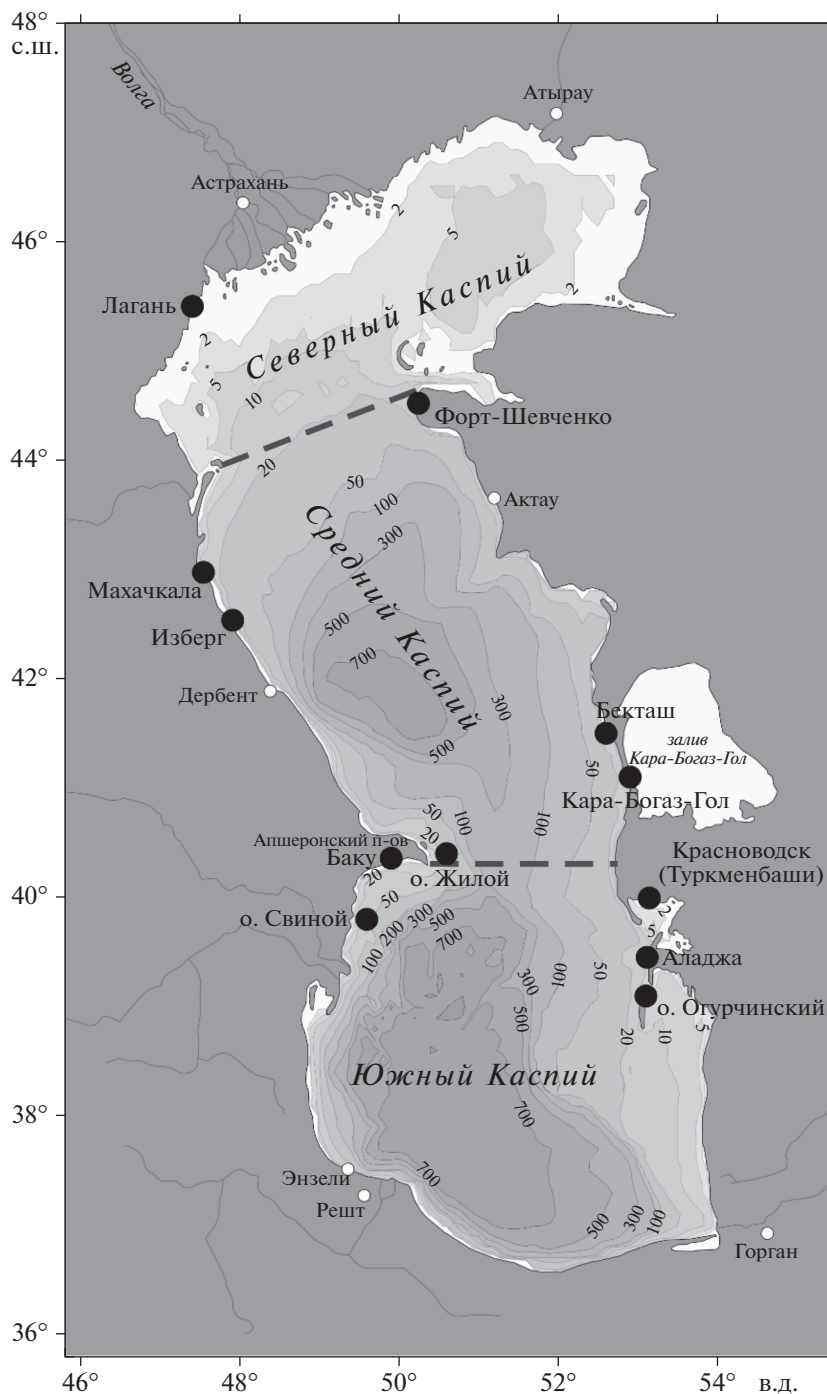


Рис. 1. Карта Каспийского моря. Береговая линия соответствует отметке -28 м относительно нуля Кронштадтского футштока. Черными кружками обозначены мареографы, данные которых были использованы в настоящей работе.

3. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Каспийское море — самый большой по площади замкнутый водоем на Земле. Акваторию моря принято разделять на три бассейна: Северный, Средний и Южный Каспий [6, 7]. По площади эти три бассейна примерно равны, но сильно от-

личаются по объему вод, средней и максимальной глубине. Так, объем вод Северного Каспия составляет всего 1% от общего объема моря [33]. Северный Каспий представляет собой мелководный бассейн с глубинами не более 10–15 м, а около 20% его площади имеют глубины меньше 1 м [6].

Одной из главных особенностей гидрологического режима Каспийского моря является измен-

чивость его уровенной поверхности [6]. Межгодовые колебания уровня Каспийского моря преимущественно определяются речным стоком [2]. Изучению этой проблемы посвящено большое количество научных работ (см., к примеру, монографии [2, 9, 24]). На фоне многолетних однонаправленных тенденций, в изменении уровня Каспийского моря проявляются долгопериодные осцилляции колебаний уровня моря с периодами 4.5 и 11 лет [10, 11, 13]. Существенное влияние на формирование гидрологического режима Каспийского моря в синоптическом диапазоне частот оказывают сгонно-нагонные колебания уровня и связанные с ними течения. Сгонно-нагонные процессы формируются под влиянием сильных продолжительных ветров и максимальных высот достигают в мелководном Северном Каспии. Наибольшая высота нагона отмечалась на западном побережье Северного Каспия у пос. Каспийский — 4.5 м над средним уровнем моря, наибольшие сгоны (до 2.5–3 м) — на восточном побережье Северного Каспия [6]. При нагонах затапливаются значительные площади суши шириной до 50 км, при сгонах осушаются обширные акватории прибрежных мелководий шириной до 15 км. На площади затопления (осушки) и абсолютные отметки подъемов (спадов) уровня моря очень сильно влияют многолетние колебания уровня Каспийского моря [6], которые приводят к смещению береговой черты моря. Сезонные колебания уровня моря, размах которых может достигать 70 см [11, 19], являются причиной смещения береговой линии в Северном Каспии на 1–3 км [22]. Для Северного Каспия характерны суточные колебания уровня моря, вызываемые бризовыми ветрами. Согласно [6], высота бризовых суточных колебаний уровня моря может достигать 40–50 см. Существенное влияние на мезомасштабные колебания уровня Каспийского моря оказывают собственные колебания бассейна (сейши). Они лучше выражены для Среднего и Южного Каспия, которые более глубоководные, по сравнению с Северным Каспием. Для Каспийского моря типичны сейши с периодами 9.1–9.5, 4.4–4.7 и 2.7–3 ч [1, 4, 8, 12, 18, 20].

Рассмотренные выше виды колебаний уровня моря, различные по временному и пространственному масштабу, оказывают влияние на формирование приливов в Каспийском море. Так, многолетние колебания уровня могут существенно изменять площадь моря, что приводит к изменению гармонических постоянных. Также, видимо, гармонические постоянные приливов в Каспийском море должны испытывать значимые сезонные изменения. Собственные частоты моря (модальная структура) определяют реакцию моря на внешнее воздействие и непосредственное формирование суточных или полусуточных приливных волн. Бризовые суточные колебания

уровня могут исказить оценку вклада гравитационных приливов в Каспийском море. Для выявления всех вышеперечисленных эффектов при анализе следует использовать длительные ряды наблюдений, которые позволят существенно увеличить разрешающую способность и рассмотреть тонкую структуру спектра приливных колебаний: “расщепить” суточные и полусуточные приливные пики на отдельные гармоники и оценить роль бризовых эффектов (подобно тому, как это удалось выполнить авторами для Балтийского моря [16, 21]).

4. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ МОРЯ

В работах [1, 3, 8, 12] был рассмотрен спектральный состав мезомасштабных колебаний уровня Каспийского моря и были выявлены пики, соответствующие суточным и полусуточным приливам и основным сейшевым модам. В этих работах спектральный анализ проводился по относительно коротким рядам наблюдений с длительностью от одного месяца до одного года, вследствие чего спектральное разрешение не позволило дать достоверную оценку происхождению некоторых пиков, в частности, в суточном диапазоне частот. Спектральный анализ длительных рядов наблюдений, проведенный в настоящей работе, позволяет исследовать тонкую спектральную структуру, детально рассмотреть природу отдельных пиков в спектре колебаний уровня Каспийского моря.

На рис. 2 представлены спектры мезомасштабных и синоптических колебаний уровня Каспийского моря для 8 прибрежных мареографных станций, расположенных в Среднем Каспии (Махачкала, Изберг, Форт-Шевченко и Бекташ) и Южном Каспии (Баку, Красноводск, о. Огурчинский и о. Свиной). Спектры были рассчитаны с помощью быстрого преобразования Фурье с использованием спектрального окна Кайзера–Бесселя длиной $N = 8192$ ч (спектральное разрешение — $\Delta f \approx 0.00293$ цикл/сут) с половинным перекрытием. Единственным исключением была станция Изберг, для которой $N = 4096$ ч ($\Delta f \approx 0.00586$ цикл/сут). В зависимости от общей длины рядов варьировалось количество степеней свободы (ν) для различных станций: от $\nu = 10$ для Изберга до $\nu = 159$ для Махачкалы. Количество степеней свободы и доверительные интервалы по каждой станции показаны на рис. 2.

