

УДК 551.465

ПРИЛИВНЫЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ АЗОВСКОГО МОРЯ

© 2022 г. А. И. Корженовская^{1, 2, *}, И. П. Медведев², В. С. Архипкин¹¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*e-mail: A79198153474@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.10.2021 г.

После доработки 02.12.2021 г.

Принята к публикации 16.12.2021 г.

Длительные ряды ежечасных наблюдений на 14 прибрежных мареографах были использованы для исследования особенностей приливных колебаний уровня Азовского моря. Спектральный анализ показал наличие острых пиков, соответствующих суточным и полусуточным приливному гармоникам. Гармонический анализ приливов для отдельных годовых серий уровня моря с последующим векторным осреднением за весь период наблюдений был использован для оценки амплитуд и фаз 11 приливных гармоник. Амплитуда основных суточных гармоник в основном больше, чем полусуточных. Амплитуда суточной радиационной гармоники S_1 меняется от 6 см в вершине Таганрогского залива до 0.5 см в Керченском проливе, тогда как амплитуда основной полусуточной гравитационной гармоники M_2 внутри акватории моря меняется от 1.0 см в юго-восточной части Азовского моря до 0.38 см на станции Мысовое. Установлено, что внутри Азовского моря характер прилива существенно изменяется от правильного суточного на севере до неправильного полусуточного вблизи Керченского пролива. Максимальная теоретическая величина прилива обнаружена в вершине Таганрогского залива – до 19.5 см, а наименьшая отмечена в Керченском проливе – 4.9 см. Предположение о преимущественно радиационной природе суточных приливов подтверждается сезонной изменчивостью их спектра. Вероятно, радиационные приливы в Азовском море формируются под влиянием бризовой циркуляции, которая лучше всего выражена в летний период.

Ключевые слова: Азовское море, приливы, спектральный анализ, радиационные приливы**DOI:** 10.31857/S0030157422050094

1. ВВЕДЕНИЕ

Азовское море – самое изолированное и мелководное море Мирового океана. Его максимальная глубина составляет 13.5 м. Оно соединяется с другим сильно изолированным от Мирового океана морем – Черным морем – через Керченский пролив, ширина которого – 5–15 км [2]. Основными видами мезомасштабных колебаний уровня здесь являются штормовые нагоны и сейши. Но также в Азовском море наблюдаются и приливные колебания уровня. В начале XX века И.В. Курчатов [4] обратил внимание на близость периода собственных колебаний Азовского моря (23 ч) с периодом “метеорологической приливной волны”. Первые оценки амплитуд основных приливных гармоник в Азовском море были представлены Эндрёсом в 1932 г. [12]. В монографии [1] дается краткое упоминание, что в акватории Азовского моря присутствуют периодические суточные и полусуточные колебания уровня, которые, как предполагают авторы, вызваны волной, возникающей “в результате частичной передачи энергии приливных колебаний уровня Черного

моря через Керченский пролив водным массам Азовского моря”. К сожалению, в [1] были использованы короткие временные ряды данных, что не позволило получить высокое частотное разрешение и определить генезис колебаний.

Традиционно основное внимание при численном моделировании короткопериодных колебаний уровня Азовского моря уделяется сгонно-нагонным явлениям [3, 7, 10] и сейшам [5, 9]. В последние годы, с развитием методов численного моделирования, несколько научных исследований косвенно рассматривали приливы в Азовском море [13, 14]. Основное внимание в этих исследованиях уделялось Средиземному [13] и Черному [13, 14] морям. Анализ многолетних рядов данных наблюдений за уровнем Азовского моря в этих исследованиях не проводился.

2. ДАННЫЕ

В настоящей работе были использованы данные наблюдений на 14 прибрежных гидрометеорологических пунктах Азовского моря, распо-

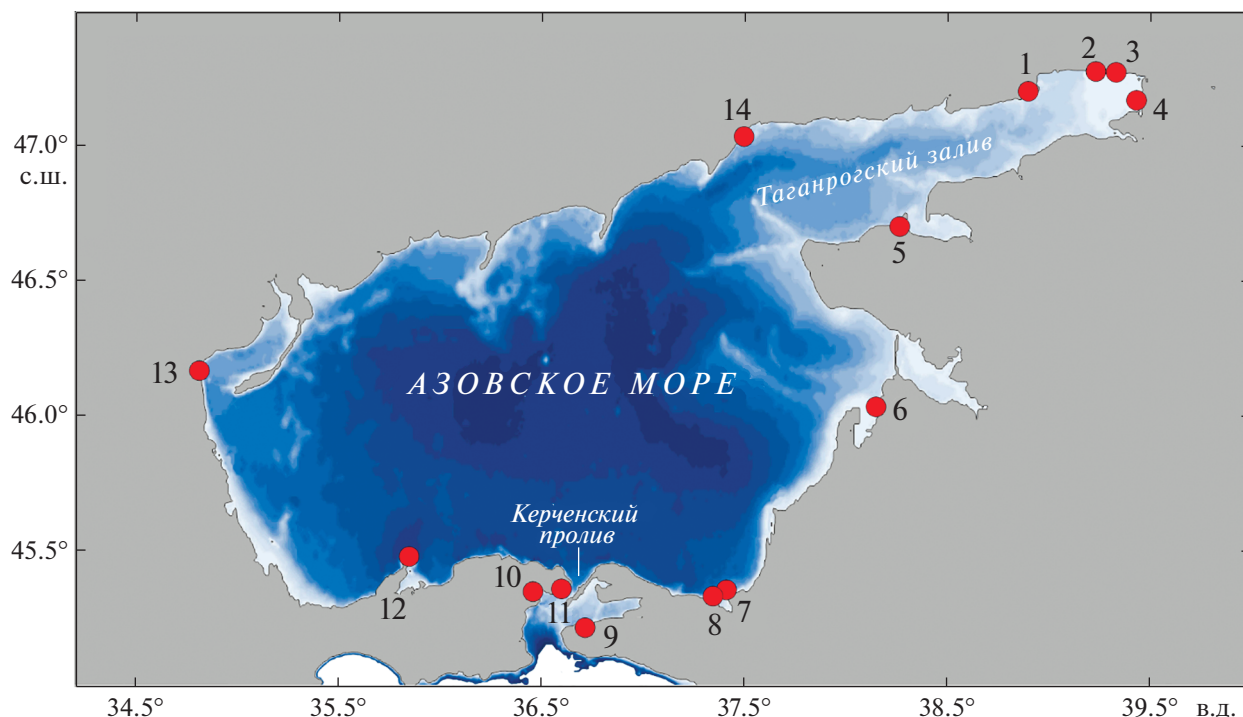


Рис. 1. Схема расположения станций, использованных в работе. Номера на рисунке соответствуют номерам станций, указанным в табл. 1.

жение которых показано на рис. 1, а их характеристики представлены в табл. 1.

Данные наблюдений отвечают условиям однородности: все ряды наблюдений имеют дискретность 1 ч, вертикальное разрешение данных – 1 см, все они приведены ко времени Гринвичского меридиана (UTC), принадлежат к единой системе

высот (БС + 5 м). Ряды записей на большинстве пунктов начинаются с 1977 года. Данные взяты с сайта Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО).

