

УДК 551.465

РАДИАЦИОННЫЕ ПРИЛИВЫ У ЮГО-ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ
БАЛТИЙСКОГО МОРЯ© 2015 г. А. Б. Рабинович¹, И. П. Медведев^{1, 2}¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет

e-mail: A.B.Rabinovich@gmail.com

Поступила в редакцию 20.05.2014 г., после доработки 26.06.2014 г.

Приливы в Балтийском море невелики, но хорошо заметны в спектрах колебаний уровня моря. Многолетние ряды ежечасных измерений позволили детально изучить особенности приливных колебаний и выявить некоторые неожиданные эффекты. Так, выяснилось, что две близлежащие станции, расположенные на юго-восточном побережье Балтийского моря, Балтийск – в проливе, соединяющем Вислинский залив с Балтийским морем, и Открытое – на побережье Куршского залива, имеют принципиально разный характер приливных движений. По 13-летним рядам синхронных наблюдений на этих станциях были построены спектры колебаний уровня моря с высоким разрешением, которые показали, что в Балтийске наблюдается “классический” приливной спектр, с острыми пиками, соответствующими главным приливным гармоникам: M_2 , S_2 , N_2 , K_1 , O_1 и P_1 . В отличие от Балтийска, в Открытом основной приливной пик отвечает частоте S_1 ; гармоники K_1 , P_1 и S_2 также имеют значимые пики, в то время как остальные гармоники (включая M_2 и O_1) не проявляются. Последующий анализ показал, что приливы в Балтийске формируются под воздействием обычных гравитационных приливных сил, а в Открытом – возбуждаются радиационным воздействием Солнца, прежде всего – влиянием бризовых ветров, вызывающих стонно-нагонные колебания в Куршском заливе. Более того, выяснилось, что наблюдаемые пики с частотами K_1 и P_1 на станции Открытое связаны не с гравитационными силами, а с сезонной модуляцией радиационной приливной гармоники S_1 . Анализ “летнего” и “зимнего” спектров колебаний уровня моря на станции Открытое показал, что радиационные приливные пики (S_1 и S_2) ярко выражены летом и отсутствуют в зимний период. Результаты анализа подтверждают гипотезу, что данные движения формируются бризовыми ветрами, возникающими в результате температурных контрастов в системе море–суша, которые существенны в теплое (“безледное”) время года и незначительны в холодное, когда ледовый покров нивелирует эти контрасты.

DOI: 10.7868/S0030157415030144

1. ВВЕДЕНИЕ

Приливные колебания в Балтийском море невелики, но хорошо известны и служат предметом исследования уже свыше 140 лет (см., например, [12, 16]). Вследствие регулярности и детерминированности приливных движений, острые приливные пики хорошо выделяются в спектрах колебаний уровня моря практически для всей акватории моря [5]. Длинные ряды ежечасных наблюдений, которые стали доступны в последнее время, позволили исследовать приливы в этом море с гораздо большей детальностью и точностью, чем это было возможно ранее, и построить спектры с высоким разрешением для приливных диапазонов частот [5]. В результате удалось выявить ряд новых и интересных эффектов, в частности, присутствие “радиационных приливов” в некоторых районах Балтийского моря.

Радиационные приливы [17] обусловлены не гравитационными силами, а радиационным воздействием Солнца на уровень моря. Соответственно, периоды радиационных гармоник свя-

заны не с лунной, а с солнечной цикличностью [18]. Так, радиационными гармониками являются годовая гармоника S_a , полугодовая S_{sa} , суточная S_1 и частично полусуточная S_2 (по данным работ [20, 22], типичная величина радиационной гармоники S_2 составляет около 16% от гравитационной S_2). Манк и Картрайт [17] ввели понятие **радиационного потенциала**:

$$\mathcal{R} = S \frac{R_s}{\rho} \cos \alpha = S \left(\frac{\bar{R}_s}{R_s} \right) \cos \alpha \sum_{n=0}^{\infty} \xi^n P_n(\cos \alpha)$$

$$-\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{\pi}{2} \quad (\text{днем});$$

$$\mathcal{R} = 0 \quad \frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{3\pi}{2} \quad (\text{ночью}),$$
(1)

характеризующего количество тепла, получаемого единичной площадкой на поверхности Земли в единицу времени. Здесь $S = 1380 \text{ Вт/м}^2$ – солнеч-

ная постоянная, R_s — текущее, а \bar{R}_s — среднее расстояния от центра Земли до Солнца, ρ — текущее расстояние от точки наблюдения на поверхности Земли до Солнца, α — зенитный угол Солнца ($\alpha = 0$, когда Солнце находится строго в зените), $\xi = a/R_s$ — солнечный параллакс, $a = 6371$ км — средний радиус Земли, P_n — полиномы Лежандра порядка n : $P_0(\mu) = 1$, $P_1(\mu) = \mu$, $P_2(\mu) = \frac{1}{2}(3\mu^2 - 1)$ и т.д.