Как было показано в работах [15, 16], сейши и приливы во внутренних морях имеют различные спектральные особенности. Приливы — это регулярные гармонические колебания уровня моря, которые имеют дискретный спектр и проявляются в спектре в виде острых пиков на частотах ос-

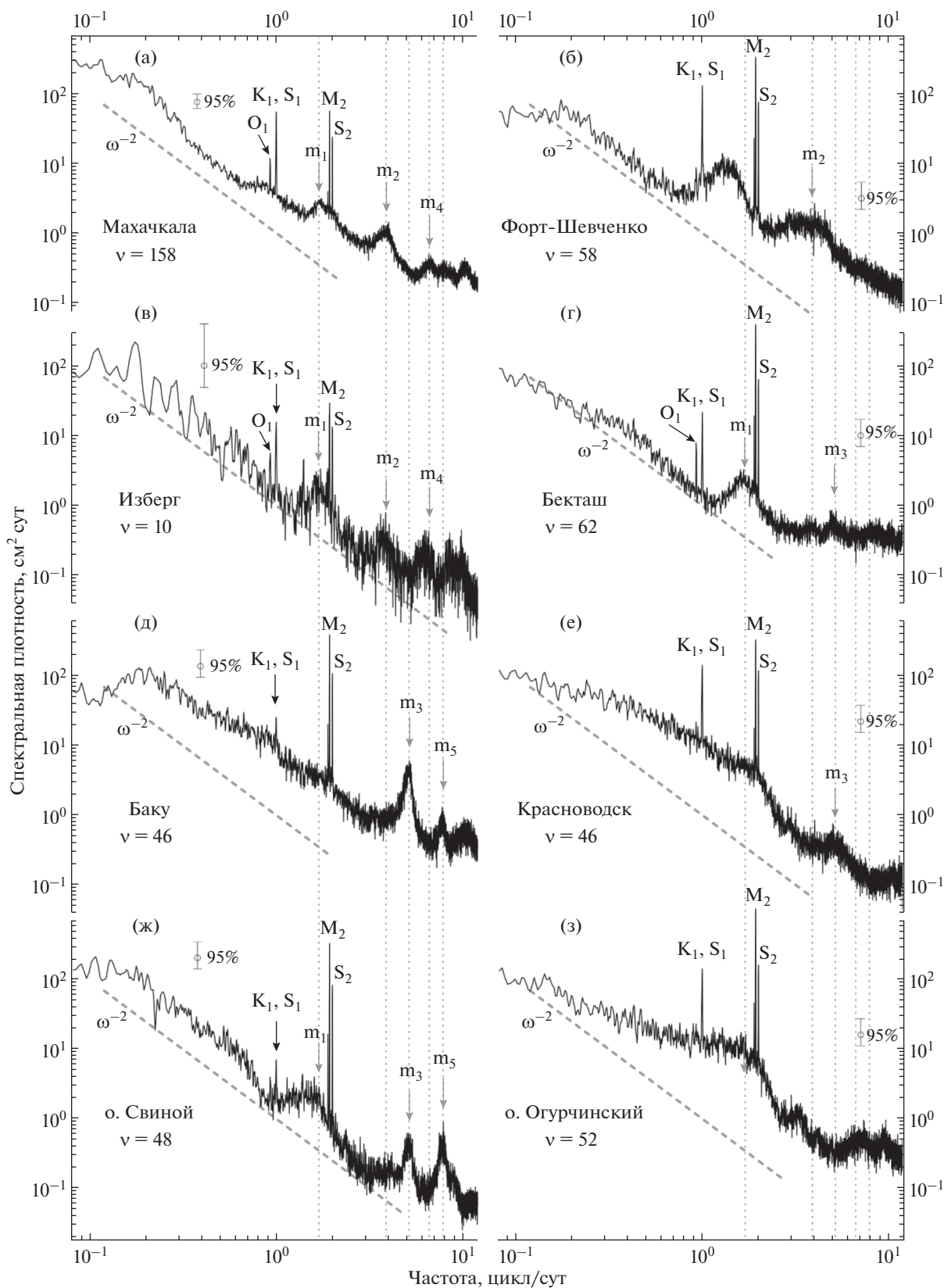


Рис. 2. Спектры колебаний уровня Каспийского моря на станциях Махачкала (а), Форт-Шевченко (б), Изберг (в), Бекташ (г), Баку (д), Красноводск (е), о. Свиной (ж), о. Огурчинский (з). Отмечены пики, соответствующие главным приливным гармоникам (O_1 , S_1 , K_1 , M_2 , S_2), а также основные моды собственных колебаний Каспийского моря (m_{1-5}). Указано число степеней свободы при расчетах спектров (ν), и показаны соответствующие доверительные интервалы.

новых приливных гармоник (например, K_1 , O_1 , M_2 , S_2 на рис. 2). Сейши – это собственные колебания акватории, т.е. стоячие периодические волны, образующиеся в результате реакции водных масс замкнутого или полужамкнутого водоема на нарушение равновесного состояния [32]. Сейши в замкнутых акваториях возбуждаются в результате воздействия внешней силы на поверхность океана: атмосферного давления, приземного ветра, осадков. Период сейш определяется частотно-избирательными свойствами акватории (геометрией бассейна) и проявляются в виде поднятия непрерывной части спектра (континуума) на резонансных частотах. В действительности, локальные увеличения непрерывной части спектра могут формироваться не только под влиянием сейш (т.е. свободных колебаний), но и под воздействием вынужденных метеорологических колебаний уровня моря (к примеру, сгонно-нагонных колебаний), но при использовании достаточно длинных рядов наблюдений эти увеличения нивелируются.

Приливы, несмотря на свои малые амплитуды (несколько сантиметров), четко выделяются в спектрах колебаний уровня Каспийского моря (рис. 2) в виде узких и острых пиков на частотах главных приливных гармоник. На всех станциях ярко выражены полусуточные приливные пики, соответствующие главной лунной гармонике M_2 (период – 12.42 ч) и главной солнечной гармонике S_2 (12.00 ч). В суточном приливном диапазоне на всех рассматриваемых спектрах (рис. 2) хорошо выделяется приливной пик с частотой ~1 цикл/сут, который может соответствовать как приливной гравитационной лунно-солнечной деклинационной гармонике K_1 (период – 23.93 ч), так и радиационной гармонике S_1 (24.00 ч). Пик, соответствующий суточной главной лунной гармонике O_1 (25.82 ч), на станциях в Северном и Южном Каспии не превышает уровень спектрального шума (см. рис. 2б, 2д, 2з). На большинстве спектров колебаний уровня Каспийского моря полусуточные приливные пики превышают суточные. Только на спектре колебаний уровня моря в Махачкале (рис. 2а) суточный и полусуточный пики имеют близкие значения.

В высокочастотной части спектров наблюдаются увеличения энергии непрерывного спектра, проявляющиеся в виде локальных “горбов”, соответствующих сейшевым модам Каспийского моря. Сейшевые пики, наиболее характерные для спектров колебаний уровня Каспийского моря, имеют следующие периоды (рис. 2): $T(m_1) = 13.9$ ч, $T(m_2) = 6.1$ ч, $T(m_3) = 4.67$ ч, $T(m_4) = 3.6$ ч и $T(m_5) = 3.06$ ч. Сейшевый спектральный пик с периодом 13.9 ч выделяется на большинстве рассматриваемых спектров. В Среднем Каспии (Махачкала, Изберг, Бекташ) пик, соответствующий

сейшевой моде m_1 , имеет более высокую добротность², чем в Южном Каспии (о. Свиной). На станции о. Огурчинский этот пик m_1 представлен в виде широкого горба собственных колебаний с центральным периодом, близким к 14 ч. Пики, соответствующие сейшевым модам m_2 , m_4 , проявляются в основном в Среднем Каспии. В западной части акватории Южного Каспия ярко выражены собственные колебания с периодами $T(m_3) = 4.67$ ч и $T(m_5) = 3.06$ ч. Спектральные пики на соответствующих частотах имеют относительно высокую добротность, что свидетельствует об устойчивости этих колебаний. В спектре колебаний уровня моря на станции Форт-Шевченко наблюдаются широкие горбы собственных колебаний с периодами ~ 17.9 ч и 6 ч.

Выявленные выше периоды собственных колебаний хорошо соответствуют результатам численных расчетов собственных колебаний уровня Каспийского моря, представленных в работе [12]. Спектральный анализ позволил качественно разделить приливные колебания, которым соответствуют дискретные спектральные пики, от сейшевых мод, проявляющихся в виде горбообразного поднятия относительно непрерывного спектра. На частотах выше 2.5 цикл/сут в спектрах проявляются только сейшевые пики, а высокочастотные приливные гармоники (как радиационные [16], так и мелководные гравитационные [31]) отсутствуют.

Если полусуточные спектральные пики на всех рассматриваемых станциях имеют классический приливной характер – гармоника M_2 главная и примерно в 2.5–3 раза превышает гармонику S_2 , то особенностью суточных пиков является их отличие от классического спектра суточных приливных гармоник (см., например, [29, 31]). Для понимания природы этих отличий требуется проведение спектрального анализа с высоким разрешением, позволяющим разделить гармоники с близкими периодами, в частности P_1 , S_1 и K_1 .

5. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Длительные ряды мареографных наблюдений дают возможность провести подробную спектроскопию приливов и “расщепить” суточные и полусуточные пики на отдельные приливные составляющие [29]. Этот вид анализа особенно эффективен в районах с сильными приливными колебаниями, в частности, для исследования не-

² Добротность (Q -factor) – безразмерная величина, характеризующая резонансные свойства линейной колебательной системы. Характеризует скорость затухания колебаний после их возбуждения (чем выше добротность, тем медленнее затухание); приблизительно может быть оценена как отношение резонансной частоты ω к ширине резонансного пика $\Delta\omega$ на уровне убывания энергии в ~2 раза [32].

линейных эффектов (см., например, [25]). Но и в акваториях со слабыми приливами подобный подход позволяет выявить некоторые особенности формирования приливных колебаний, незаметные на обычных спектрах (см. [15, 16, 21]).

В настоящей работе для подробной спектроскопии были выбраны ряды ежечасных наблюдений на станциях Махачкала (34 года), о. Огурчинский (13 лет) и Баку (11 лет). Длина спектрального окна для всех трех станций была $N = 65536$ ч, спектральное разрешение $\Delta f \approx 0.000366$ цикл/сут, число степеней свободы $\nu = 10$ для Махачкалы и $\nu = 2$ — для о. Огурчинского и Баку. Основное внимание было уделено суточному и полусуточному диапазонам частот (рис. 3).

В полусуточном приливном диапазоне главные гармоники (N_2 , M_2 , S_2 и K_2) четко выделяются на фоне шума, заметно превышая 95%-й доверительный интервал спектра. В Южном Каспии на некоторых спектрах с высоким разрешением значимый пик имеет полусуточная солнечная большая эллиптическая гармоника T_2 (рис. 3б). Отношение амплитуд 4-х главных полусуточных гармоник (M_2 , S_2 , N_2 и K_2) примерно соответствует теоретическому.

В суточном приливном диапазоне спектральный анализ с высоким разрешением позволил выявить ряд интересных особенностей. Использование длительных рядов наблюдений дали возможность расщепить соседние гармоники $P_1-S_1-K_1$. На большинстве станций в Каспийском море амплитуда радиационной гармоники S_1 заметно превосходит амплитуды гравитационных гармоник O_1 , P_1 и K_1 . На спектрах колебаний уровня моря на станциях, располагающихся в восточной части Южного Каспия, отсутствует гармоника O_1 , а амплитуды гармоник K_1 и P_1 примерно одинаковые, хотя в разложении приливного потенциала амплитуды этих гармоник соотносятся примерно как 3 : 1 [29, 31]. В западной части Южного Каспия (рис. 3в) на спектрах колебаний уровня с высоким разрешением выделяется только гармоника S_1 , а суточные гравитационные приливные пики (O_1 , P_1 и K_1) не превышают уровень шума. Видимо, суточные приливные колебания уровня моря в Южном Каспии имеют преимущественно не гравитационное, а радиационное происхождение, т.е. связаны с радиационным воздействием Солнца на поверхность моря [31], в частности, с бризовыми ветрами. Частоты гармоник K_1 (0.9973 цикл/сут) и P_1 (1.0027 цикл/сут) связаны с частотой гармоники S_1 простым соотношением

$$f(K_1, P_1) = f(S_1) \pm \Delta f_y, \quad (1)$$

где $\Delta f_y = 1$ цикл/год ≈ 0.0027 цикл/сут. Из этого соотношения следует, что добавление к домини-

рующей гармонике S_1 гармоник K_1 и P_1 должно приводить к годовой модуляции несущей гармоники. Глубина этой модуляции зависит от соотношения между основной и дополнительными гармониками. Таким образом, наблюдаемые гармоники K_1 и P_1 являются в данном случае не гравитационными приливными гармониками, а “гармониками-спутниками”, образующимися 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 (в частности, радиационных гармоник P_1 и K_1) наблюдается в Куршском заливе Балтийского моря [21].

Для проверки предположения о сезонной изменчивости суточных приливных колебаний уровня Каспийского моря были построены “летние” и “зимние” спектры (рис. 4). Для этого ряды наблюдений по каждой станции были разделены на два временных периода: с середины апреля по середину октября (“летний”) и с середины октября по середину апреля (“зимний”). Далее, отдельно для каждого из этих двух периодов были построены осредненные спектры (за много лет). Спектральный анализ проводился аналогично тому, как это было описано в разделе 3; длина окна Кайзера-Бесселя при расчете спектров составляла $N = 2^{11} = 2048$ ч, что обеспечило частотное разрешение спектра $\Delta f = 0.0117$ цикл/сут.

На рис. 4 представлены результаты спектрального анализа для станций Форт-Шевченко, Бекташ и Красноводск. Спектральные характеристики полусуточных приливов на всех станциях не меняются от “зимнего” сезона к “летнему”, что является свидетельством их гравитационного (астрономического) происхождения. Аналогичный характер носят суточные приливы на станции Бекташ: суточные пики на летних и зимних спектрах мало отличаются друг от друга (рис. 4б). Принципиально иной характер имеют суточные приливы на станциях Форт-Шевченко (рис. 4а) и Красноводск (рис. 4в): спектральные пики, соответствующие суточным приливам, хорошо выражены летом, а зимой значительно ослабевают или почти полностью исчезают. Это подтверждает предположение, что суточные приливы в Южном Каспии являются **радиационными**. Видимо, они формируются под влиянием **бризовых ветров**. Как видно на рис. 2, радиационные приливы наиболее ярко проявляются в восточной, относительно мелководной, части Южного Каспия. Т.е. результаты настоящего исследования подтверждают и

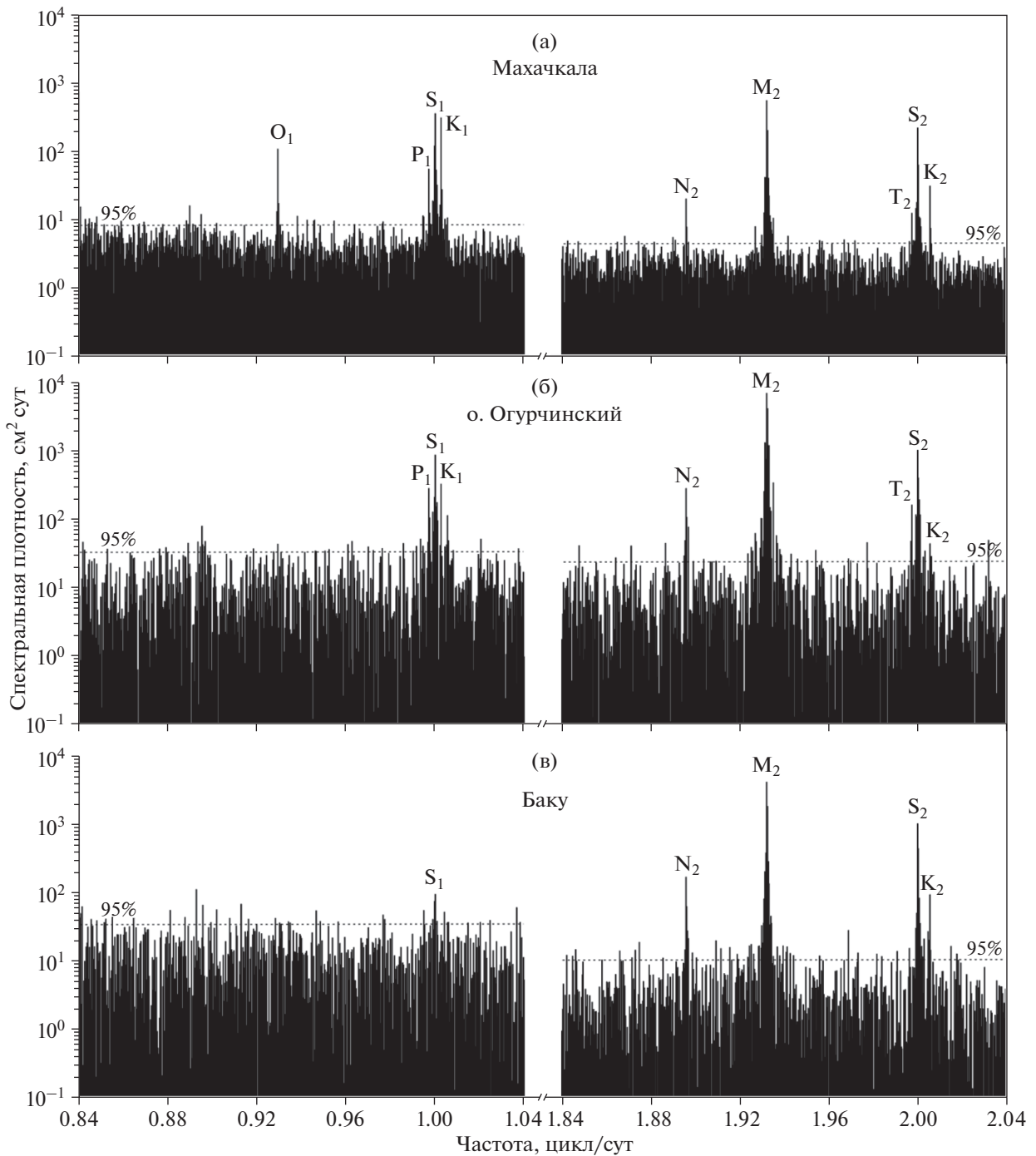


Рис. 3. Спектры с высоким разрешением колебаний уровня Каспийского моря для суточного и полусуточного диапазонов частот на станциях Махачкала (а), о. Огурчинский (б) и Баку (в). Тонкой штриховой линией показаны 95%-ные доверительные интервалы для суточных и полусуточных гармоник, рассчитанные в соответствии с χ^2 распределением для каждого диапазона.