В рядах наблюдений были устранены выбросы и сбои, короткие пропуски интерполированы. Ряды наблюдений, имеющие длительные пропус-

Таблица 1. Характеристики станций, использованных для анализа колебаний уровня Азовского моря. В последней колонке представлены годы наблюдений, для которых выполнялся гармонический анализ

| | Станция | Широта °с.ш. | Долгота °в.д. | Период наблюдений | Гармонический анализ |
|----|--------------------|-----------------|------------------|-------------------|---------------------------------|
| 1 | Таганрог | 47.20 | 38.90 | 1977–2003 | – |
| 2 | Перебойный | 47.18 | 39.23 | 1980–1984 | 1981–1982 |
| 3 | Рогожкино | 47.17 | 39.33 | 1977–1984 | 1978, 1982–1983 |
| 4 | Дугино | 47.17 | 39.43 | 1977–1984 | 1978, 1980–1983 |
| 5 | Ейск-порт | 46.80 | 38.27 | 1977–1995 | 1977–1984, 1986–1987, 1989–1994 |
| 6 | Приморско-Ахтарск | 46.03 | 38.15 | 1977–1982 | 1977–1981 |
| 7 | Кубанская устьевая | 45.32 | 37.38 | 1977–1978 | 1977–1978 |
| 8 | Темрюк-порт | 45.28 | 37.37 | 1979–2017 | 1979–1987, 1989, 1991–2016 |
| 9 | Тамань | 45.22 | 36.72 | 1977–1992 | 1977–1984 |
| 10 | Керчь | 45.40 | 36.42 | 1977–2017 | 1977–1989 |
| 11 | Опасное | 45.40 | 36.60 | 1977–1995 | 1977–1995 |
| 12 | Мысовое | 45.50 | 35.80 | 1977–1995 | 1977–1994 |
| 13 | Геническ | 46.17 | 34.82 | 1977–1995 | 1983–1995 |
| 14 | Мариуполь | 47.03 | 37.50 | 1977–1995 | 1977–1995 |

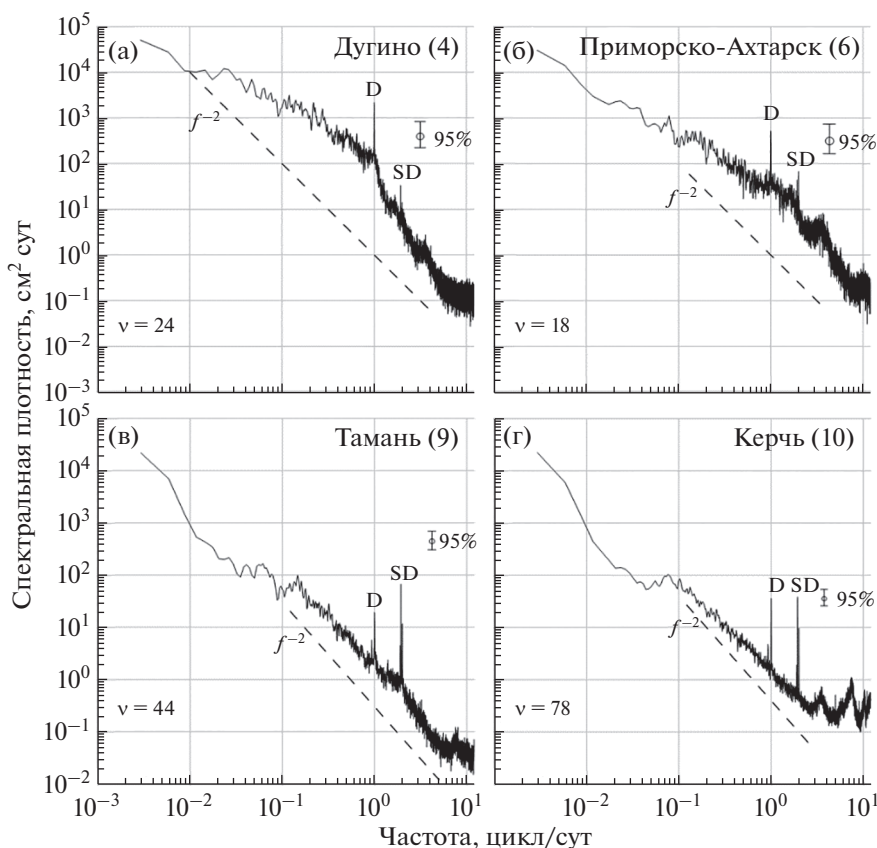


Рис. 2. Спектры колебаний уровня моря на станциях Дугино, Приморско-Ахтарск, Тамань, Керчь. Отмечены пики суточных (D) и полусуточных (SD) приливных гармоник, показаны 95% доверительные интервалы, указано число степеней свободы при расчетах спектров (ν).

ки, были исключены из анализа (например, гидрометеорологический пост в Таганроге). Таким образом, анализ приливов в Азовском море проводился по данным 13 прибрежных пунктов наблюдений.

3. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Спектральный анализ позволяет подробно рассмотреть структуру колебаний, узнать природу отдельных пиков в спектре колебаний уровня и понять, на какие частоты приходится наибольшее количество волновой энергии. В данной работе был применен распространенный в естественных науках метод Уэлча, основанный на быстром преобразовании Фурье. Спектры были рассчитаны на основе данных многолетних рядов наблюдений за уровнем с использованием спектрального окна Кайзера-Бесселя $N = 8192$ ч, с половинным перекрытием.

В качестве примера на рис. 2 представлены спектры колебаний уровня моря на четырех станциях, расположенных в различных районах Азовского моря: Дугино (4) – в вершине Таганрогского залива, Приморско-Ахтарск (6) – на восточном

побережье, Тамань (9) и Керчь (10) – в Керченском проливе (номера в скобках соответствуют номерам станций на рис. 1 и в табл. 1).

Несмотря на то, что приливы в Азовском море имеют малые амплитуды, они хорошо выделяются на всех четырех спектрах в виде острых пиков на частотах основных суточных и полусуточных гармоник. В Дугино и Приморско-Ахтарске суточные пики существенно превышают пики в области полусуточных частот. В Керчи спектральная плотность суточных и полусуточных пиков имеет близкий порядок значений. В Тамани полусуточные составляющие преобладают над суточными.

В целом с увеличением частоты колебаний спектральная плотность непрерывной части (континуума) спектра на всех станциях спадает как функция f^{-2} . Локальные нарушения этого закона спадаения спектра связаны с влиянием метеорологических возмущений, энергия которых концентрируется вблизи периодов собственных колебаний бассейна – сейш Азовского моря. Так, в Дугино наблюдается увеличение континуума в широком диапазоне периодов от 0.05 до 2–

3 цикл/сут, что связано с усилением сгонно-нагонных колебаний уровня моря в вершине Таганрогского залива. На частотах меньше 1 цикл/сут спектральная плотность спадает как функция $f^{-1.5}$, на частотах выше 1 цикл/сут энергия уменьшается по закону $f^{-2.5}$, что связано с концентрацией энергии вблизи периода собственных колебаний (~24 ч). В Приморско-Ахтарске преобладают сейши с частотами около 1.8 и 3.5 цикл/сут. На спектрах в Керчи проявляются пики собственных колебаний уровня с высокими частотами, около 3.7 и 7.9 цикл/сут, в Тамани проявляется один пик собственных колебаний уровня с частотой около 7.8 цикл/сут.

Как известно [6, 14, 15], суточные и полусуточные приливные спектральные пики состоят из большого числа отдельных компонент, имеющих различные механизмы формирования. Для изучения тонкой спектральной структуры суточных и полусуточных пиков и определения их генезиса требуется проведение анализа с высоким частотным разрешением.

4. СПЕКТРЫ С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Спектральный анализ с высоким разрешением позволяет на основе длительных рядов наблюдений выделить из суточных и полусуточных пиков отдельные приливные составляющие. В данной работе спектры с высоким разрешением так же, как и обычные спектры, рассчитывались с помощью быстрого преобразования Фурье, но с длиной спектрального окна $N = 87660$ ч. На рис. 3 представлены спектры с высоким разрешением для четырех станций, наиболее ярко отражающих особенности приливов в разных частях акватории Азовского моря.