Дальнейшее разложение “дневного” значения радиационного потенциала (1) по сферическим гармоникам позволяет получить следующее выражение [17, 18]:

$$\mathcal{R} = S \left(\frac{\bar{R}_s}{R_s} \right) \left[\frac{1}{2} P_1(\cos \alpha) + \frac{5}{16} P_2(\cos \alpha) + \dots \right] \quad (2)$$

$$-\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{\pi}{2} \text{ (днем).}$$

При выводе выражения (2) был отброшен постоянный член разложения радиационного потенциала $\sim \pi a^2 S$, ответственный за общий прогрев Земли, но не вызывающий приливных колебаний, а также малые члены разложения, пропорциональные солнечному параллаксу $\xi \approx 1/23455$. Заметим, что в отличие от выражения для гравитационного потенциала (см. [4, 17, 18]), в выражении для радиационного приливного потенциала (2) присутствует гармоника P_1 (появляющаяся из-за “непрозрачности” Земли для солнечной радиации), и именно эта гармоника вносит основной вклад в формирование сезонных и суточных радиационных приливов (см. рис. 8 в работе [17]). Полусуточные радиационные приливы формируются вторым членом разложения (2), а более высокие гармоники (P_3 , P_4 и т.д.) играют пренебрежимо малую роль. Два астрономических параметра в выражении (2), R_s — расстояния от центра Земли до Солнца и α — зенитный угол Солнца, зависят от времени; их расчет (см. [9]) позволяет прогнозировать значение радиационного потенциала для любой точки поверхности Земли и любого момента времени и учитывать, в частности, изменения длины светового дня и склонения Солнца.

Следует отметить, что из-за асимметрии (день/ночь) радиационного излучения Солнца (1) в колебаниях уровня моря могут проявляться высокочастотные радиационные гармоники S_3 , S_4 , S_5 , S_6 , S_7 и др. [2, 3]. Подобный характер несут спектры колебаний уровня на станциях Нарва (Эстония) и Даугава (Латвия) на восточном — юго-восточном побережье Балтийского моря [5].

В отличие от обычных приливов, которые формируются непосредственно под влиянием гравита-

ционных сил, радиационные приливы имеют более сложный механизм генерации. Фактически, радиационные приливы образуются под влиянием различных периодических факторов, связанных с излучением Солнца, наиболее важными среди которых являются: (1) колебания температуры воздуха и вызванные ими колебания температуры поверхности моря; (2) атмосферные приливы; (3) бризовый ветер. Преобладание того или иного фактора зависит от конкретных физико-географических условий района наблюдений [20]. Как указывается в работе [5], главным фактором, вызвавшим появление радиационных гармоник на некоторых станциях балтийского побережья, видимо, являются бризовые ветры; именно этот фактор сильнее всего зависит от конкретного района наблюдений, в то время как изменчивость температуры воздуха/воды и атмосферные приливы не обладают подобной выборочностью (т.е. эти два фактора должны были аналогичным образом воздействовать на все станции). Важно иметь в виду, что хотя амплитуды суточных и полусуточных радиационных приливных колебаний уровня моря сравнительно невелики, течения, обусловленные бризовыми ветрами, могут в поверхностном слое и в узких протоках достигать значительных величин — до 1–2 узлов и выше [21].

Результаты анализа длительных рядов наблюдений в Балтийском море показали, что наиболее ярко радиационные приливы проявляются на юго-восточном побережье. При этом при анализе данных мареографных наблюдений на станциях Калининградской области (Российская Федерация) нами был обнаружен неожиданный эффект, связанный с радиационными приливами, который и является темой настоящей статьи.

2. НАБЛЮДЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ И РАДИАЦИОННЫХ ПРИЛИВОВ

На рис. 1 показано положение двух мареографных станций: Балтийск и Открытое. Станция Балтийск расположена в Балтийском проливе, соединяющем Вислинский (Калининградский) залив с Балтийским морем. Станция Открытое расположена в южной части Куршского залива, известного также как “Куроньянская лагуна” (Curonian Lagoon). Этот залив представляет собой мелководную лагуну, отделенную от Балтийского моря Куршской косой и сообщаемую с морем через узкий Клайпедский пролив (~390 м); площадь акватории залива — около 1584 км², средняя глубина — 3.8 м, максимальная — 5.8 м [6, 10]. Т.е. станция Открытое расположена во внутренней части обширной мелководной лагуны, а станция Балтийск — практически на внешнем (морском) берегу (рис. 1).

В нашем распоряжении имелись 13-летние синхронные ряды ежечасных наблюдений уровня моря на этих двух станциях за 1992–2004 гг. Исследова-

