

**ПРАКТИКА ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИЛИВОВ  
МНОГОЛЕТНИХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ  
(НА ПРИМЕРЕ ПОЛЯРНОЙ СТАНЦИИ О. ГОЛОМЯННЫЙ, КАРСКОЕ МОРЕ)**

*д-р геогр. наук Г.Н. ВОЙНОВ<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> — ФГБУ Государственный океанографический институт, Санкт-Петербургское отделение

<sup>2</sup> — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: [voinovgn@mail.ru](mailto:voinovgn@mail.ru)

Рассмотрены особенности применения модифицированной версии расширенного гармонического анализа морских приливов по МНК по версии ААНИИ, учитывающей сезонную изменчивость приливов в годовом цикле. На примере анализа и предвычисления приливов в Карском море показана его более высокая точность описания кривой прилива. Отмечена также эффективность способа калибровки приливов при контроле, оценке качества и коррекции наблюдений на полярных станциях, приведении длительных рядов в базах данных к однородным массивам. Приведены результаты оценки сезонной и многолетней изменчивости волн приливов  $M_2$  и  $K_1$  на полярной станции (п/ст.) о. Голомянный за период 1963–2006 гг. Произведена оценка тонкой структуры (сателлитов) основных суточных и полусуточных волн прилива, образующих нодальную модуляцию. Обнаружено существенное отклонение амплитуд и фаз гармоник третьей степени потенциала от соотношений приливного потенциала.

*Ключевые слова:* приливы, расширенный гармонический анализ приливов, сезонный ход средних месячных констант волн  $M_2$  и  $K_1$ , многолетний ход средних за год амплитуд и фаз волн  $M_2$  и  $K_1$ , оценка тонкой структуры приливов-гармоник второй и третьей степени потенциала в суточных и полусуточных группах, Карское море, п/ст. Голомянный.

### ВВЕДЕНИЕ

Гармонический анализ морских приливов, разработанный В. Томсоном и Дж. Дарвином в XIX веке, усовершенствованный А. Дудсоном в начале XX века (Doodson, 1928) до настоящего времени является эффективным методом изучения и предвычисления приливов в Мировом океане. С конца XX в. наибольшее распространение в мировой практике анализа и прогноза приливов получили версии гармонического анализа на основе метода наименьших квадратов (МНК), в том числе так называемый расширенный гармонический анализ (Rossiter, Lennon, 1968; Zetler, Cummings, 1967), наиболее полно используемый в программах М.Г. Форемана, А.С. Франко, Г. Година и др. (Foreman, 1977; Franko, Nagari, 1993; Godin, 1972; Pawlowicz et al., 2002).

Теоретическую основу гармонического анализа приливов обеспечивает строго гармоническое разложение приливного потенциала по работе (Doodson, 1954) и более полное по работе (Cartwright, Tayler, 1971). В конце XX в. появились более детальные разложения приливного потенциала, выполненные для геофизических задач Й. Тамурой (1993), К. Хи (1993), Т. Хартманом и Х. Венцелем (Hartman, Wenzel, 1995) и

др., но в океанологии они не используются. Уровень шума в измерениях морских приливов на стандартных приливных постах не позволяет выделить очень многие из дополнительных составляющих волн этих разложений даже за сотни лет наблюдений.

Гармонический анализ приливов, проводимый сначала по методу Дарвина, затем по Дудсону и, наконец, по МНК, дал необходимые сведения о приливах, которые сведены в Мировой базе данных с гармоническими постоянными. Анализ приливов базы данных об уровне для 164 пунктов Мирового океана (WOCE) недавно выполнялся с помощью МНК (Ponchaut et al., 2001).

В конце XX и начале XXI в. мы видим появление нового направления в классическом гармоническом анализе приливов — *анализ прилива многолетних временных рядов* с применением расширенных версий расчета по методу наименьших квадратов (МНК) на современных компьютерах. В настоящее время сняты практически все технические и программные ограничения применения МНК, связанные ранее с выполнением суперрасширенного гармонического анализа приливов на рядах длительностью 19 и более лет (Войнов, 2006, 2011, 2015; Foreman et al., 2009; Muller, 2011; Ray, 2001).