В суточном приливном диапазоне на всех рассматриваемых станциях наибольшей по амплитуде является радиационная гармоника S_1 , превосходящая гравитационные O_1 , K_1 и P_1 (рис. 3). На большинстве станций отличительной особенностью суточного приливного частотного диапазона является отсутствие основной гравитационной гармоники O_1 . Эта гармоника присутствует только в Тамани (рис. 3в) и Керчи (рис. 3г), на остальных станциях она не превышает уровень шума. Составляющие K_1 и P_1 на большинстве станций (например, рис. 3а, 3б) имеют близкие значения спектральной плотности, хотя в приливном потенциале амплитуда K_1 в 3 раза превышает амплитуду гармоники P_1 (табл. 2). В Тамани (рис. 3в) и Керчи (рис. 3г) спектральная плотность гармоники P_1 заметно ниже, чем у K_1 , но все равно на всех станциях ее амплитуда больше, чем у гармоники O_1 , хотя в приливном потенциале она меньше в 1.5 раза. Все перечисленные особенности тонкой спектральной структуры суточ-

ных приливов связаны с влиянием радиационных приливов.

В полусуточном приливном диапазоне на всех станциях хорошо выделяется гармоника M_2 , несколько меньшую спектральную плотность имеют N_2 , T_2 и R_2 , но все равно они заметны над уровнем шума; R_2 не наблюдается только в Приморско-Ахтарске (рис. 3б). Также почти на всех станциях присутствует гармоника S_2 , в некоторых случаях сравнимая или даже превышающая M_2 . Таким образом, радиационные приливы оказывают существенное влияние и на полусуточный диапазон частот.

Для всех станций, кроме Тамани (рис. 3в) и Керчи (рис. 3г), характерно превышение суточной радиационной гармоники S_1 над полусуточной гравитационной M_2 . Особенно ярко это заметно в вершине Таганрогского залива, на станции Дугино (рис. 3а). В западной (Геничеськ) и восточной (Дугино, Приморско-Ахтарск и др.) частях Азовского моря хорошо развиты сгонно-нагонные колебания уровня моря. Под их влиянием поднимается фоновый уровень спектральной энергии (естественный длинноволновый шум), и некоторые приливные гармоники совсем немного его превышают. В Керченском проливе метеорологические колебания уровня моря менее развиты и как следствие – уровень спектрального шума на станциях Тамань и Керчь существенно ниже и приливные составляющие заметно его превышают. Для аккуратной оценки амплитуд приливных составляющих был проведен гармонический анализ.

5. ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИЛИВОВ

Гармонический анализ проводился по методу наименьших квадратов. Сначала рассчитывались амплитуды и фазы основных приливных гармоник для каждого отдельного года, а затем полученные значения усреднялись за весь период наблюдений (табл. 2).

Амплитуды основных суточных гармоник в основном больше, чем у полусуточных. Суточная радиационная гармоника S_1 достигает наибольшей амплитуды в вершине Таганрогского залива – до 6 см на станции Перебойный, а самые низкие значения наблюдаются в Керченском проливе на станции Тамань, где ее амплитуда не превышает 0.5 см (рис. 4в). Суточные гравитационные гармоники O_1 и Q_1 на всей акватории не превышают 1 см и максимальных значений достигают на станции Рогожкино, в Таганрогском заливе (рис. 5в) и на станции Кубанская устьевая соответственно.

Гармоники K_1 и P_1 на некоторых станциях могут достигать 2.2 и 2.5 см соответственно. Такие

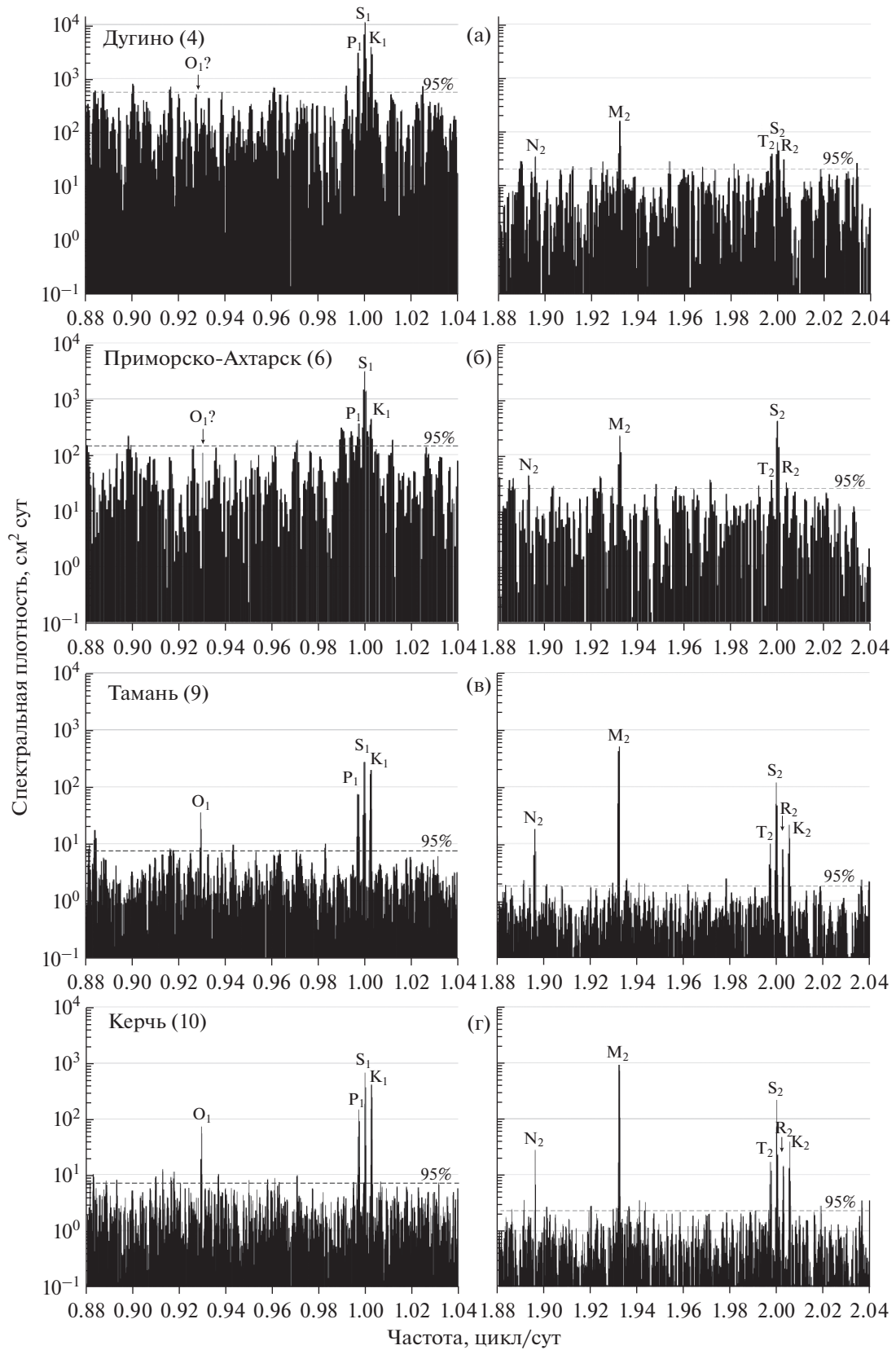


Рис. 3. Спектры с высоким разрешением колебаний уровня Азовского моря для суточного и полусуточного диапазонов частот на станциях (а) Дугино, (б) Приморско-Ахтарск, (в) Тамань и (г) Керчь, показаны 95% доверительные интервалы. Отмечены пики, соответствующие главным приливным гармоникам (O_1 , S_1 , K_1 , M_2 , S_2 и др.), а также показана частота, на которой отсутствует гармоника — “ O_1 ?”.