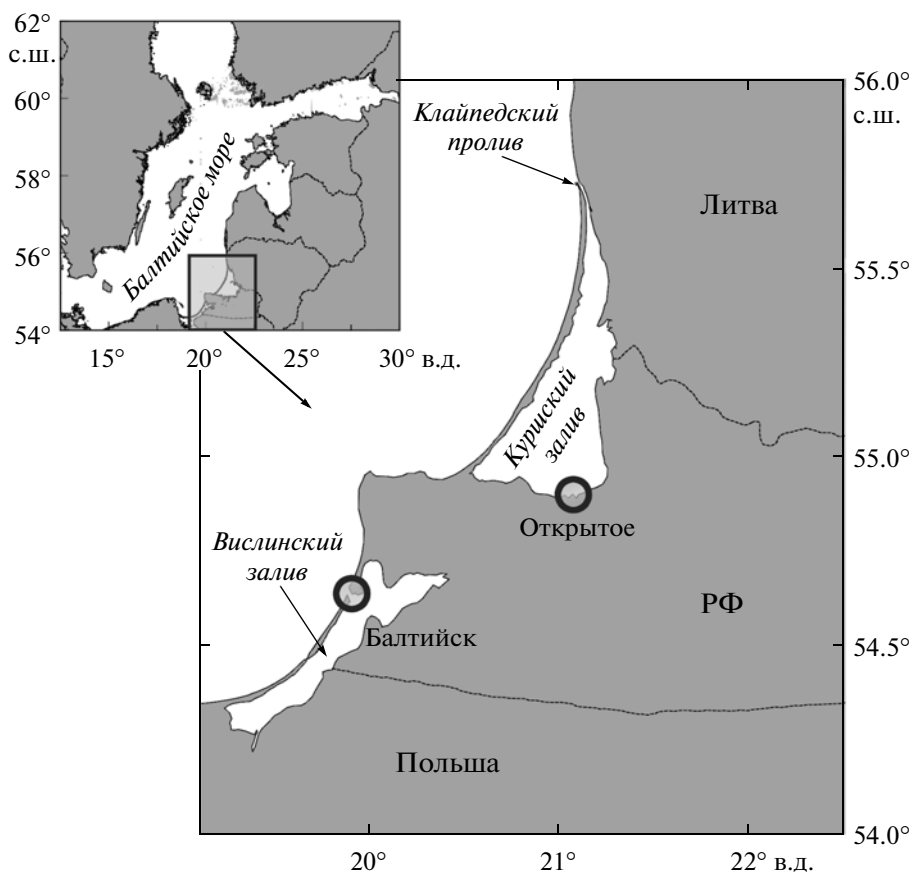


Рис. 1. Схема расположения станций Балтийск и Открытое у юго-восточного побережья Балтийского моря.

ния долгопериодных колебаний уровня моря, в частности, тектонических, климатических и сезонных, в этом районе проводились неоднократно (см., например, [6, 10, 11]). Однако сравнительно высокочастотные колебания, с периодами от часов до дней, ранее практически не исследовались.

Длительные ряды наблюдений позволили детально исследовать спектральные особенности колебаний уровня моря на этих двух станциях. Для расчета спектров использовалось быстрое преобразование Фурье (БПФ). Общая длина рядов составляла 105432 ч; согласно рекомендации [13], при расчете спектров использовалось окно Кайзера-Бесселя длиной $N = 2^{12} = 4096$ ч с половинным перекрытием. В результате обеспечивалось число степеней свободы $\nu = 100$, а частотное разрешение спектра было $\Delta f = 0.00586$ цикл/сут. На рис. 2 приведены спектры колебаний уровня моря в Балтийске и Открытом. Из рисунка хорошо видно, что спектр естественного длинноволнового шума подчиняется известному закону ω^{-2} [7], при этом для двух станций спектры шума вплоть до периодов ~ 9 ч практически идентичны. На периодах меньше 9 ч начинается расхождение спектров, что связано с влиянием собственных колебаний Куршского залива. Глав-

ный пик широкого “горба” соответствует частоте 7.63 цикл/сут (период $T = 3.15$ ч). Простая оценка периода фундаментальной одноузловой моды в круглом бассейне постоянной глубины, аппроксимирующего Куршский залив, $f = 1.84c/(2\pi r)$ [19] дает $T = 1/f \approx 3.4$ ч, т.е. значение, достаточно близкое к наблюдениям. Здесь $c = \sqrt{gH} \approx 6.2$ м/с – скорость длинных волн, $H = 3.8$ м – средняя глубина залива, а $r \approx 22$ км – его радиус.

Наибольший интерес представляют отличия спектров приливных колебаний уровня моря для двух станций. Приливы – это крупномасштабные движения; поэтому можно было предположить, что для станций, расположенных поблизости друг от друга, они будут практически идентичны (подобно тому, как практически идентичны спектры фоновых колебаний с периодами выше 9 ч). Тем не менее, хорошо видно, что эти спектры существенно различаются. Так, полусуточные пики, ярко выраженные на станции Балтийск, на станции Открытое мало заметны; также в Открытом отсутствует пик на частоте суточной гармоники O_1 , но зато очень хорошо выделяется пик на частоте K_1/S_1 (рис. 2). Длинные ряды наблюдений позволяют построить приливные спектры с высоким разре-

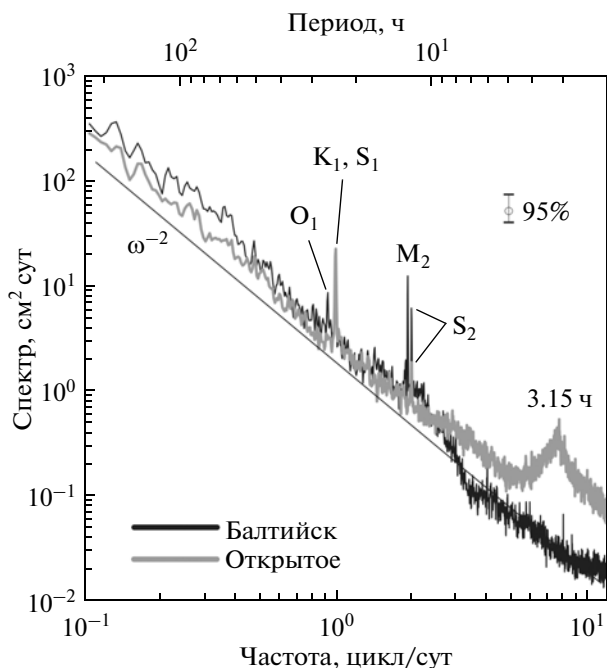


Рис. 2. Спектры колебаний уровня моря на станциях Балтийск и Открытое, расположенных на юго-восточном побережье Балтийского моря. Отмечены пики, соответствующие главным приливным гармоникам. Тонкой наклонной линией показан закон спада спектра ω^{-2} . Для спектра на станции Открытое отмечен пик с периодом 3.15 ч, соответствующий первой собственной моде Куршского залива.