конкретизируют предположения, сделанные в работах [3, 4].

Исследования спектральных особенностей приливов в Среднем и Южном Каспии позволяют предположить, что и в мелководном Северном Каспии радиационные приливы должны быть яр-

ко выражены, и, по крайней мере, в суточном диапазоне они должны существенно преобладать над гравитационными. К сожалению, физико-географические особенности Северного Каспия (обширное мелководье с глубинами менее 5 м, ледовый покров зимой и значительные межгодовые

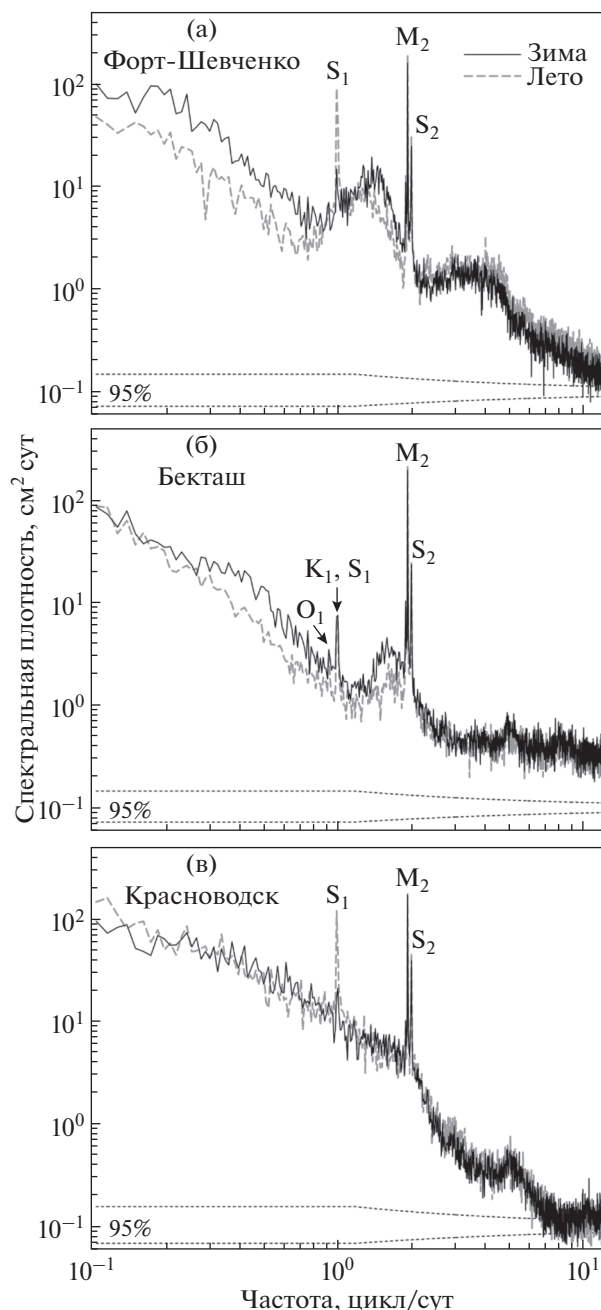


Рис. 4. “Летние” и “зимние” спектры колебаний уровня моря на станциях Форт-Шевченко (а), Бекташ (б), Красноводск (в).

колебания среднего уровня моря) препятствуют качественным измерениям изменений уровня моря в этом районе. В нашем распоряжении была лишь одна станция со сравнительно длинными рядами данных – Лагань (рис. 1, табл. 1). Однако наблюдения по этой станции покрывают только теплый сезон (с апреля по ноябрь), а в зимние месяцы измерения практически отсутствуют. Для спектрального анализа колебаний уровня по станции Лагань использовался ряд наблюдений с 1977 по 1986 гг. Спектр сглаживался с использова-

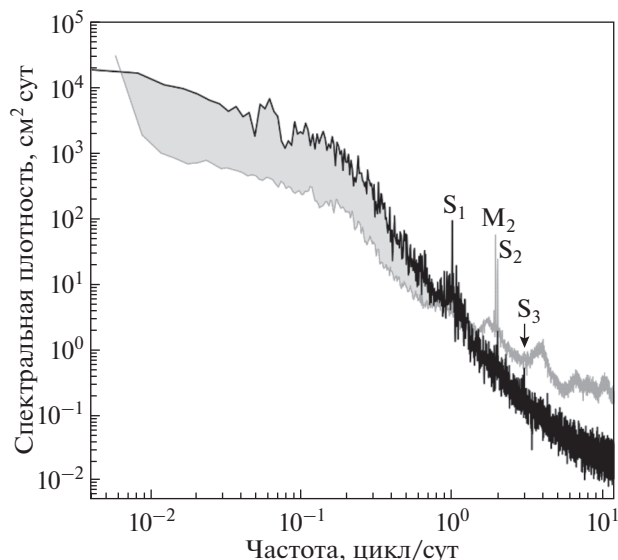


Рис. 5. Спектр колебаний уровня моря на станции Лагань, рассчитанный по “летним” сериям наблюдений (с апреля по ноябрь) с 1977 по 1986 гг. Серым цветом показан спектр колебаний уровня на станции Форт-Шевченко.

нием прямоугольного окна с временным сегментом $N = 5555$ ч (с апреля по ноябрь), без перекрытия. В результате был получен спектр “летних” колебаний уровня моря (рис. 5), на котором выделяются пики главных радиационных гармоник S_1 и S_2 и их обертоны S_3 и S_4 , а основные гравитационные суточные и полусуточные гармоники (K_1 , O_1 и M_2) **отсутствуют**. Вероятно, мелководность акватории Северного Каспия препятствует формированию астрономических (гравитационных) приливов и благоприятствует формированию радиационных приливов, вызванных бризовыми ветрами.

6. ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИЛИВНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Для расчета гармонических постоянных приливов в настоящем исследовании использовался метод наименьших квадратов [30]. При помощи гармонического анализа были вычислены приливные составляющие для 11 прибрежных станций в Каспийском море. Для расчетов использовались годовые серии наблюдений, не имеющие значительных пропусков в записях. Результаты расчетов за отдельные годы в дальнейшем векторно осреднялись, что позволило получить среднее многолетние значения амплитуд и фаз [16]. Всего было рассчитано 14 приливных гармоник: 6 суточных (Q_1 , O_1 , P_1 , S_1 , K_1 и J_1), 4 полусуточных (N_2 , M_2 , S_2 и K_2) и 4 высокочастотных мелководных (MK_3 , MO_3 , M_4 и MS_4). Результаты анализа представлены в табл. 2. Амплитуды основных полусу-

точных гармоник больше, чем основных суточных. Так, амплитуда гармоники M_2 в Каспийском море варьируется от 0.7 см (Изберг) до 5.4 см (Аладжа), S_2 от 0.4 см (о. Жилой) до 2.2 см (Аладжа). Гармоника N_2 имеет максимальную амплитуду также в Аладже – 1.1 см, максимальные амплитуды гармоники K_2 тоже наблюдаются в Южном Каспии – до 0.4-0.5 см. Амплитуды суточных гармоник P_1 и K_1 в Каспийском море не превышают 1 см, O_1 – менее 0.4 см, а Q_1 и J_1 – менее 0.2 см. Максимальные амплитуды мелководных гармоник наблюдаются в Аладже – 0.12 см для M_{O_3} и M_4 , в остальных пунктах они меньше 0.1 см.

Для оценки ошибки при расчете приливных амплитуд (ϵ_H) и фаз (ϵ_G) использовались следующие выражения [31]:

$$\epsilon_H = \sqrt{\frac{\sigma_{\Delta f}^2}{2T\Delta f}}, \quad (2)$$

$$\epsilon_G = \frac{1}{H} \sqrt{\frac{\sigma_{\Delta f}^2}{2T\Delta f}} = \frac{\epsilon_H}{H} \text{ (в радианах),}$$

где $\sigma_{\Delta f}^2$ – дисперсия шума (фоновых колебаний) в частотном диапазоне Δf (суточном или полусуточном), T – длина серии, использованной для расчета (в данном случае $T = 1$ год), H – амплитуда соответствующей приливной гармоники. Из формул (2) видно, что ошибка при оценке амплитуд является абсолютной и единой для всех гармоник конкретного частотного диапазона, а ошибка в фазе – относительной: чем меньше амплитуда данной гармоники, тем больше ошибка.

Согласно данным спектрального анализа (раздел 4), для Махачкалы $\sigma_{\Delta f}^2(1) = \Delta f \cdot \hat{S}_x(1) = 1.15 \text{ см}^2$ для суточного диапазона и $\sigma_{\Delta f}^2(2) = \Delta f \cdot \hat{S}_x(2) = 0.89 \text{ см}^2$ для полусуточного диапазона, где $\hat{S}_x(1, 2)$ – среднее значение спектра для соответствующего диапазона (рис. 3а), а $\Delta f = 0.2$ цикл/сут – ширина диапазона. Для о. Огурчинского аналогичные значения дисперсии существенно выше: $\sigma_{\Delta f}^2(1) = 3.22 \text{ см}^2$ и $\sigma_{\Delta f}^2(2) = 2.02 \text{ см}^2$ (рис. 3б). Рассчитанные значения ошибок в суточных амплитудах для этих станций составляют $\epsilon_H(1) = \pm 0.09$ см (Махачкала) и ± 0.15 см (о. Огурчинский); для полусуточных амплитуд эти значения – $\epsilon_H(2) = \pm 0.08$ см и ± 0.12 см соответственно.