Таблица 2. Амплитуда (H , см) и фаза (G , °) основных приливных гармоник, тип прилива (F) и максимальный размах приливных колебаний (R , см), в том числе с учетом суточной радиационной составляющей ($R + S_1$, см) на станциях Азовского моря. Теоретические значения приливного потенциала – по Картрайту [11]

| № | Станция | Sa | | Ssa | | Q ₁ | | O ₁ | | P ₁ | | S ₁ | | K ₁ | |
|----|---------------------|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|------|--------------------|-----|----------------|-----|
| | | H | G | H | G | H | G | H | G | H | G | H | G | H | G |
| 2 | Перебойный | 13.8 | 118 | 4.0 | 192 | 0.39 | 176 | 0.76 | 280 | 2.55 | 144 | 6.04 | 8 | 2.21 | 169 |
| 3 | Рогожкино | 12.8 | 121 | 2.9 | 193 | 0.17 | 125 | 0.98 | 301 | 2.05 | 140 | 6.00 | 10 | 1.75 | 159 |
| 4 | Дугино | 14.9 | 129 | 6.3 | 143 | 0.22 | 107 | 0.92 | 289 | 2.06 | 139 | 5.78 | 13 | 2.15 | 173 |
| 5 | Ейск-порт | 12.9 | 149 | 5.3 | 193 | 0.22 | 338 | 0.41 | 274 | 1.28 | 107 | 4.49 | 330 | 1.58 | 138 |
| 6 | Приморско-Ахтарск | 14.2 | 149 | 4.6 | 130 | 0.26 | 274 | 0.27 | 203 | 0.76 | 25 | 3.48 | 255 | 0.84 | 68 |
| 7 | Кубанская устьевая | 16.6 | 150 | 1.6 | 60 | 0.42 | 158 | 0.23 | 194 | 0.58 | 3 | 1.63 | 217 | 0.14 | 124 |
| 8 | Темрюк-порт | 9.8 | 134 | 3.2 | 221 | 0.06 | 301 | 0.22 | 188 | 0.52 | 343 | 2.12 | 225 | 0.17 | 13 |
| 9 | Тамань | 10.6 | 135 | 3.1 | 226 | 0.07 | 290 | 0.25 | 275 | 0.15 | 286 | 0.48 | 231 | 0.34 | 288 |
| 10 | Керчь | 10.2 | 133 | 3.3 | 224 | 0.05 | 248 | 0.17 | 240 | 0.29 | 306 | 0.84 | 197 | 0.43 | 291 |
| 11 | Опасное | 9.9 | 135 | 3.7 | 220 | 0.10 | 233 | 0.14 | 161 | 0.42 | 306 | 1.36 | 182 | 0.24 | 329 |
| 12 | Мысовое | 9.9 | 124 | 3.1 | 227 | 0.06 | 181 | 0.22 | 98 | 0.61 | 287 | 2.17 | 154 | 0.63 | 330 |
| 13 | Геническ | 8.4 | 129 | 2.2 | 188 | 0.14 | 97 | 0.33 | 71 | 0.93 | 304 | 3.34 | 159 | 1.33 | 350 |
| 14 | Мариуполь | 12.1 | 134 | 4.2 | 197 | 0.06 | 34 | 0.23 | 334 | 0.80 | 150 | 3.43 | 22 | 0.89 | 209 |
| | Приливной потенциал | 0.01156 | | 0.07281 | | 0.07217 | | 0.37694 | | 0.17543 | | 0.00416 | | 0.53011 | |
| № | Станция | N ₂ | | M ₂ | | S ₂ | | K ₂ | | F | R | R + S ₁ | | | |
| | | H | G | H | G | H | G | H | G | | | | | | |
| 2 | Перебойный | 0.18 | 292 | 0.45 | 304 | 0.23 | 86 | 0.05 | 70 | 4.36 | 7.30 | 19.4 | | | |
| 3 | Рогожкино | 0.24 | 302 | 0.64 | 309 | 0.10 | 41 | 0.13 | 92 | 3.69 | 6.95 | 19.0 | | | |
| 4 | Дугино | 0.21 | 306 | 0.58 | 320 | 0.22 | 104 | 0.12 | 119 | 3.82 | 7.73 | 19.3 | | | |
| 5 | Ейск-порт | 0.08 | 136 | 0.42 | 126 | 0.20 | 231 | 0.01 | 83 | 3.21 | 5.20 | 14.2 | | | |
| 6 | Приморско-Ахтарск | 0.09 | 291 | 0.65 | 332 | 0.83 | 22 | 0.09 | 57 | 0.75 | 5.16 | 12.1 | | | |
| 7 | Кубанская устьевая | 0.14 | 297 | 0.98 | 266 | 0.65 | 344 | 0.10 | 195 | 0.23 | 3.99 | 7.2 | | | |
| 8 | Темрюк-порт | 0.21 | 263 | 0.75 | 280 | 0.63 | 354 | 0.14 | 234 | 0.29 | 3.54 | 7.8 | | | |
| 9 | Тамань | 0.20 | 257 | 0.99 | 259 | 0.38 | 298 | 0.13 | 261 | 0.43 | 3.93 | 4.9 | | | |
| 10 | Керчь | 0.14 | 217 | 0.77 | 223 | 0.34 | 241 | 0.14 | 224 | 0.55 | 3.43 | 5.1 | | | |
| 11 | Опасное | 0.14 | 259 | 0.65 | 256 | 0.32 | 336 | 0.14 | 228 | 0.39 | 2.69 | 5.4 | | | |
| 12 | Мысовое | 0.06 | 218 | 0.38 | 226 | 0.23 | 333 | 0.05 | 171 | 1.42 | 2.92 | 7.3 | | | |
| 13 | Геническ | 0.22 | 155 | 0.90 | 156 | 0.13 | 187 | 0.22 | 90 | 1.61 | 5.37 | 12.1 | | | |
| 14 | Мариуполь | 0.13 | 80 | 0.59 | 79 | 0.17 | 264 | 0.06 | 320 | 1.49 | 3.77 | 10.4 | | | |
| | Приливной потенциал | 0.17386 | | 0.90809 | | 0.42248 | | 0.11498 | | | | | | | |

значения наблюдаются в вершине Таганрогского залива (рис. 5б). На некоторых станциях наблюдается нехарактерное для данных гармоник свойство – их амплитуды практически равны. На некоторых станциях амплитуды P_1 значительно превышают амплитуды K_1 , что говорит об аномальном характере суточных гравитационных приливов. Так происходит на станциях Темрюк и Кубанская устьевая. На станции Тамань отношение амплитуд K_1 к P_1 составляет около 2.3, что близко к отношению их амплитуд в статической теории приливов – 3.0.

Наибольших амплитуд в полусуточном частотном диапазоне достигает главная лунная гармоника M_2 . Амплитуда гармоник M_2 по всей акватории колеблется от 0.98 см в юго-восточной части Азовского моря до 0.38 на станции Мысовое (рис. 5а). Амплитуды полусуточных гармоник N_2 и K_2 на всех станциях не превышают 0.25 см. Гармоника S_2 достигает своего максимального значения 0.83 см в Приморско-Ахтарске, а также 0.65 см на станции Кубанская устьевая и в Темрюке, а в остальном сравнима по значениям с амплитудами N_2 и K_2 .