пением и исследовать эти различия гораздо более тщательно.

3. СПЕКТРЫ С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Под “приливными спектрами с высоким разрешением” обычно понимают спектры с частотным разрешением существенно лучше (меньше) 1 цикл/год. Построение подобных спектров позволяет выявить особенности формирования приливных колебаний, незаметные на обычных спектрах, и изучить тонкую структуру приливных колебаний [8]. Опыт анализа, проведенный в работе [5], показал, что даже в акваториях со слабыми приливами, в частности, в Балтийском море, спектры с высоким разрешением оказываются весьма эффективным средством их анализа, позволяющим выделить и исследовать широкий набор приливных гармоник.

При расчете спектров нами была выбрана длина окна $N = 2^{16} = 65536$ ч, что обеспечило частотное разрешение спектра $\Delta f = 0.000366$ цикл/сут ≈ 0.13 цикл/год. Таким образом, между соседними приливными гармониками из одной группы (например, $P_1-S_1-K_1$) оказывается 7 значений спектра, что дает возможность разделить и детально исследовать особенности этих гармоник. При этом

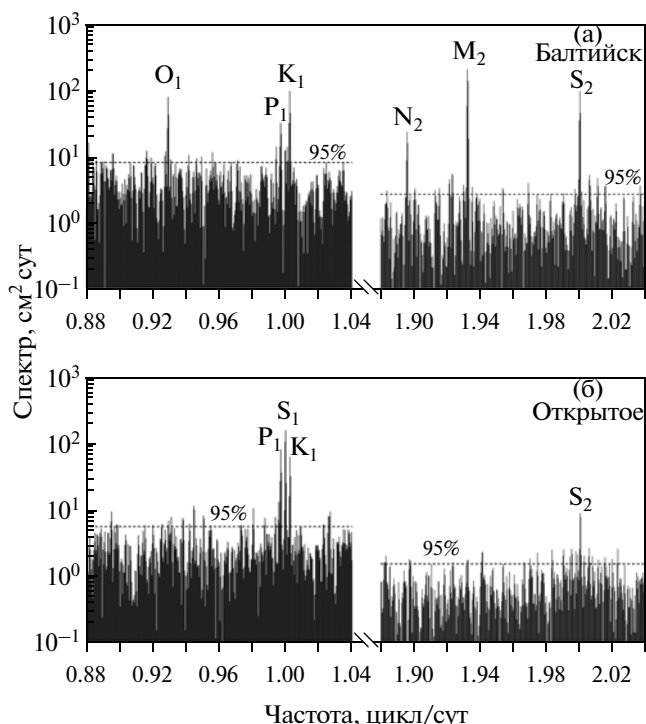


Рис. 3. Спектры с высоким разрешением колебаний уровня моря для суточного и полусуточного диапазона частот на станциях Балтийск (а) и Открытое (б). Штриховой линией показаны 95% доверительные интервалы для суточных и полусуточных гармоник, рассчитанные в соответствии с χ^2 распределением для каждого диапазона.

различия в приливных спектрах для станций Балтийск и Открытое становятся чрезвычайно наглядными (рис. 3).

Спектр приливных гармоник для станции Балтийск является “классическим”: хорошо выделяются (рис. 3а) три главные полусуточные приливные гармоники: M_2 , S_2 и N_2 , и три главные суточные гармоники: K_1 , O_1 и P_1 . Соотношения между амплитудами этих гармоник примерно соответствуют теоретическому (для разложения приливного потенциала, см. [18]). Совсем иначе выглядит приливной спектр на станции Открытое (рис. 3б): главный пик отвечает суточной гармонике S_1 , при этом он заметно превосходит приливные пики на частотах K_1 и P_1 , а пик на суточной частоте O_1 отсутствует вообще. Еще больше отличия на полусуточных частотах: пики на частотах M_2 и N_2 отсутствуют, выделяется только слабый пик на частоте S_2 . Такой характер спектра однозначно свидетельствует, что приливные колебания в Балтийске и Открытом имеют принципиально разную природу: в Балтийске доминируют обычные гравитационные приливы, в то время как характер приливных колебаний в Открытом определяют радиационные гармоники.

Сравнение спектров колебаний уровня моря на этих двух станциях позволяет сделать некото-

рые выводы о конкретном механизме генерации радиационных приливов на станции Открытое. Выше отмечалось, что атмосферные приливы и суточные температурные колебания воздуха/воды – это относительно крупномасштабные процессы, синхронно воздействующие на достаточно обширную территорию. То есть, если бы эти процессы были ответственны за формирование соответствующих радиационных приливных колебаний на станции Открытое, то они должны были бы вызывать аналогичные колебания и в Балтийске. Отсутствие заметного пика S_1 в спектре Балтийска свидетельствует о том, что радиационные колебания уровня моря в данном районе формируются бризовыми ветрами – единственным радиационным фактором, который обладает ярко выраженной географической “избирательностью”.