Значения ошибки фазы (ϵ_G) обратно пропорциональны амплитуде гармоник. Для Махачкалы эти ошибки составляют (с учетом данных табл. 2): $\pm 10^\circ$ (K_1), $\pm 16^\circ$ (O_1), $\pm 6^\circ$ (M_2) и $\pm 9^\circ$ (S_2); для о. Огурчинского – $\pm 19^\circ$ (K_1), $\pm 34^\circ$ (O_1), $\pm 2^\circ$ (M_2) и $\pm 5^\circ$ (S_2). Для других станций ошибки амплитуд и фаз в целом аналогичны значениям для станции

о. Огурчинский. Таким образом, ошибки рассчитанных значений амплитуд относительно невелики, а для фаз могут быть значительными. По результатам расчета гармонических постоянных за разные годы была произведена оценка разброса и определена ошибка расчета конкретных гармоник на отдельных станциях. В зависимости от станции ошибка в расчете амплитуд суточной гармоники K_1 меняется от 15 до 30%. Величина расчетной ошибки гармоники O_1 на некоторых станциях достигает 35–50% от амплитуды. Разброс в фазе основных суточных гармоник составляет $14\text{--}21^\circ$. Амплитуда и фаза приливной составляющей M_2 меняется от года к году слабо: ошибка в амплитуде – менее 7–9% от ее значения, в фазе ~ $5\text{--}7^\circ$. Осреднение результатов расчетов по большому числу лет позволяет существенно поднять точность: ошибка уменьшается как $1/\sqrt{n}$, где n – число использованных для расчета независимых годовых серий наблюдений.

По результатам гармонического анализа можно выделить несколько интересных особенностей:

1) На половине рассматриваемых станций амплитуда гармоники P_1 превышает амплитуду гармоники O_1 , хотя в приливном потенциале амплитуды этих гармоник соотносятся как $H_{P_1}/H_{O_1} \approx 0.47$.

2) Амплитуда радиационной гармоники S_1 в Каспийском море достигает 2.7 см и практически на всех станциях (за исключением станций Кара-Богаз-Гол и Бекташ) превышает амплитуды гравитационных гармоник O_1 и K_1 .

3) На станциях с сильными радиационными колебаниями уровня моря (Аладжа, Красноводск) амплитуды гармоник P_1 и K_1 практически равны. Это подтверждает предположение об определяющем вкладе радиационной составляющей в формирование этих гармоник и то, что эти гармоники фактически связаны с сезонной модулирующей гармоникой S_1 .

По полученным гармоническим постоянным были рассчитаны тип и величина приливных колебаний уровня Каспийского моря. Тип приливных колебаний (“form factor”) определяется отношением основных суточных гармоник к главным полусуточным [31]:

$$F = \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2} + H_{S_2}}. \quad (3)$$

В Южном Каспии преобладает полусуточный тип прилива ($F = 0\text{--}0.25$), в Среднем Каспии – смешанный неправильный полусуточный тип ($F = 0.3\text{--}0.6$).

На рис. 6 представлены карты, отображающие пространственные особенности распределения амплитуд и фаз гармоник K_1 , O_1 , M_2 и S_1 . Амплитуды полусуточных гармоник на восточном бере-

Таблица 2. Амплитуда (H) и фаза (G) основных приливных гармоник, тип прилива (F) и максимальный размах приливных колебаний (R) на разных станциях в Каспийском море

Станции	Q ₁		O ₁		P ₁		S ₁		K ₁		N ₂		M ₂		S ₂		K ₂		F	R, см
	H, см	G, °	H, см	G, °	H, см	G, °	H, см	G, °	H, см	G, °	H, см	G, °	H, см	G, °	H, см	G, °	H, см	G, °		
Форт-Шевченко	0.09	3	0.24	331	0.30	285	1.45	138	0.80	328	0.50	219	2.13	226	0.96	248	0.24	229	0.34	9.7
Махачкала	0.08	21	0.32	38	0.21	346	0.94	203	0.51	33	0.13	234	0.83	238	0.50	303	0.15	294	0.62	4.9
Изберг	0.08	139	0.37	14	0.15	332	0.69	162	0.47	18	0.20	211	0.74	224	0.55	273	0.17	231	0.64	4.8
Баку	0.11	291	0.08	147	0.22	324	0.55	223	0.20	353	0.43	355	2.18	4	1.09	14	0.31	19	0.09	8.8
о. Жилой	0.08	153	0.06	221	0.06	219	0.25	335	0.18	206	0.24	296	1.01	302	0.37	327	0.14	319	0.18	3.8
о. Свиной	0.03	38	0.13	42	0.10	52	0.33	327	0.15	65	0.43	354	2.17	4	1.02	19	0.30	17	0.34	9.7
Бекташ	0.03	205	0.26	251	0.17	248	0.38	176	0.39	251	0.43	153	2.25	162	0.84	177	0.27	175	0.21	8.0
Кара-Богаз-Гол	0.13	168	0.29	243	0.14	243	0.38	215	0.42	237	0.44	139	2.17	147	0.81	160	0.26	156	0.24	8.1
Красноводск	0.05	202	0.33	252	0.82	257	1.28	130	0.80	263	0.42	133	2.11	161	1.23	179	0.23	191	0.34	10.2
Аладжа	0.24	135	0.31	245	0.96	248	2.74	155	0.95	275	1.07	128	5.36	138	2.22	173	0.56	206	0.17	21.4
о. Огурчинский	0.11	195	0.25	244	0.73	255	1.58	167	0.46	257	0.71	119	3.80	131	1.36	161	0.41	179	0.14	14.4

гу моря больше, чем на западном. Пространственное распределение амплитуд гармоник K_1 имеет схожий характер. Отметим, что фаза гармоники K_1 на большом участке на восточном побережье моря меняется всего на 28° (~ 2 ч). Фаза гармоники M_2 в Южном Каспии различается на 180° , т.е. в этой части моря между западным и восточным побережьями располагается точка амфидромии этой гармоники. Амплитуда гармоники O_1 в Среднем Каспии и на восточном побережье Южного Каспия составляет 0.3–0.4 см. Минимальные амплитуды гармоники O_1 , так же как и гармоники K_1 , наблюдаются вблизи Апшеронского полуострова. Наибольшие амплитуды суточной радиационной гармоники S_1 наблюдаются в юго-восточной части Каспийского моря: в Аладже – до 2.7 см.

Оценка величины прилива (“tidal range”, R в табл. 2) делалась по предвычисленным временным рядам приливных колебаний уровня Каспийского моря длительностью 100 лет, которые были сформированы на основе рассчитанных гармонических постоянных прилива. Величина прилива рассчитывалась как максимальный размах приливных колебаний уровня в течение одних лунных суток. Максимальная величина прилива наблюдается в юго-восточной части Каспийского моря (Аладжа) – до 21 см. Величина прилива в Южном Каспии и в восточной части Среднего Каспия – 8–10 см (рис. 7а). На западном побережье Среднего Каспия величина прилива составляет 5 см.

Для оценки роли приливных колебаний в мезомасштабной изменчивости уровня Каспийского моря был рассчитан процентный вклад приливов (гравитационных и радиационных) в общую дисперсию колебаний уровня (D) в частотном диапазоне от 0.5 до 6 цикл/сут для всех станций (рис. 7б). Максимум вклада наблюдается на станции Бекташ (27% от D). На станции Аладжа, где наблюдается максимальный размах приливных колебаний, вклад прилива в общую дисперсию в указанном выше частотном диапазоне составляет 22.5%. Наименьшую относительную роль приливы играют на западном побережье – 7.6% в Махачкале и 11.7% в Баку.

7. МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ

Результаты проведенных исследований показывают, что суточные и полусуточные гравитационные приливные волны распространяются преимущественно в Среднем и Южном Каспии. В мелководный Северный Каспий гравитационные приливы не проникают. В этой части моря преобладают радиационные приливные колебания суточной периодичности, которые формируются под влиянием бризовых ветров. Аналогич-

ные колебания также характерны для восточной части Южного Каспия (Аладжа, о. Огурчинский), где наблюдаются аномально высокие амплитуды гармоник K_1 , P_1 и S_1 . Таким образом, вывод, сделанный в работах [3, 8], что суточные приливы в Каспийском море “обязаны своим происхождением влиянию бризов”, для Северного и Южного Каспия подтверждается, но при этом в Среднем Каспии в суточном диапазоне частот все же преобладают гравитационные гармоники.