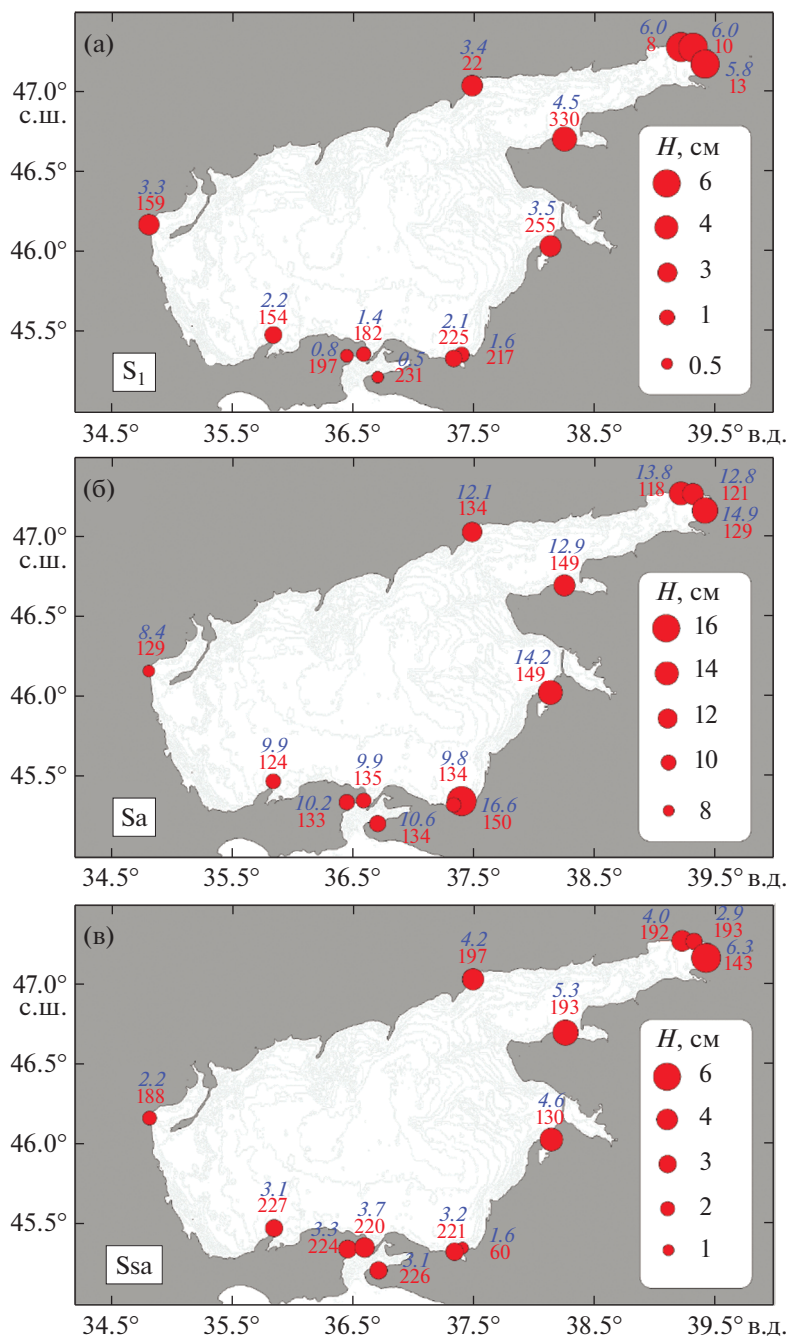


Рис. 4. Распределение амплитуд (H , см) и фаз (G , °) суточной гармоник S_1 (а), годовой гармоник S_a (б) и полугодовой гармоник S_{sa} (в) по результатам гармонического анализа многолетних рядов данных.

Анализ рядов наблюдений колебаний уровня моря позволил оценить характер прилива (F) в Азовском море, представляющий собой отношение амплитуд суточных гармоник K_1 и O_1 к полусуточным M_2 и S_2 . В северо-восточной части моря, в районе Таганрогского залива, преобладает правильный суточный прилив ($F > 3$), в южной — смешанный неправильный полусуточный ($0.3 < F < 0.6$), на западных станциях преобладает неправильный суточный ($1.5 < F < 3$). Таким образом,

внутри Азовского моря характер прилива существенно изменяется от правильного суточного на севере до неправильного полусуточного вблизи Керченского пролива.

Максимально возможную теоретическую величину прилива можно оценить по формуле

$$R = 2(H_{K_1} + H_{O_1} + H_{M_2} + H_{S_1}), \quad (1)$$

где H — амплитуда гармоник.

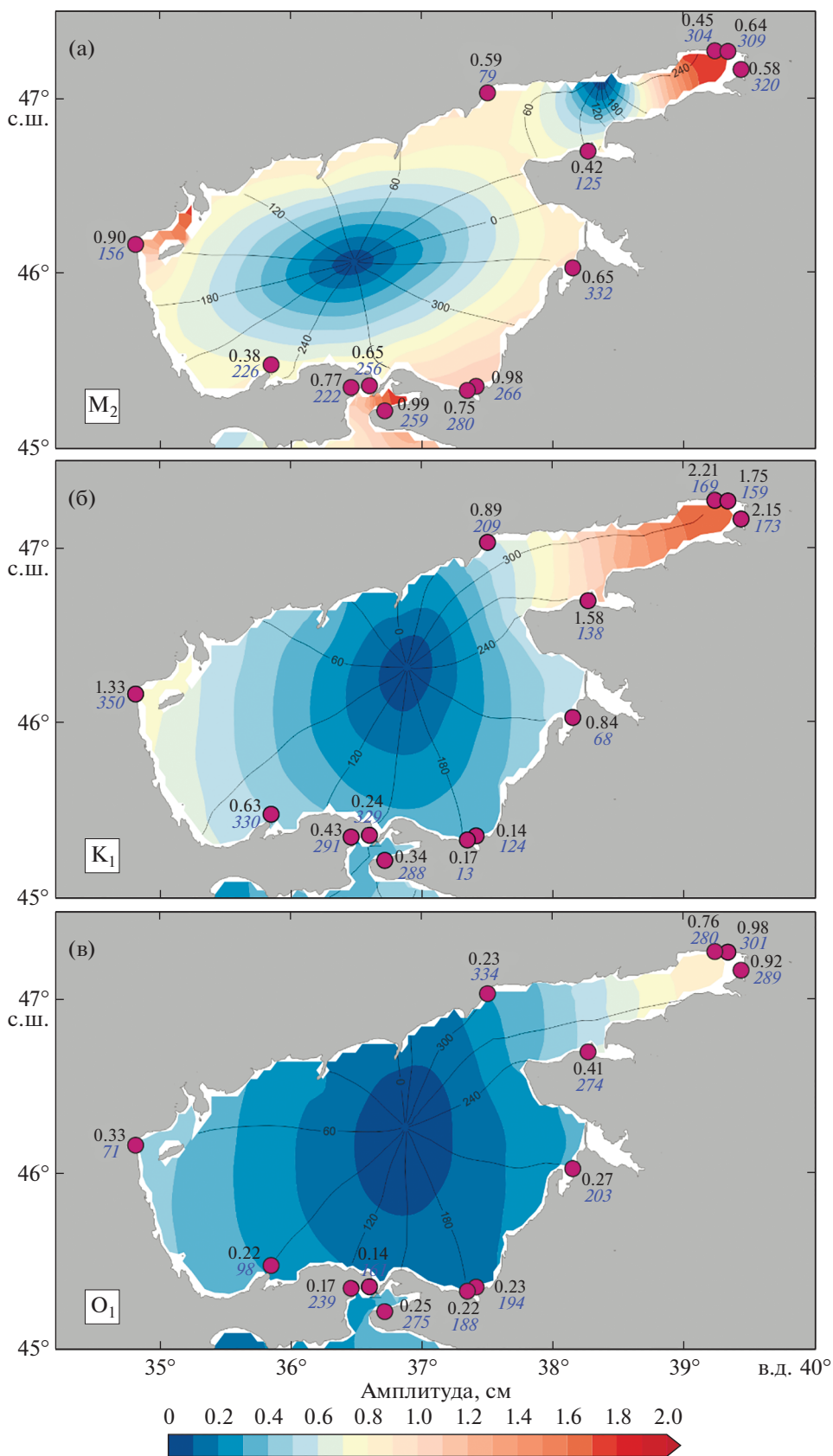


Рис. 5. Приливные карты полусуточной M_2 (а) и суточных K_1 (б) и O_1 (в) гармоник в Азовском море по данным численных расчетов и наблюдений. Сплошной линией изображены котидали (линии одинаковых фаз в градусах), цветом показаны амплитуды (см) по данным численных расчетов. Значения амплитуд и фаз гармоник, рассчитанные по натурным наблюдениям рядом с соответствующими пунктами: в числителе амплитуда (обычным черным шрифтом), в знаменателе – фаза (синим курсивом).