Известно, что бризовые ветра возникают в результате температурных контрастов: суша–море. Ранним утром, когда море значительно теплее, чем суша, ветер дует в сторону открытого моря; вечером – наоборот. В районе Открытого основной контраст наблюдается между обширным Куршским заливом и материком. Мелководный Куршский залив создает благоприятные условия для формирования ветровых нагонов и сгонов: утром бризовый ветер сгоняет воду и понижает уровень моря у материкового берега; вечером – нагоняет. В Балтийске таких условий нет, т.к. станция расположена в проливе узкой косы, отделяющей Вислинский залив от Балтийского моря; поблизости от станции нет условий для температурных контрастов, т.к. нет протяженных участков суши (рис. 1). Можно предположить, что на материковом (внутреннем) побережье Вислинского залива картина будет существенно иной: там могут наблюдаться бризовые ветра и сгонно-нагонные колебания уровня моря, с ними связанные.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Данные спектрального анализа, приведенные в предыдущем разделе, показывают, что на станции Балтийск в приливном диапазоне частот доминируют гравитационные приливы, а на станции Открытое – радиационные. Тем не менее возникает один неясный вопрос: природа спектральных пиков K_1 и P_1 в спектре на станции Открытое (рис. 3б). Если это обыкновенные гравитационные гармоники, то непонятно, почему отсутствуют другие приливные гармоники, в частности, M_2 , N_2 и O_1 , присутствующие на станции Балтийск. Кроме того, обращает внимание тот факт, что спектральный пик с частотой P_1 выше, чем пик K_1 (рис. 3б), хотя в разложении приливного потенциала амплитуды этих гармоник соотносятся примерно как 1 : 3 [18]; для станции Балтийск теоретические соотношения между

приливными гармониками приблизительно выполняются и пик K_1 заметно больше, чем P_1 (рис. 3а).

С другой стороны, в разложении радиационного потенциала (2) гармоники K_1 и P_1 невелики: примерно на полтора порядка меньше по энергии, чем гармоника S_1 , и на порядок меньше, чем гармоника S_2 [9, 17]. Т.е. наблюдается явное несоответствие общих теоретических представлений и реальных наблюдений приливов в Открытом, согласно которым гармоники K_1 и P_1 существенно превосходят S_2 и сопоставимы по величине с гармоникой S_1 (рис. 3).

Таким образом, природа спектральных пиков с частотами K_1 и P_1 не является очевидной. Вместе с тем обращает на себя внимание тот факт, что частоты гармоник K_1 и P_1 связаны с частотой гармоники S_1 простым соотношением

$$f(K_1, P_1) = f(S_1) \pm \Delta f_y, \quad (3)$$

где $\Delta f_y = 1$ цикл/год. Из этого соотношения следует, что добавление к доминирующей 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.

Известно, что обычные приливы – это детерминированный процесс. Именно это дает возможность с высокой точностью прогнозировать приливы в заданном пункте на любой момент времени (см., например, [1, 14, 18]). Тем не менее в некоторых районах Мирового океана наблюдаются небольшие сезонные вариации гармонических постоянных прилива [1]. Эти вариации связаны с влиянием ледового покрова, сезонными изменениями плотности морской воды, изменчивостью морских течений, геометрии эстуарийных областей, узких проливов и пр. [18]. Такие вариации, например, наблюдаются в районе пролива Хуан-де-Фука, отделяющего о. Ванкувер от Североамериканского континента. Анализ 38-летних рядов наблюдений в Виктории (южная оконечность о. Ванкувер) показал, что амплитуда гармоники M_2 в этом пункте изменяется примерно на 6.5% (37.3 ± 2.4 см); при этом максимальные значения M_2 стабильно наблюдаются в июле–августе, а минимальные – в феврале–марте [15]. Для учета сезонной изменчивости M_2 и повышения точности прогноза приливов М. Форман ввел искусственные гармоники H_1 и H_2 (в разложении приливного по-

Амплитуда и фаза суточных и полусуточных гармонических приливных составляющих для станций Балтийск и Открытое, рассчитанные по 13-летним рядам наблюдений (1992–2004 гг.)

Гармоника	Частота, цикл/сут	Балтийск		Открытое	
		H , см	G , град	H , см	G , град
O_1	0.929536	0.41	231	0.07	14
P_1	0.997262	0.21	229	0.32	69
S_1	1.000000	0.13	2	0.50	73
K_1	1.002738	0.41	263	0.31	81
N_2	1.895982	0.18	343	0.00	–
M_2	1.932274	0.57	354	0.04	351
S_2	2.000000	0.38	12	0.10	133
K_2	2.005476	0.08	13	0.05	201

тенциала [9] такие гармоники отсутствуют)¹, частоты которых связаны с частотой M_2 как

$$f(H_2, H_1) = f(M_2) \pm \Delta f_y. \quad (4)$$

Эти гармоники, которые можно назвать “эполетными” по отношению к M_2 , позволяют описать годовую модуляцию M_2 в данном районе [14, 15].

Нетрудно заметить, что гармоники K_1 и P_1 по отношению к доминирующей гармонике S_1 играют такую же роль, как гармоники H_1 и H_2 по отношению к M_2 , т.е. эти гармоники также являются искусственными для данной станции и появляются из-за сезонной модуляции гармоники S_1 . В отличие от гравитационных, радиационные гармоники не являются строго детерминированными (их можно назвать “квазидетерминированными”): их частоты являются устойчивыми, а амплитуды изменяются под влиянием различных погодных факторов, в частности, облачности, осадков и наличия или отсутствия ледового покрова. Все эти факторы испытывают сильные сезонные вариации, поэтому и радиационные гармоники, в частности, гармоника S_1 , должны изменяться соответствующим образом.