Для выявления особенностей формирования приливов в Каспийском море был рассчитан статический отклик (“equilibrium response”) для отдельных приливных гармоник:

$$R_j = H_j^{\text{obs}} / H_j^{\text{eq}}. \quad (4)$$

Он представляет собой отношение наблюдаемой амплитуды j -той гармоники (H_j^{obs}) к теоретической (H_j^{eq}), значение которой определяется разложением приливного потенциала [31]. На рис. 8 видно, что в полусуточном приливном диапазоне в Среднем Каспии $R_j \approx 1.0$, т.е. полусуточный прилив здесь для всех гармоник носит практически статический характер, а на большей части Южного Каспия $R_j \approx 2.0$ – 3.0 , что говорит о резонансном усилении полусуточных приливов в этой акватории. Более того, на станции Аладжа в полусуточном приливном диапазоне наблюдается явный наклон функции R_j (увеличение R_j в сторону низких частот): от 5.0 для K_2 (период $T = 11.97$ ч) до 6.5 для N_2 ($T = 12.66$ ч), что, видимо, вызвано влиянием моды собственных колебаний уровня Каспийского моря с периодом 13.9 ч.

В суточном приливном диапазоне функция R_j для большинства станций близка к статической, за исключением станций, располагающихся в юго-восточной части моря. На станциях Аладжа, о. Огурчинский и Красноводск наблюдается аномальный отклик R_j для гармоники P_1 (рис. 8), что является следствием не гравитационного, а радиационного происхождения этой гармоники в Южном Каспии.

Для получения количественной оценки роли радиационной составляющей в формировании полусуточных приливов в Каспийском море был использован метод, основанный на предположении о гладкости функции отклика для гравитационных гармоник; нарушение гладкости данной функции свидетельствует о влиянии радиационных приливов. Данный подход, позволяющий разделить гравитационную и радиационную составляющие, был впервые обоснован в фундаментальной работе Манка и Картрайта [29] и успешно применялся для оценки радиационной компоненты гармоники S_2 в работах [27, 34, 35]. Как показали Зетлер [35] и Вунш [34], величина радиацион-

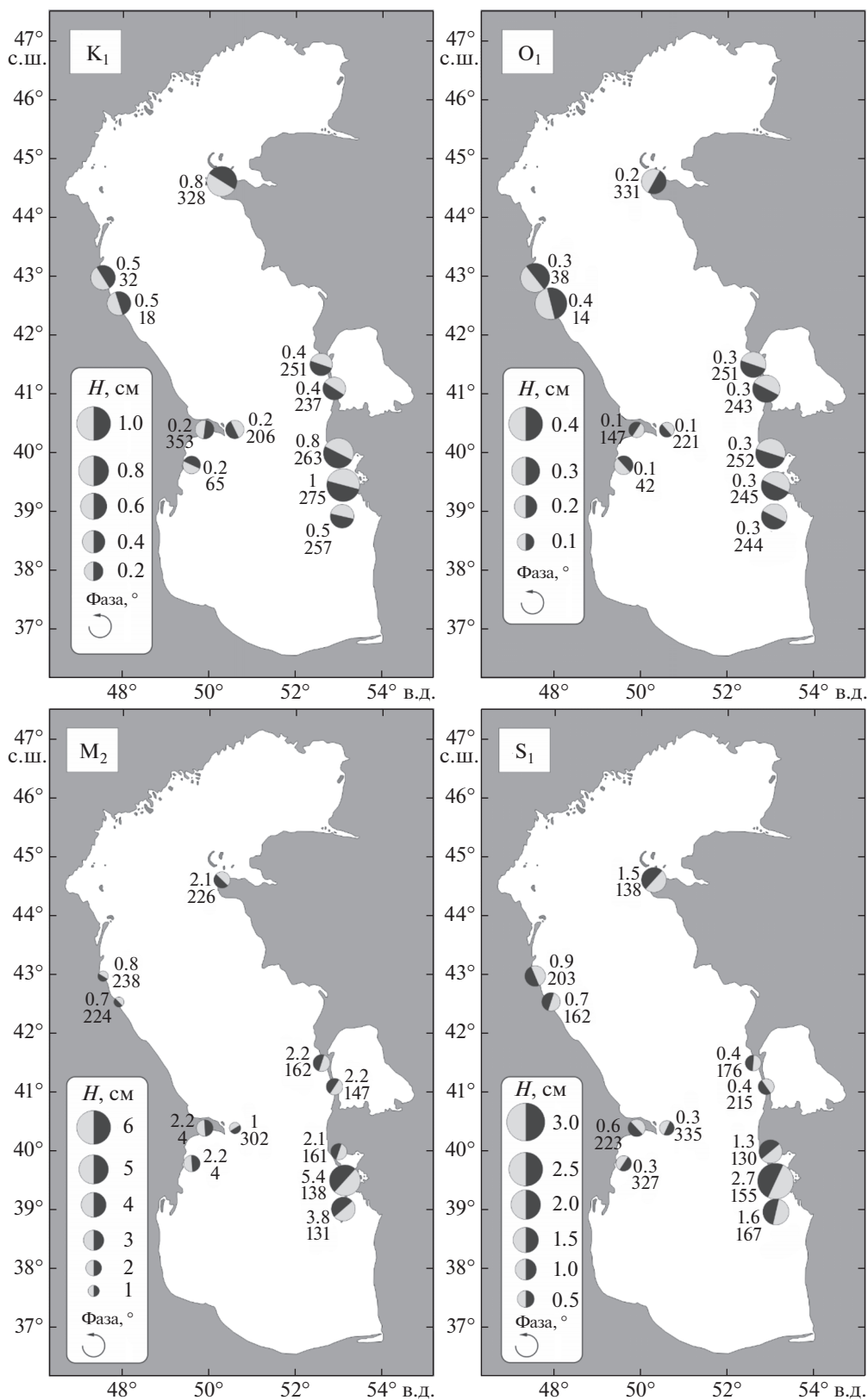


Рис. 6. Пространственная картина распределения амплитуд и фаз суточных гравитационных гармоник K_1 и O_1 , лунной полусуточной гармонике M_2 и суточной радиационной гармонике S_1 . Значения амплитуд и фаз представлены графически (размером кружка и углом наклона полукруга соответственно) и нанесены рядом с соответствующими пунктами: верхняя – амплитуда, нижняя – фаза.

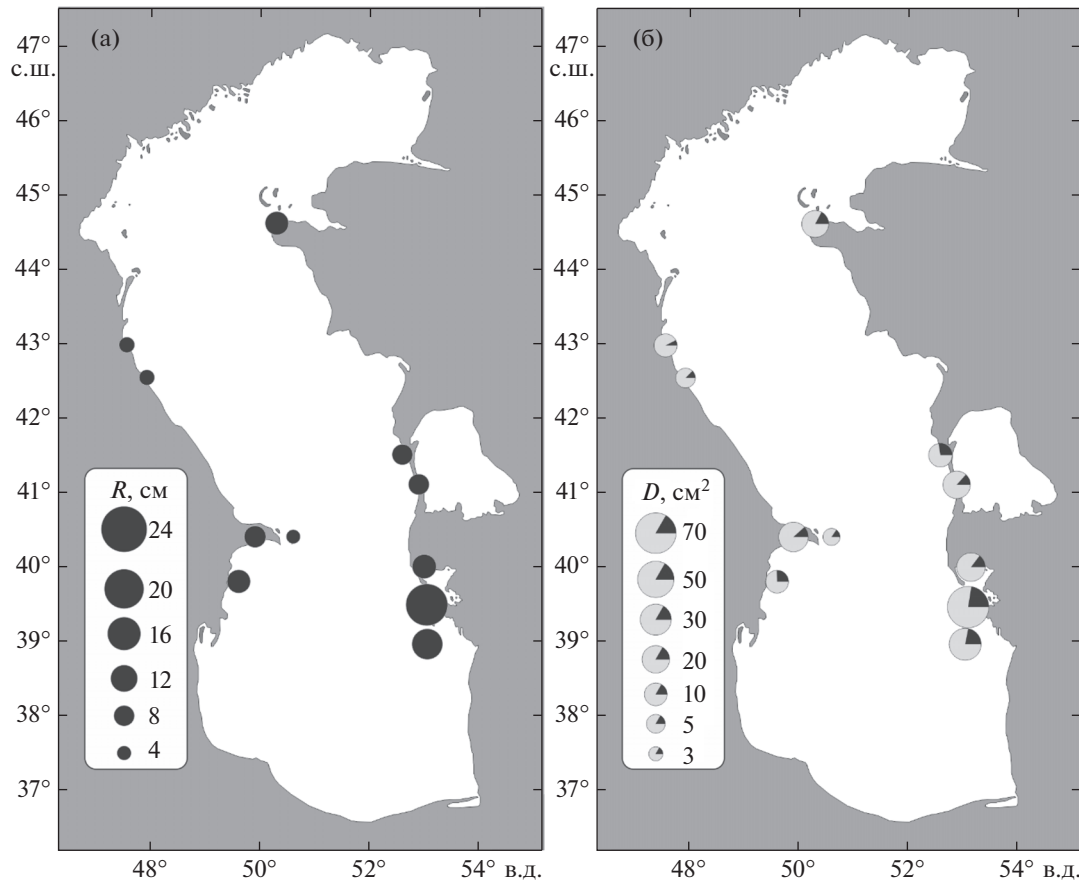


Рис. 7. Карта распределений максимального размаха приливных колебаний уровня моря (а) и общая дисперсия колебаний уровня моря в частотном диапазоне от 0.5 до 6 цикл/сут с указанным процентным вкладом приливов (черный сегмент) (б).

ной компоненты гармоник S_2 обычно составляет около 16% от гравитационной гармоник S_2 .