Однако достоверные результаты таких анализов в виде временных рядов средних месячных и/или средних годовых оценок амплитуд и фаз (углов положений) основных и второстепенных волн прилива и, в особенности, тонкая структура отдельных групп прилива с нодальным разрешением по частоте напрямую и исключительно зависят от качества наблюдений, соответствия их условиям однородности.

В настоящее время в программах Форемана (Foreman, 1977) и ее версии в МАТЛАБе (Pawlowicz et al., 2002), а также в монографии (Parker, 2007) предложено включать в анализ прилива до 149 гармоник в спектре классов от долгопериодного до 1/12-суточного. Однако в целом в программах гармонического анализа приливов, представленных в (Руководство..., 1994; Bell et al.; Crauford, 1995; Doodson, 1928; Foreman, 1977; Foreman et al., 2009; Franko, 1993; Godin, 1972; Parker, 2007; Pawlowicz et al., 2002; Rossiter, Lennon, 1968), не полностью учитывается сезонная изменчивость приливов, которая проявляется во многих районах Мирового океана, но наиболее сильно выражена в арктических морях на мелководье (в шельфовой зоне). Без учета этой изменчивости невозможно адекватно наблюдениям описать в годовом цикле морские приливы в прибрежных районах и на акваториях многочисленных заливов и проливов на трассе Северного морского пути.

В 1990-е гг. в АНИИ был разработан новый методический подход к обработке и анализу морских приливов (Войнов, 1999). В дальнейшем были опубликованы версии метода для анализа нерегулярных наблюдений, анализа аномальных мелководных приливов, анализа срочных наблюдений (Войнов, 2015). Расширенный гармонический анализ морских приливов производится по новой методике с включением волн, описывающих сезонную изменчивость основных и мелководных волн. Принципиальное отличие новой версии расширенного гармонического анализа морских приливов состоит в адекватном наблюдениям описании сезонной изменчивости приливных колебаний уровня моря для районов с сильно выраженным или аномальным ходом констант волн в годовом цикле.

Однако во многих случаях использованной ранее методологии было недостаточно для полного восстановления сомнительных наблюдений. Поэтому был разработан способ калибровки приливов (Войнов, 2015).

Здесь изложены современные приемы гармонического анализа приливов по МНК по версии ААНИИ, приведены результаты применения способа калибровки приливов к многолетним наблюдениям за уровнем моря на п/ст. о. Голомянный и выполнена оценка тонкой структуры приливов в суточной и полусуточной полосах спектра.

#### **ЕЖЕЧАСНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА УРОВНЕМ МОРЯ НА П/СТ О. ГОЛОМЯННЫЙ ЗА ПЕРИОД 1963–2006 гг. И МЕТОДИКА ИХ ОБРАБОТКИ**

Наблюдения за уровнем моря на п/ст. о. Голомянный с помощью мареографа типа СУМ были начаты в 1958 г., но выполнялись только в зимний период с припая и не охватывали весь годовой период. С 1963 г. стали производиться круглогодичные ежечасные серии измерений. Капитальных установок для наблюдений за колебаниями уровня моря построить не удалось вследствие воздействия волнения и льда. Наблюдения большую часть года (ноябрь – июнь) производились с припайного льда в 20–100 м к северу от берега в северной части острова на глубине около 5 м (см. рис. 1). В летний период (июль – октябрь) измерения велись по временным футштокам различных типов, что не всегда обеспечивало качество и непрерывность уровенных наблюдений.