Исследовать сезонную изменчивость суточных колебаний уровня моря непосредственно оказалось затруднительно из-за высокого уровня шума относительно уровня полезного сигнала. Поэтому был использован другой способ. По всем 13-летним рядам наблюдений, как для Открытого, так и для Балтийска, были рассчитаны осредненные значения гармонических постоянных приливов, включая гармонику S_1 . Длинные ряды измерений уровня моря позволили определить эти постоянные с большой точностью (ам-

плитуды – до долей миллиметра, фазы – до градусов). Результаты гармонического анализа приливов (таблица) подтверждают выводы, сделанные ранее на основе спектрального анализа (рис. 3): приливы на станции Балтийск, хотя и слабые, но “классические” – доминируют 4 главных гармоники (M_2 , S_2 , K_1 и O_1), амплитуды и фазы отдельных гармоник находятся в хорошем соответствии. В Открытом доминирует гармоника S_1 , но гармоники P_1 и K_1 имеют сопоставимые с ней амплитуды; остальные гармоники пренебрежимо малы.

Значения гармонических постоянных для триады гармоник P_1 - S_1 - K_1 из таблицы были использованы для предвычисления годовых серий суточных приливов². В качестве примера на рис. 4 показаны рассчитанные приливы для 1998 г. Хорошо видна сезонная модуляция приливов. Однако характер ее для двух станций принципиально разный. Для Балтийска модуляция определяется суперпозицией гармоник K_1 и P_1 . Различие по частоте этих двух гармоник равно $2\Delta f_y$, т.е. 2 цикл/год. Соответственно, в течение года наблюдаются два максимума и два минимума (рис. 4а). Как это и следует из теории (см. [18]), годовые максимумы суточного прилива приходятся на моменты летнего и зимнего солнцестояния (происходит сложение гармоник K_1 и P_1), минимумы – на моменты равноденствия (P_1 вычитается из K_1)³. В Открытом картина совершенно другая: максимальные значения суточных приливных колебаний наблюдаются с мая по сентябрь, ранней весной и поздней осенью эти колебания существенно слабее, а зимой

² Гармоника O_1 в расчеты не включалась; в суперпозиции с K_1 эта гармоника приводит к полумесячному неравенству суточных приливов, но этот вопрос в данной статье не рассматривается.

³ У полусуточных приливов, в результате суперпозиции S_2 и K_2 , наблюдается противоположная картина: годовой максимум вблизи весеннего и осеннего равноденствий, минимум – во время летнего и зимнего солнцестояний [18].

¹ Представляется, что обозначения H_1 и H_2 для этих гармоник являются неудачными, т.к. создают неправильное впечатление, что гармоника H_1 является суточной. Вероятно, более правильно было бы их обозначить, например, M_{2-} и M_{2+} или M_{2m} и M_{2p} .

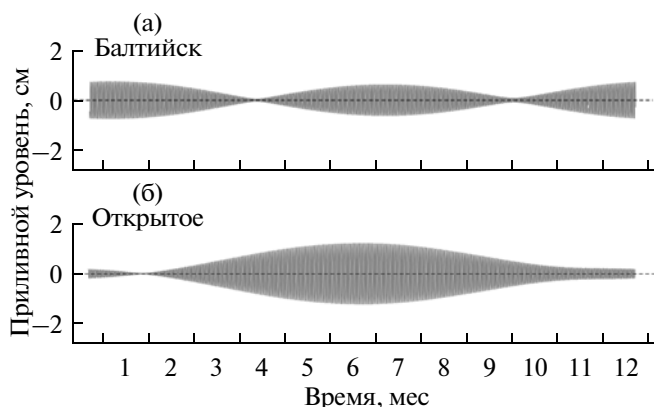


Рис. 4. Рассчитанные по трем гармоникам (P_1 , S_1 и K_1) суточные приливы на 1998 г. для станций Балтийск (а) и Открытое (б) в юго-восточной части Балтийского моря.

вообще сходят на нет (рис. 4б). Такой характер изменчивости подтверждает предположение, что суточные колебания на этой станции формируются под влиянием бризовых ветров: летом наблюдается максимальный суточный контраст между температурой суши и моря и наиболее сильные сгонно-нагонные бризовые ветра, весной температурный контраст и бризовые ветра ослабевают, а зимой, когда Куршский залив замерзает, суточный контраст отсутствует вообще и, соответственно, исчезают бризовые ветра и связанные с ними колебания уровня моря.

Для проверки предположения о сезонном характере суточных приливных колебаний в Открытом мы провели дополнительный тест. Все ряды наблюдений за 13 лет на этой станции были разделены на “летние” (с середины апреля по середину октября) и “зимние” (с середины октября по середину апреля). После этого были построены и осреднены все “летние” и “зимние” спектры. Спектральный анализ проводился аналогично тому, как это было описано в разделе 2; длина окна Кайзера-Бесселя при расчете спектров составляла $N = 2^{11} = 2048$ ч, что обеспечило частотное разрешение спектра $\Delta f = 0.0117$ цикл/сут. Число степеней свободы на низких частотах составляло $\nu \approx 50$. Для увеличения числа степеней свободы и сглаживания спектров на высоких частотах использовалось дополнительное частотное осреднение. Результаты представлены на рис. 5. На “летних” спектрах радиационные пики с периодами S_1 и S_2 хорошо выделяются, а на “зимних” практически отсутствуют. Т.е. радиационные приливы на станции Открытое проявляются только в теплое время года.