Максимальная величина прилива приходится на вершину Таганрогского залива – до 19.5 см, а наименьшая наблюдается в Керченском проливе – 4.9 см (табл. 2). Так как амплитуда суточной радиационной гармоники S_1 для ряда пунктов существенно превосходит амплитуды всех других гармоник, в настоящем исследовании также была рассчитана максимальная величина приливных колебаний уровня с учетом S_1 . В южной части акватории и в Керченском проливе величина меняется незначительно, но в северной части Азовского моря учет гармоники S_1 увеличил максимальную величину прилива более чем в 2 раза.

Анализ дисперсии различных типов колебания уровня Азовского моря позволил установить, что относительный вклад суммарного (гравитационного и радиационного) прилива в дисперсию колебаний уровня с периодами 4 ч – 10 суток составляет от 4.8% для станции Мысовое до 17.7% в Перебойном, а для периодов 4–30 ч – от 92% на станции Перебойный до 12% на Кубанской устьевой. Таким образом, суточные и полусуточные приливы – важная составляющая мезомасштабных колебаний уровня Азовского моря.

6. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЛИВОВ

Представленные результаты гармонического анализа дают информацию об особенностях прилива в отдельных пунктах побережья, но не отображают полной приливной картины во всем Азовском море. Для выявления пространственных особенностей приливов в Азовском море было выполнено численное моделирование. Расчеты проводились на модели приливов Черного и Азовского морей, соединяющихся Керченским проливом [14], в основе которой лежит Принстонская модель океана (РОМ). Вынуждающая сила задавалась через градиенты приливного потенциала над рассматриваемой акваторией:

$$\bar{F}_T = -(1 + k - h) \nabla \bar{\Omega}, \quad (2)$$

где \bar{F}_T – приливообразующая сила, $\bar{\Omega}$ – приливной потенциал, а h и k – числа Лява, характеризующие соответственно отношение высоты земного прилива к высоте статического прилива в океане и отношение дополнительного гравитационного потенциала к приливному потенциалу [17]. Приливной потенциал $\bar{\Omega}$ рассчитывался по формулам, представленным в работе [16]. Отклик уровня моря на изменения приливного потенциала

воспроизводился с помощью 2D-версии модели, основанной на осредненных по глубине уравнениях движения в длинноволновом приближении. В уравнении движения сила трения определяется величиной модуля скорости придонного течения и коэффициентом трения C_b :

$$\tau_{bx} = C_b u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \quad \text{и} \quad \tau_{by} = C_b v_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2}, \quad (3)$$

где u_b и v_b – компоненты скорости течения выше придонного пограничного слоя (для двумерной модели полагается равной баротропной скорости). На месте пролива Босфор была задана стенка (условие непротекания). Таким образом, численная модель воспроизводила только собственный прилив бассейна Черного и Азовского морей. Расчеты выполнялись на сетке с равномерным шагом по широте и долготе с разрешением 0.01° , созданной на основе данных о батиметрии GEBCO и уточненной для прибрежных участков Азовского моря с помощью навигационных карт. Были воспроизведены приливы в Азовском море для годовой серии (8760 часов). При помощи гармонического анализа были рассчитаны амплитуды и фазы основных приливных гармоник. В этом разделе мы рассмотрим пространственную структуру суточных и полусуточных приливов на примере гармоник M_2 , K_1 и O_1 .

Полусуточный прилив M_2 распространяется в Азовском море в виде двух амфидромических систем (рис. 5а). Основная система представляет собой амфидромию Тейлора с центром на основной оси моря. Приливная волна распространяется в ней в направлении против часовой стрелки. Для этой волны характерно полное отражение от боковых границ и почти отсутствие диссипации приливной энергии. Вторая амфидромия располагается в Таганрогском заливе. Это вырожденная амфидромия со сгущением котидальных линий у северного побережья залива. Эту систему можно представить как суперпозицию двух встречных волн Кельвина. Вероятно, амплитуда отраженной волны существенно уменьшается вследствие диссипации в области дельты р. Дон (восточное побережье моря). Области минимальных амплитуд наблюдаются вблизи амфидромических точек. Области максимальных амплитуд располагаются на западном побережье (вблизи Генгическа) – 1.7 см, на юго-восточном побережье (Темрюк) – 1.0 см, в вершине Таганрогского залива – 1.8 см. Локальный максимум также наблюдается в Таманском заливе Керченского пролива, до 1.7 см.

Для суточных составляющих K_1 и O_1 характерна одна приливная амфидромия с вращением в направлении против часовой стрелки (рис. 5б, 5в). Области наибольших амплитуд располагаются на западном (до 0.8 см для K_1 и до 0.5 для O_1) и восточном побережьях моря (до 1.7 см для K_1 и 0.9 см для O_1). Приливная амфидромия сформирована суперпозицией встречных волн Кельвина, с небольшой диссипацией в восточной части Азовского моря, вследствие чего амфидромическая точка (центр системы) сдвинута к северу относительно основной оси бассейна.

7. СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРИЛИВОВ

Для изучения сезонных изменений спектра колебаний уровня ряды наблюдений в Азовском море были разделены на зимние (ноябрь—апрель для Дугино, декабрь—февраль для Приморско-Ахтарска, январь—март для Керчи и Тамани) и летние (май—октябрь для Дугино, март—ноябрь для Приморско-Ахтарска, апрель—декабрь для Керчи и Тамани) временные отрезки, выбранные в соответствии с особенностями сезонных изменений ледового режима различных частей акватории Азовского моря [2]. Для каждого временного отрезка рассчитывался спектр, после чего были построены спектры, осредненные по всем зимним временным сериям и по всем летним (рис. 6). Длина окна Кайзера-Бесселя при расчете спектров составляла $N = 2048$ ч, что обеспечило частотное разрешение спектра 0.0117 цикл/сут.

Практически на всех спектрах мы видим ярко выраженную сезонную изменчивость на частотах суточных гармоник, которая проявляется в превышении летних (красных) пиков над зимними (синими) на частотах суточного диапазона колебаний уровня моря. Полусуточный диапазон гармоник, в частности, ярко выраженная составляющая M_2 , практически не имеет сезонной изменчивости и в разные сезоны имеет близкие значения спектральной энергии, что видно на станциях Тамань, Керчь и Опасное в южной части Азовского моря (рис. 6в, 6г). Небольшая сезонная изменчивость хода M_2 присутствует в Рогожкино и Дугино (рис. 6а); это можно связать с ледовым сезоном, который в северной части акватории выражен ярче, чем в южной.

Для спектра колебаний уровня на станции Тамань характерно превышение полусуточной гармоники M_2 над суточной S_1 независимо от сезона (рис. 6в, 6г). В области суточных частот для этой станции зимний спектр превышает летний. Возможно, это связано с усилением неперiodических (метеорологических) колебаний уровня в зимний период вблизи станции Тамань.

8. ОБСУЖДЕНИЕ

Спектральный анализ с высоким разрешением позволил на всех станциях выделить отдельные гармоники. Доминирование в суточном приливном диапазоне на всех станциях радиационной гармоники S_1 и отсутствие на большинстве станций, кроме южной части моря, главной лунной суточной гравитационной гармоники O_1 говорят о существенном вкладе радиационной компоненты в суммарный прилив на большей части акватории Азовского моря. Только в южной части моря и Керченском проливе гравитационные приливы сравнимы по магнитуде с радиационными.

Гармонический анализ позволил обнаружить ряд интересных особенностей. На основе распределения фаз (табл. 2) можно предположить, что суточная волна O_1 распространяется в направлении против часовой стрелки, что подтверждается результатами численного моделирования (рис. 5в).

На некоторых станциях наблюдается нехарактерное для гармоник K_1 и P_1 свойство — их амплитуды практически равны (рис. 3а, 3б). Это происходит, к примеру, в вершине Таганрогского залива и говорит о возможном влиянии радиационных приливов на формирование этих гармоник. На некоторых станциях (Темрюк и Кубанская устьевая) амплитуды P_1 значительно превышают амплитуды K_1 , что говорит об аномальном характере суточных гравитационных приливов.