На рис. 9 показаны отношения наблюдаемых и теоретических амплитуд полусуточных гармоник и их разницы фаз на станции о. Огурчинский. Гладкие функции, аппроксимирующие разницу фаз и относительную амплитуду гармоник N_2 , M_2 и K_2 , позволяют определить фазу и амплитуду гравитационной гармоник S_2^g . Радиационная компонента S_2^r рассчитывалась как векторная разность суммарной гармоник S_2^t и ее гравитационной части S_2^g . Подобная процедура проводилась отдельно для каждого года. Отметим, что при проведении настоящего анализа гармоник N_2 , M_2 и K_2 рассматривались как чисто гравитационные, т.к. N_2 и M_2 не имеют никакой, а K_2 имеет ничтожно малую радиационную составляющую [35]. Результаты анализа для Каспийского моря, представленные в табл. 3, подтверждают выводы, сделанные в настоящей работе ранее: радиационные приливы играют достаточно важную роль в приливном режиме Каспийского моря, причем не только в суточном, но и в полусуточ-

ном диапазоне частот. Отношение амплитуд компонент S_2^r к S_2^g варьируется от 0.15 до 0.70. На станции Аладжа, где наблюдаются максимальные амплитуды гармоник S_2 , радиационная компонента составляет 46% от гравитационной.

8. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

На основе длительных ежедневных рядов наблюдений были исследованы особенности приливных колебаний уровня Каспийского моря. Результаты спектрального анализа показали наличие четко выраженных пиков, соответствующие суточным и полусуточным приливным гармоникам. В Среднем и Южном Каспии полусуточные приливные пики заметно превосходят суточные. Высокочастотные приливы в спектрах колебаний уровня моря этих акваторий не проявляются и на частотах выше 2.5 цикл/сут выделяются только широкие спектральные пики, связанные с собственными модами Каспийского моря. Только на станции Лагань в Северном Каспии были выделены слабо выраженные высокочастотные радиационные гармоник S_3 и S_4 , видимо, связанные с суточной асимметрией бризового ветра. Пик, со-

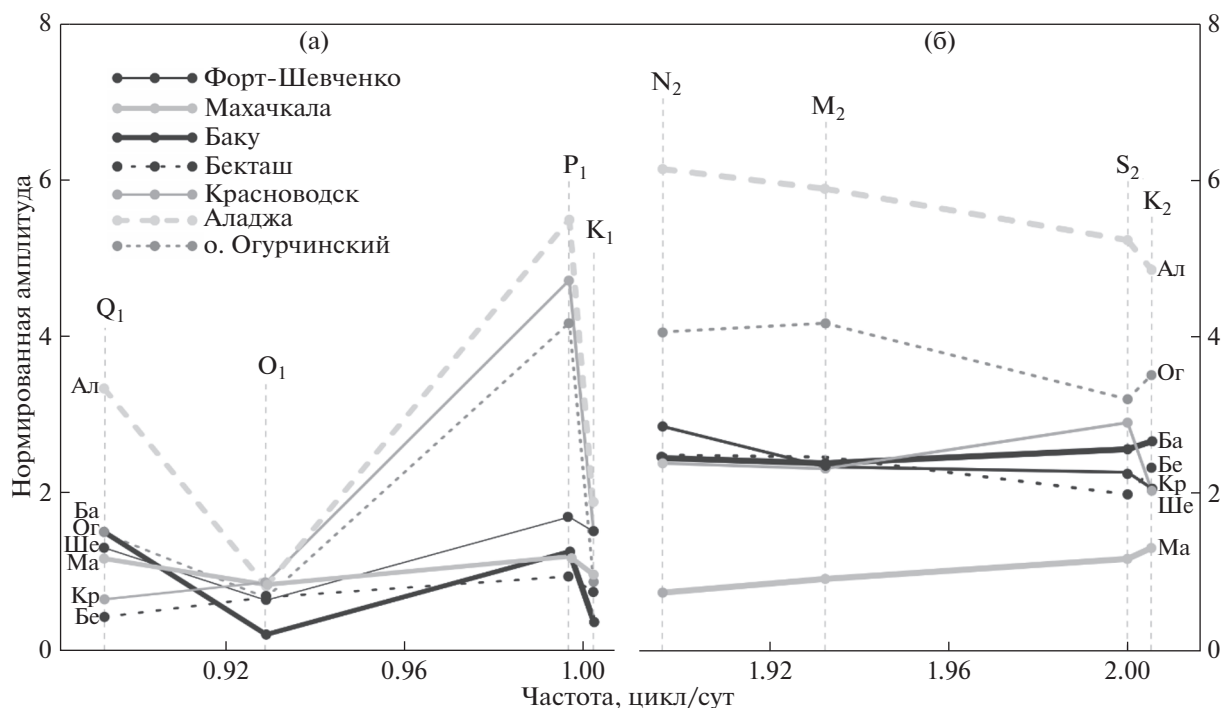


Рис. 8. Отношение наблюдаемых амплитуд основных суточных (а) и полусуточных (б) гармоник к теоретическим (разложению приливного потенциала) на станциях Форт-Шевченко, Махачкала, Баку, Бекташ, Красноводск, Аладжа и о. Огурчинский.

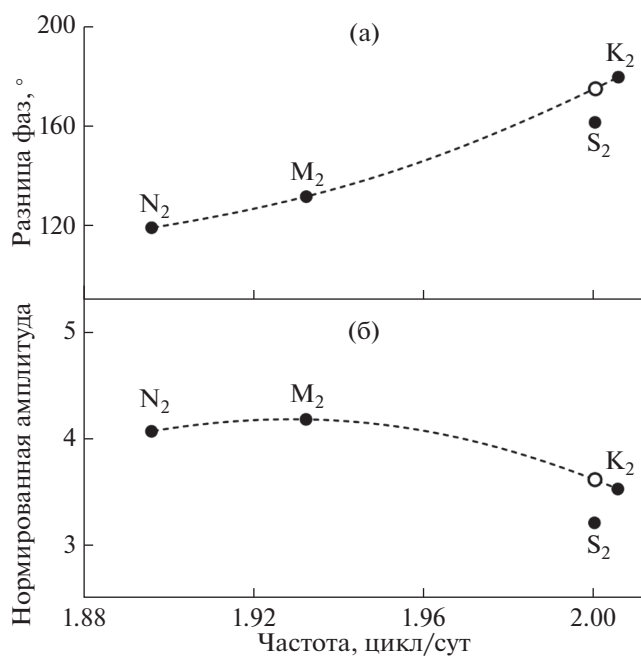


Рис. 9. Разница фаз (а) и отношение наблюдаемых амплитуд к теоретическим (теоретические амплитуды) (б) для гармоник N₂, M₂, S₂ и K₂ на станции о. Огурчинский. Белыми кружками указаны интерполированные значения разницы фаз (а) и нормированной амплитуды (б) для гармоники S₂. Штриховая линия – функция лучшей аппроксимации, соединяющая значения N₂, M₂ и K₂.

ответствующий суточной лунной гармонике O₁, выделяется только в Среднем Каспии; в остальных районах Каспийского моря он не превышает уровень спектрального шума.

Результаты спектрального анализа с высоким разрешением показали, что суточные приливные колебания уровня моря в Южном Каспии имеют преимущественно радиационное, а не гравитационное происхождение. Амплитуда радиационной гармоники S₁ в этой части моря превосходит амплитуды других суточных гармоник; при этом проведенный анализ показал, что гармоники K₁ и P₁, заметные в спектрах, не связаны с приливным гравитационным потенциалом, а являются гармониками-спутниками, которые образуются вследствие сезонной модуляции главной суточной радиационной гармоники S₁. Спектральный анализ колебаний уровня моря, выполненный отдельно для теплого и холодного сезонов, подтвердил данное предположение: спектральные характеристики суточных приливов в Среднем Каспии практически не менялись от зимнего сезона к летнему, тогда как суточные приливы в Южном Каспии хорошо выражены летом и почти полностью исчезают зимой. Вероятно, основным фактором, формирующих радиационные приливы в Южном Каспии, являются бризовые ветра, которые вызывают суточные сгонно-нагонные движения вод, причем этот эффект сильнее выражен около восточного, сравнительно мелководного, побережья.

Таблица 3. Амплитуда и фаза суммарной S_2^t , гравитационной S_2^g и радиационной S_2^r гармоник S_2 и их отношение $\frac{H(S_2^r)}{H(S_2^g)}$ для разных станций

Станции	S_2^t		S_2^g		S_2^r		$\frac{H(S_2^r)}{H(S_2^g)}$
	H , см	G , °	H , см	G , °	H , см	G , °	
Форт-Шевченко	0.96	248	0.87	230	0.31	312	0.36
Махачкала	0.50	303	0.54	288	0.14	45	0.27
Изберг	0.55	273	0.58	231	0.41	346	0.70
Баку	1.09	14	1.11	345	0.56	92	0.50
о. Жилой	0.37	327	0.49	317	0.14	110	0.29
о. Свиной	1.02	19	1.10	342	0.67	97	0.61
Бекташ	0.84	177	0.99	175	0.15	341	0.15
Кара-Богаз-Гол	0.81	160	0.97	155	0.18	313	0.19
Красноводск	1.23	179	0.87	190	0.41	156	0.47
Аладжа	2.22	173	2.09	199	0.96	103	0.46
о. Огурчинский	1.36	161	1.53	175	0.38	51	0.25

В целом, представленные в настоящей работе результаты исследования приливов Каспийского моря позволяют существенно, уточнить, расширить и обобщить результаты других авторов [3, 12, 23]. Прежде всего, это связано с объемом и качеством использованных данных. Многолетние ряды наблюдений, которые явились основной полученных результатов, дали возможность: (а) рассчитать гармонические постоянные приливов по значительно большему числу станций и с существенно более высокой точностью, чем это было возможно ранее; (б) “расщепить” гармоники, относящиеся к одной группе, в том числе P_1 , S_1 и K_1 , и тем самым получить непосредственные оценки роли радиационных приливов в формировании приливного режима Каспийского моря. Влияние радиационных приливов оказалось весьма существенным, особенного для Южного Каспия.