Чрезвычайно интересным вопросом является изучение влияния других факторов (в частности, облачности и осадков) на характер радиационных приливов в данном районе. К сожалению, низкий

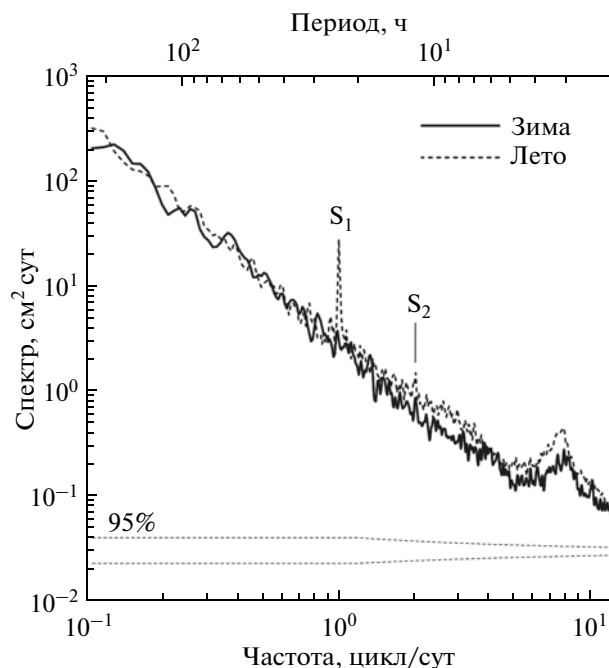


Рис. 5. “Летние” и “зимние” спектры колебаний уровня моря на станции Открытое, рассчитанные по 13-летним рядам наблюдений (1992–2004 гг.).

уровень полезного сигнала (радиационных приливных колебаний уровня моря) и высокий уровень шума не позволяет исследовать этот вопрос непосредственно. Гораздо более перспективным параметром в этом отношении являются бризовые течения, для которых отношение сигнал/шум существенно выше (см., например, [21]).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приливы в Балтийском море имеют небольшую величину, но тем не менее являются интересным объектом для изучения. Наличие длинных рядов ежечасных наблюдений и использование современных методов анализа позволяет рассчитать их с большой точностью и выявить нетривиальные особенности их поведения. Нами для анализа приливных колебаний в юго-восточной части Балтийского моря были использованы синхронные 13-летние ряды измерений колебаний уровня моря на двух мареографных станциях на побережье Калининградской области: Балтийск и Открытое. При этом выяснилось, что хотя станции расположены на расстоянии всего около 70 км друг от друга, малым по сравнению с характерным масштабом приливных движений, приливы на этих двух станциях принципиально отличаются. На станции Балтийск приливы носят “классический” характер; спектральные пики, построенные с высоким частотным разрешением, соответствуют главным приливным гармоникам: по-

лусуточным M_2 , S_2 , N_2 и суточным K_1 , O_1 , P_1 . Результаты гармонического анализа приливов (таблица) подтверждают результаты спектрального анализа и показывают хорошее соответствие фаз гармоник одного типа. Совершенно другой характер носят приливы на станции Открытое; здесь доминирует гармоника S_1 , заметны такие гармоники K_1 , P_1 и S_2 , а вот гармоники M_2 , N_2 и O_1 пренебрежимо малы.

Выявленные особенности показывают, что приливные колебания на станции Балтийск формируются **гравитационными приливными гармониками**, подобно тому как это происходит и на большинстве других станций в Балтийском море (см. [5]). Наблюдаемые приливные колебания на станции Открытое, расположенной на материковом берегу Куршского залива, являются **аномальными** и формируются **радиационными приливами**, более конкретно — **бризовыми ветрами** и связанными с ними сгонно-нагонными движениями внутри залива.

Дальнейшее исследование характера колебаний уровня моря в Открытом показало, что спектральные пики K_1 и P_1 , хорошо выделяющиеся на спектрах с высоким разрешением для этой станции (рис. 3б), не связаны с одноименными гравитационными приливными гармониками, а являются следствием сезонной модуляции главной суточной радиационной гармоники S_1 . Бризовые ветра оказывают воздействие на колебания уровня моря в Куршском заливе в теплое время года, но исчезают в холодное, когда Куршский залив замерзает и температурные контрасты суша/море отсутствуют. Соответственно пропадают и приливные пики в “зимних” спектрах на этой станции. Видимо, обычные приливы, из-за узости Клайпедского пролива, не проникают в Куршский залив вообще.

В целом, колебания уровня моря на этих двух близлежащих станциях (Балтийск и Открытое) являются интересным примером принципиально различного характера приливных движений, возникающих в результате локальных физико-географических условий.