Равенство амплитуд гармоник K_1 и P_1 может быть объяснено модуляцией радиационных приливов. В разложении приливного потенциала амплитуды этих гармоник соотносятся примерно как 3 : 1, но в северной части Азовского моря их амплитуды сопоставимы. Частоты гармоник K_1 и P_1 связаны с частотой гармоники S_1 простым соотношением

$$f(K_1, P_1) = f(S_1) \pm \Delta f_y, \quad (4)$$

где $\Delta f_y = 1$ цикл/год, из которого следует, что добавление к доминирующей гармонике S_1 гармоник K_1 и P_1 должно приводить к годовой модуляции несущей гармоники [8]. В этом случае K_1 и P_1 являются гармониками-спутниками по отношению к гармонике S_1 и появляются из-за ее сезонной модуляции. Таким образом, гармоники в северной части моря имеют не гравитационное, а радиационное происхождение.

Распределение отношения амплитуд главной лунной полусуточной гармоники M_2 к главной радиационной гармонике S_1 показывает, что M_2 вносит большой вклад в общий размах колебаний в южной части Азовского моря, в Керченском проливе. Гармоника S_1 , в свою очередь, вносит большой вклад на севере Азовского моря, в Таганрогском заливе. Таким образом, можно сле-

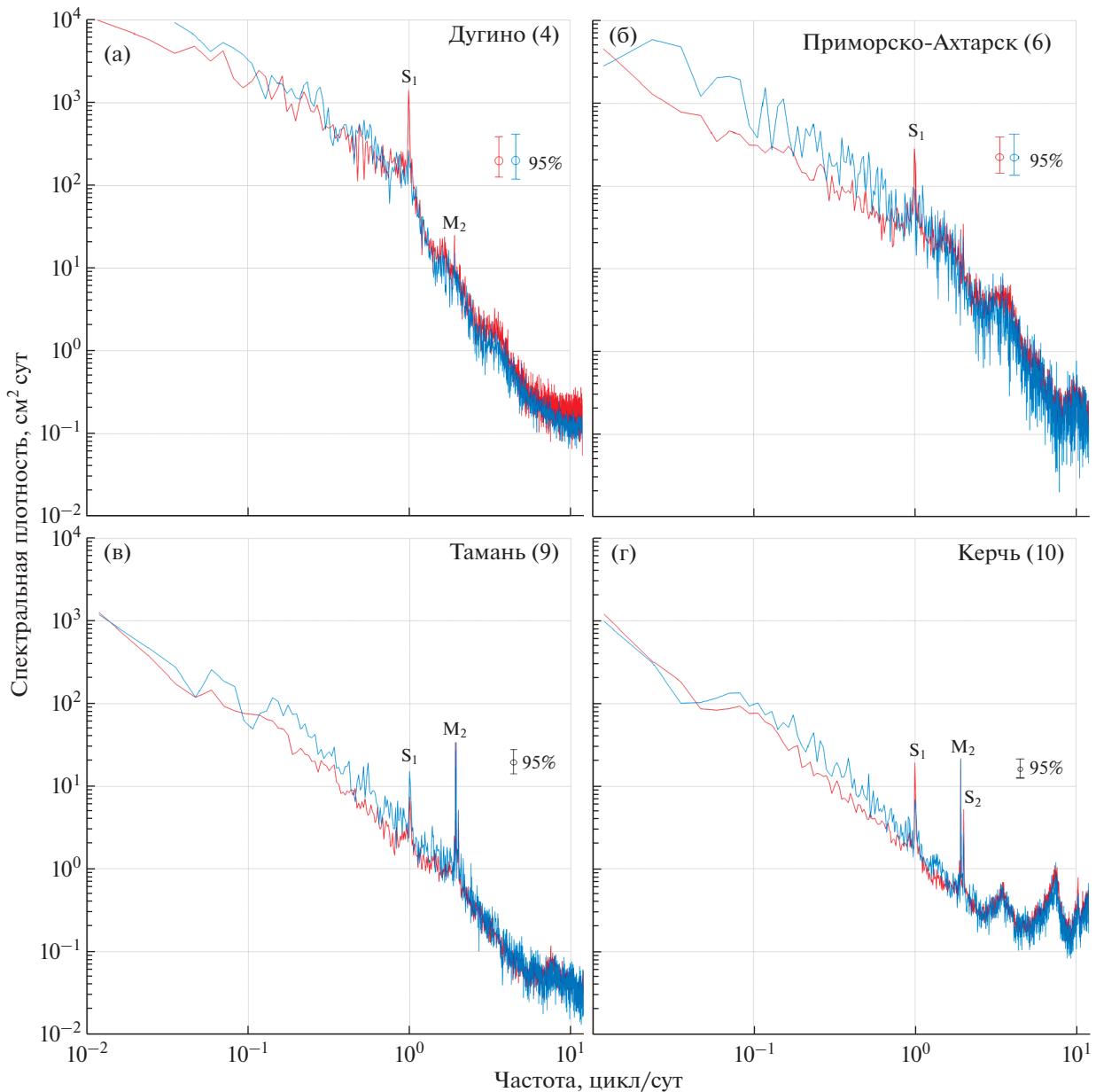


Рис. 6. Сезонные спектры колебаний уровня моря на станциях Дугино (а), Приморско-Ахтарск (б), Тамань (в), Керчь (г). Красным цветом показаны летние спектры, синим цветом – зимние. Отмечены пики суточных и полусуточных приливных гармоник, показаны 95% доверительные интервалы.

лать вывод о преобладании радиационных приливов в северной части Азовского моря и в Таганрогском заливе и гравитационно-радиационных приливов в южной части моря.

Результаты гармонического анализа полусуточных приливных колебаний для пунктов наблюдений достаточно хорошо согласуются с результатами численного моделирования. Так, разница в расчетах фазы гармонике M_2 по наблюдениям и модели для Генического, Мысового, Темрюка, Приморско-Ахтарска составляет менее 6° . Амплитуда

гармоники M_2 в зависимости от станции различается на 0.1–0.3 см. Существенные отличия в амплитуде и фазе приливной гармонике по наблюдениям и моделированию получены для вершины Таганрогского залива. Расчет приливов проводился на расчетной сетке с минимальной глубиной до 1 м, а на боковых границах выполнялось условие непротекания. В реальности в восточной части Таганрогского залива находится устьевая область р. Дон, по руслам дельты которой приливная волна продолжает распространяться и частично диссипирует.

Модельные расчеты для суточной гармоники O_1 существенно лучше соотносятся с результатами анализа прибрежных наблюдений, чем для гармоники K_1 . Ошибка в расчете амплитуды O_1 составляет от 0.05 до 0.15 см в зависимости от станции. Разница в оценках фазы гармоники по модельным и наблюдаемым рядам для большинства станций – менее 10° , что достаточно хорошо с учетом малых значений амплитуды. В расчетах амплитуд и фаз гармоники K_1 обнаружена большая разница между модельными результатами и наблюдаемыми. Видимо, это связано с тем, что приливные характеристики гармоники K_1 , рассчитанные по наблюдениям, в малой степени связаны с гравитационной природой этой гармоники, а скорее вызваны влиянием радиационных приливов с суточной периодичностью.