Приливные колебания уровня моря на некоторых станциях ранее не анализировались (см. работы [3, 12, 14, 23]). В частности, это относится к станции Аладжа, расположенной в Южном Каспии. Причем именно на этой станции, как выяснилось, отмечаются самые сильные приливы с размахом колебаний до 21 см. Для сравнения: величина прилива в других районах Южного Каспия и на восточном побережье Среднего Каспия – 8–10 см, на западном побережье Среднего Каспия – 5 см. Эти оценки показывают относительную роль приливных колебаний в различных районах Каспийского моря. Амплитуды и фазы основных приливных гармоник были рассчитаны при помощи гармонического анализа методом наименьших квадратов. Наибольшие амплитуды в Каспийском море имеет гармоника M_2 – до 5.4 см в Аладже (Южный Каспий). В Южном Каспии преобладает полусуточный тип прилива, а в Среднем Каспии – смешанный неправильный полусуточный тип.

В Северном Каспии наблюдаются только радиационные приливы, а гравитационные отсутствуют.

Результаты анализа пространственного распределения амплитуд и фаз основных гармоник не позволяют точно определить структуру амфидромических систем, образованных соответствующими приливными волнами. Тем не менее, полученные данные подтверждают предположение, высказанное в работе [12], о том, что волна M_2 в Каспийском море представляет собой амфидромическую систему с центром в районе Апшеронского порога, вращающуюся против часовой стрелки.

Авторы благодарят А.Ю. Медведеву за полезные обсуждения и замечания по рукописи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 14-50-00095) и РФФИ (гранты № 15-05-05986, № 16-35-60071 и № 17-55-560016).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блатов А.С., Ведев Д.Л., Косарев А.Н. О сейшах в Каспийском море // Метеорология и гидрология. 1990. № 8. С. 109–115.
2. Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Любушин А.А. Каспийское море: Экстремальные гидрологические события / Отв. ред. Хубларян М.Г. М.: Наука, 2007. 381 с.
3. 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.
4. Герман В.Х., Левиков С.П. Вероятностный анализ и моделирование колебаний уровня моря. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 231 с.
5. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Проект “Моря”. Т. VI. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Ред. Терзиева Ф.С. и др. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 359 с.
6. Каспийское море. Гидрология и гидрохимия / Под. Ред. Байдина С.С., Косарева А.Н. М.: Наука, 1986. 262 с.

7. *Косарев А.Н.* Гидрология Каспийского и Аральского морей. М.: Изд-во МГУ, 1975. 272 с.
8. *Косарев А.Н., Цыганов В.Ф.* Некоторые статистические характеристики колебаний уровня Каспийского моря // *Метеорология и гидрология*. 1972. Вып. 2. С. 49–56.
9. *Крицкий С.Н., Коренистов Д.В., Раткович Д.Я.* Колебания уровня Каспийского моря: (Анализ режима и вероятностный прогноз). М.: Наука, 1975. 158 с.
10. *Лапшин В.Б., Куликов Е.А., Победоносцев С.В., Копейкина Т.Н.* Изменения уровня Каспийского моря // *Тр. ГОИН*. 2005. Вып. 209. С. 129–141.
11. *Лебедев С.А., Костяной А.Г.* Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. М.: Изд. центр “Море” Международного института океана, 2005. 366 с.
12. *Левянт А.С., Рабинович А.Б., Рабинович Б.И.* Расчет сейшевых колебаний в морях произвольной формы на примере Каспийского моря // *Океанология*. 1993. Т. 33. № 5. С. 588–598.
13. *Любушин А.А., Писаренко В.Ф., Болгов М.В. и др.* Синхронные вариации уровня Каспийского моря по береговым наблюдениям, 1977–1991 гг. // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2004. Т. 40. № 6. С. 821–831.
14. *Малиновский Н.В.* Приливы в Каспийском море // *Метеорологический вестник*. 1926. Вып. 5. С. 116–117.
15. *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.
16. *Медведев И.П., Рабинович А.Б., Куликов Е.А.* Приливные колебания в Балтийском море // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 5. С. 596–611. doi 10.7868/S0030157413050134
17. *Некрасов А.В.* Приливные волны в окраинных морях. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 247 с.
18. *Полукаров Г.В.* О сейшах в Каспийском море // *Тр. ГОИН*. 1960. Вып. 50. С. 45–53.
19. *Попов С.К., Зильберштейн О.И., Лобов А.Л., Чумаков М.М.* Моделирование сезонного хода уровня Каспийского моря с применением параллельных вычислений // *Метеорология и гидрология*. 2009. № 12. С. 41–53.
20. *Рабинович А.Б.* Расчет сейш Каспийского моря // *Вестн. МГУ. Сер. геогр.* 1973. № 4. С. 116–121.
21. *Рабинович А.Б., Медведев И.П.* Радиационные приливы у юго-восточного побережья Балтийского моря // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 3. С. 357–365.
22. *Скриптунов Н.А., Горелиц О.В.* О сгонно-нагонных колебаниях уровня воды в устьях рек // *Водные ресурсы*. 2001. Т. 28. № 2. С. 196–202.
23. *Спидченко А.Н.* О приливах на Каспийском море // *Метеорология и гидрология*. 1973. № 5. С. 98–100.
24. *Фролов А.В.* Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. М.: ГЕОС, 2003. 174 с.
25. *Amin M.* The fine resolution of tidal harmonics // *Geophys. J. Int.* 1976. V. 44. P. 293–310.
26. *Defant A.* *Physical Oceanography*, V. 2. Oxford: Pergamon Press, 1961. 598 p.
27. *Feng X., Tsimplis M.N., Woodworth P.L.* Nodal variations and long-term changes in the main tides on the coasts of China // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2015. V. 120. P. 1215–1232. doi 10.1002/2014JC010312
28. *Medvedev I.P., Rabinovich A.B., Kulikov E.A.* Tides in three enclosed basins: the Baltic, Black and Caspian seas // *Front. Mar. Sci.* 2016. V. 3. № 46. doi 10.3389/fmars.2016.00046
29. *Munk W.H., Cartwright D.E.* Tidal spectroscopy and prediction // *Phil. Trans. Roy. Soc. London. Ser. A*. 1966. V. 259. № 1105. P. 533–581.
30. *Parker B.B.* *Tidal Analysis and Prediction*. NOAA spec. publ. NOS CO-OPS 3. Maryland: Silver Spring, 2007. 378 p.
31. *Pugh D., Woodworth P.* *Sea-Level Science: Understanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea-Level Changes*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2014. 296 p.
32. *Rabinovich A.B.* Seiches and harbor oscillations. In: *Handbook of Coastal and Ocean Engineering* / Ed. Kim Y.C. Chapter 9. Singapore: World Scientific Publ., 2009. P. 193–236.
33. *Rodionov S.G.* *Global and Regional Climate Interaction: The Caspian Sea Experience*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishing, 1994. 241 p.
34. *Wunsch C.* Bermuda sea-level in relation to tides, weather and baroclinic fluctuations // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1972. V. 10. № 1. P. 1–49.
35. *Zeller B.D.* Radiational ocean tides along the coasts of the United States // *J. Phys. Oceanogr.* 1971. V. 1. № 1. P. 34–38.

Tidal Oscillations in the Caspian Sea

I. P. Medvedev, E. A. Kulikov, A. B. Rabinovich

Longterm hourly data from 12 tide gauges are used to examine the character of tidal oscillations in the Caspian Sea. Diurnal and semidiurnal tidal peaks are well-defined in sea level spectra in the Middle and South Caspian basins. High-resolution spectral analysis revealed that diurnal sea level oscillations in the Middle Caspian Basin have a gravitational origin, while in the South Caspian Basin they are mainly radiational: the amplitude of diurnal radiational harmonic S_1 is sufficiently higher than the amplitudes of gravitational harmonics O_1 , P_1 and K_1 . In the North Caspian Basin the gravitational tides are absent, and the only tidal oscillations observed there are weak radiational tides. Semidiurnal tidal type is predominant in the Middle and South Caspian basins. Harmonic analysis of the tides for individual yearly series, with subsequent vector averaging over the entire observational period, was applied to estimate mean amplitudes and phases of major tidal constituents. The M_2 harmonic is strongest in the Caspian Sea, and its highest amplitude of 5.4 cm is observed at Aladga on the southeastern coast of the sea; the maximum tidal range of 21 cm occurs in this region. On the western coast of the South Caspian Basin and in the Middle Caspian Basin the maximum tidal ranges are from 5 to 10 cm.