Авторы благодарят Е.А. Куликова и Е.Г. Морозова за полезное обсуждение.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 13-05-41360, № 14-05-31461 и № 15-0505986), РНФ (грант № 14-50-00095) и средств ИО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Войнов Г.Н.* Гармонический анализ морских приливов с описанием сезонной изменчивости основных суточных, полусуточных и мелководных волн // Тр. ГОИН. 2011. Вып. 213. С. 169–178.
2. *Куликов Е.А., Пул С.Л., Рабинович А.Б.* Спектр длинных волн в открытом океане и радиационные приливы // Волновые процессы в северо-западной части Тихого океана. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1980. С. 28–38.
3. *Куликов Е.А., Рабинович А.Б.* Радиационные приливы в океане и атмосфере // Докл. АН СССР. 1983. Т. 271. № 5. С. 1226–1230.
4. *Марчук Г.И., Каган Б.А.* Динамика океанских приливов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 359 с.
5. *Медведев И.П., Рабинович А.Б., Куликов Е.А.* Приливные колебания в Балтийском море // Океанология. 2013. Т. 53. № 5. С. 596–609.
6. *Навроцкая С.Е., Чубаренко Б.В.* Тенденции изменения уровня моря в лагунах Юго-Восточной Балтики // Океанология. 2013. Т. 53. № 1. С. 17–28.
7. *Рабинович А.Б.* Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. Л.: Гидрометеиздат, 1993. 325 с.
8. *Amin M.* The fine resolution of tidal harmonics // Geophys. J. Roy. Astr. Soc. 1976. V. 44. P. 293–310.
9. *Cartwright D.E., Tayler R.J.* New computations of the tide-generating potential // Geophys. J. Roy. Astr. Soc. 1971. V. 23. P. 45–74.
10. *Dailidienė I., Baudler H., Chubarenko B., Navrotskaya S.* Long term water level and surface temperature changes in the lagoons of the South and East Baltic // Oceanologia. 2011. № 53 (1-TI). P. 293–308.
11. *Dailidienė I., Davulienė L., Tilickis B. et al.* Sea level variability at the Lithuanian coast of the Baltic Sea // Boreal Environmental Research. 2006. № 11. P. 109–121.
12. *Defant A.* Physical Oceanography. V. 2. Oxford: Pergamon Press, 1960. 598 p.
13. *Emery W.J., Thomson R.E.* Data Analysis Methods in Physical Oceanography. 2d ed. Amsterdam: Elsevier, 2003. 638 p.
14. *Foreman M.* Manual for tidal heights analysis and prediction. Pacific Marine Science Report, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Rept. 77–10, 1977 (revised 2004). <http://www.pac.dfo-mpo.gc.ca/science/oceans/tidal-marees/index-eng.htm>.
15. *Foreman M.G.G., Walters R.A., Henry R.F. et al.* A tidal model for eastern Juan de Fuca Strait and the southern Strait of Georgia // J. Geophys. Res. 1994. V. 100. № C1. P. 721–740.
16. *Lisitzin E.* Sea Level Changes. Amsterdam: Elsevier, 1974. 286 p.
17. *Munk W.H., Cartwright D.E.* Tidal spectroscopy and prediction // Phil. Trans. Roy. Soc. London. Ser. A. 1966. V. 259. № 1105. P. 533–581.
18. *Pugh D.T.* Tides, Surges and Mean Sea-Level. Chichester: John Wiley, 1987. 472 p.
19. *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.
20. *Wunsch C.* Bermuda sea-level in relation to tides, weather and baroclinic fluctuations // Rev. Geophys. Space Phys. 1972. V. 10. № 1. P. 1–49.
21. *Zaytsev O., Rabinovich A.B., Thomson R.E., Silverberg N.* Intense diurnal surface currents in the Bay of La Paz, Mexico // Cont. Shelf Res. 2010. V. 30. P. 608–619.
22. *Zetler B.D.* Radiational ocean tides along the coasts of the United States // J. Phys. Oceanogr. 1971. V. 1. № 1. P. 34–38.

Radiational Tides at the Southeastern Coast of the Baltic Sea

A. B. Rabinovich, I. P. Medvedev

The tides in the Baltic Sea are weak but unmistakably recognizable in sea level spectra. Multiyear hourly tide gauge series enabled us to examine specific tidal properties in detail and to identify some unexpected effects. Two nearby stations on the southeastern coast of the sea, Baltiysk, located in Vistula Lagoon near the dredged channel connecting the lagoon to the Baltic Sea, and Otkrytoe, on the coast of Curonian Lagoon, demonstrated very different character of tidal motions. Based on 13-year simultaneous observations at these stations we constructed high-resolution spectra and found that the tidal spectrum at Baltiysk is “classical” with sharp distinct peaks corresponding to the major tidal constituents: M_2 , S_2 , N_2 , K_1 , O_1 and P_1 . In contrast, the main tidal peak at Otkrytoe is at the S_1 frequency; the K_1 , P_1 and S_2 peaks are also evident, but other peaks (including M_2 and O_1) are undistinguishable. The following analysis indicated that the tides at Baltiysk are produced by the ordinary gravitational tidal forcing, while at Otkrytoe they are induced by the solar radiation, specifically by breeze winds creating wind set-ups and set-downs in Curonian Lagoon. Moreover, our findings demonstrate that the observed K_1 and P_1 peaks at the latter stations are related not to the respective gravitational tidal harmonics but to the seasonal modulation of the S_1 radiational tidal constituent. The separate analysis of “summer” and “winter” sea level spectra at Otkrytoe revealed prominent radiational tidal peaks (S_1 and S_2) in summer and absence of these peaks in winter. This supports the assumption that the corresponding motions are generated by the breeze winds associated with the sea/land temperature contrasts, which are substantial during the warm (i.e. ice-free) period but vague during the cold (ice-covered) season.