Остается важный вопрос – приливные колебания Азовского моря формируются вследствие проникновения черноморской приливной волны или движениями водной толщи моря, образующимися непосредственно под влиянием изменений приливообразующих сил? Для ответа на этот вопрос при помощи численной модели было проведено два эксперимента. В первом эксперименте численное моделирование проводилось на совместной модели Черного и Азовского морей, которые сообщались через Керченский пролив. Во втором эксперименте Азовское море было полностью замкнутым и приливные колебания возбуждались непосредственно изменением приливного потенциала над акваторией бассейна. Результаты показали, что энергия приливной волны, проникающей из Черного моря в Азовское, при прохождении через Керченский пролив существенно уменьшается. Амплитуды суточных приливов на западном и восточном побережьях полностью замкнутого Азовского моря (2-ой эксперимент) увеличились на 6% по сравнению с амплитудами, полученными в рамках первого эксперимента, где учитывался водообмен с Черным морем через Керченский пролив. Амплитуды полусуточной составляющей M_2 уменьшились на 5–12% во втором эксперименте по сравнению с первым. Таким образом, можно сделать вывод, что приливы в Азовском море образуются под непосредственным влиянием приливообразующих сил, которые выводятся из равновесия водную толщу бассейна. Приливная волна, проникающая из Черного моря в Азовское, меняет амплитуды основных гармоник менее чем на 12%.

Сезонные спектры позволяют выявить выраженную сезонную изменчивость на частотах суточных гармоник, которая проявляется в превышении летних пиков над зимними на частотах суточного диапазона колебаний уровня моря, что подтверждает предположение о преимущественно радиационной природе суточных гармоник.

Вероятно, радиационные приливы в Азовском море формируются под влиянием бризовой циркуляции, которая лучше всего выражена как раз в летний период.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетние ежечасные наблюдения изменений уровня Азовского моря позволили изучить происхождение приливных колебаний уровня данной акватории и выявить особенности их формирования. На основе длительных ежечасных рядов наблюдений были исследованы особенности приливных колебаний уровня Азовского моря. Результаты спектрального анализа показали наличие острых пиков, соответствующих суточным и полусуточным приливным гармоникам. На большей части акватории Азовского моря суточные пики превосходят полусуточные, и только в южной части они сравнимы или слабее.

Амплитуда основных суточных гармоник в основном больше, чем полусуточных. Амплитуда суточной радиационной гармоники S_1 меняется от 6 см в вершине Таганрогского залива до 0.5 см в Керченском проливе, тогда как амплитуда основной полусуточной гравитационной гармоники M_2 внутри акватории моря меняется от 1.0 см в юго-восточной части Азовского моря до 0.38 см на станции Мысовое. Оценка отношения амплитуд главной гравитационной гармоники M_2 к главной радиационной гармонике S_1 позволила выявить преобладание радиационных приливов в северной части Азовского моря и в Таганрогском заливе и гравитационно-радиационных приливов в южной части моря. Установлено, что внутри Азовского моря характер прилива существенно изменяется от правильного суточного на севере до неправильного полусуточного вблизи Керченского пролива. Максимальная теоретическая величина прилива обнаружена в вершине Таганрогского залива – до 19.5 см, а наименьшая отмечена в Керченском проливе – 4.9 см. Без учета амплитуды суточной радиационной гармоники S_1 в северной части Азовского моря величина приливных колебаний уменьшается в ~2 раза.

Предположение о преимущественно радиационной природе суточных приливов подтверждается сезонной изменчивостью их спектра. Вероятно, радиационные приливы в Азовском море формируются под влиянием бризовой циркуляции, которая лучше всего выражена в летний период.

Использование численного моделирования позволило построить первые детальные карты амплитуд и фаз основных гармонических составляющих прилива в Азовском море. Результаты численных экспериментов позволяют предположить, что приливы в Азовском море образуются

под непосредственным влиянием приливообразующих сил, которые выводят из равновесия водную толщу бассейна.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № 0128-2021-0004) и при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-77-00099).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герман В.К., Левиков С.П. Вероятностный анализ и моделирование колебаний уровня моря. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 229 с.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 5: Азовское море / под ред. Н.П. Гоптарева. Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 1991. 236 с.
3. Дианский Н.А., Фомин В.В. Моделирование циркуляции Азовского моря и особенности воспроизведения экстремальных нагонов в Таганрогском заливе // Труды ГОИН. 2017. № 218. С. 74–104.
4. Курчатов И.В. Сейши в Черном и Азовском морях // Изв. Центр. гидромет. бюро ЦУМОРТа. 1925. Вып. 4. С. 149–158.
5. Матишов Г.Г., Инжебейкин Ю.И. Численные исследования сейшевых колебаний уровня Азовского моря // Океанология. 2009. Т. 49. № 4. С. 485–493.
6. Медведев И.П., Рабинович А.Б., Куликов Е.А. Приливные колебания в Балтийском море // Океанология. 2013. Т. 53. № 5. С. 596–611. <https://doi.org/10.7868/S0030157413050134>
7. Попов С.К., Лобов А.Л. Диагноз и прогноз наводнения в Таганроге по оперативной гидродинамической модели // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 362. С. 92–108.
8. Рабинович А.Б., Медведев И.П. Радиационные приливы у юго-восточного побережья Балтийского моря // Океанология. 2015. Т. 55. № 3. С. 357–365.
9. Черкесов Л.В., Шульга Т.Я. Волны, течения, сгонно-нагонные процессы и трансформация загрязнений в Азовском море. Севастополь: ФГБУН МГИ, 2017. 228 с.
10. Черкесов Л.В., Шульга Т.Я., Дьяков Н.Н., Станичная Р.Р. Численное исследование сгонно-нагонных процессов и течений Азовского моря в период экстремальных ветров // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 5 (197). С. 3–20.
11. Cartwright D.E., Tayler R.J. New computations of the tide-generating potential // Geophysical Journal International. 1971. V. 23. № 1. P. 45–73.
12. Endros A. Die Seiches des Schwarzen und Azowschen meers und die dortigen Hubhohen der Gezeiten // Ann. Hyd. Mar. Met. 1932. V. 60. P. 442–453.
13. Ferrarin C., Bellafiore D., Sannino G. et al. Tidal dynamics in the inter-connected Mediterranean, Marmara, Black and Azov seas // Progress in Oceanography. 2018. V. 161. P. 102–115. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.02.006>
14. Medvedev I.P. Tides in the Black Sea: observations and numerical modelling // Pure and Applied Geophysics. 2018. V. 175. № 6. P. 1951–1969. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1878-x>
15. 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. <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00046>
16. Munk W.H., Cartwright D.E. Tidal spectroscopy and prediction // Phil. Trans. Roy. Soc. London. Ser. A. 1966. V. 259. № 1105. P. 533–581. <https://doi.org/10.1098/rsta.1966.0024>
17. Pugh D., Woodworth P. Sea-level science: understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 395 p.

Tidal Sea Level Oscillations in the Sea of Azov

A. I. Korzhenovskaia^{a, b, #}, I. P. Medvedev^b, V. S. Arkhipkin^a

^aLomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^bShirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[#]e-mail: A79198153474@yandex.ru

Longterm hourly data from 14 coastal tide gauges were used to study the features of tides in the Sea of Azov. Spectral analysis showed well-defined spectral peaks at tidal diurnal and semidiurnal frequencies. Harmonic analysis of tides for individual annual sea level series with consecutive vector averaging over the entire observation period was applied to estimate mean amplitudes and phases of 11 tidal constituents. The amplitude of the major diurnal harmonics is generally greater than the semidiurnal ones. The amplitude of the diurnal radiational constituent S_1 changes from 6 cm at the head of the Taganrog Bay to 0.5 cm in the Kerch Strait, while the amplitude of the main semidiurnal gravitational harmonic M_2 inside the sea varies from 1.0 cm in the southeastern part of the Sea of Azov, to 0.38 cm at Mysovoye. The tidal form factor within the Sea of Azov changes significantly from the diurnal form in the north to the mixed, mainly semidiurnal near the Kerch Strait. The maximum theoretical tidal range of 19.5 cm were found at the head of the Taganrog Bay, and the lowest was noted in the Kerch Strait, 4.9 cm. The assumption about the predominantly radiational genesis of diurnal tides is confirmed by the seasonal variations of their spectrum. Radiational tides in the Sea of Azov may be initiated by sea breeze winds, which is best expressed in summer.

Keywords: tides, Sea of Azov, sea level, spectral analysis, radiational tides