В зависимости от ледовых условий наблюдения в отдельные годы выполнялись с западной стороны в северной части острова вблизи берега. Предположительно это может привести к нарушению однородности места наблюдений, но результаты гармонического анализа приливов за годы, когда наблюдения велись или с северной, или с западной стороны острова, не выявили значимых различий в гармонических постоянных волн прилива. Все же преобладающий массив наблюдений был выполнен с северной части острова, что позволяет считать место измерений одинаковым.

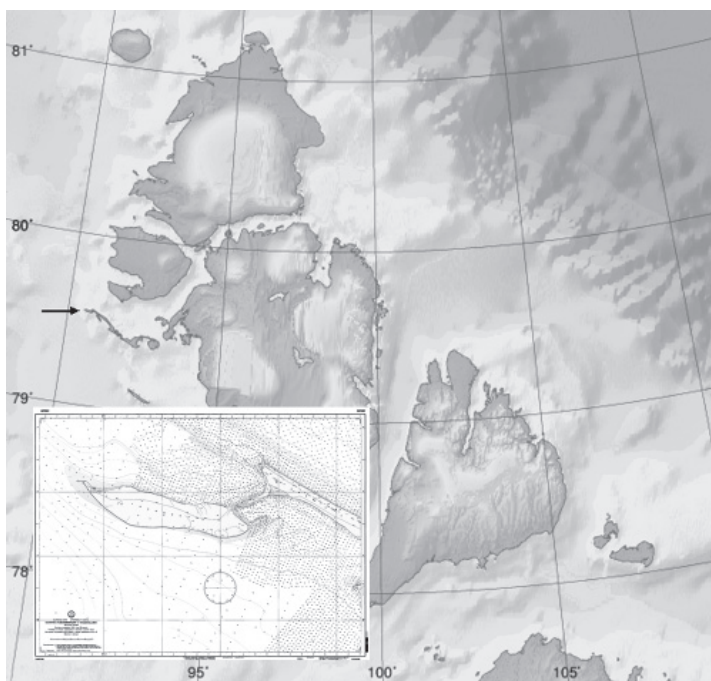


Рис. 1. Расположение уровенного поста о. Голомянный в Карском море.

Понятно, что производство наблюдений в период разрушения льда или ледообразования и постоянного наличия дрейфующего льда летом, действия штормов и волнения требовало специальных навыков, самоотверженности и вообще работа наблюдателей в суровых климатических условиях представляет особую трудность. Поэтому выполнение согласно наставлениям всего комплекса научных наблюдений за уровнем моря часто по природным условиям было просто невозможно. Здесь мы имеем в виду программу обязательных четырехсрочных измерений уровня моря по рейке футштока, необходимых для развязки мареограмм. В лучшем случае это делалось 1–2 раза в сутки (в летний период, как правило, чаще). Одно или двух измерений в сутки было недостаточно для точной развязки мареограмм. Отсюда возник артефакт в виде искажения масштаба ленты самописца, что приводило в свою очередь к существенному занижению или аномальному завышению амплитуд основных волн прилива в годовых сериях.

Однако с помощью *способа калибровки приливов* можно скорректировать приливные колебания уровня при наличии эталонных качественных серий наблюдений и привести временные ряды к однородным. В работе (Войнов, 2015) детально описан алгоритм способа калибровки приливов и приведены выборочные результаты его применения для многолетних рядов наблюдений за уровнем моря на п/ст. о. Голомянный.

Оценка результатов гармонического анализа показала, что лучшее качество наблюдений за уровнем моря соблюдалось в середине XX в., а в его конце постепенно понижалось. На п/ст. о. Голомянный резкое падение качества наблюдений произошло с 1981 г. В 1990-е и 2000-е гг., вероятно, вследствие изменения в отдельные годы условий наблюдений качество наблюдений иногда улучшалось, но затем снова падало. После 2006 г. в наблюдениях пропуски составляли до 50 % и более в годовых сериях, и мы их не использовали.

Из данных табл. 1 видно, что количество сомнительных наблюдений после 1980 г. стало расти. Но количество пропусков снизилось, и в общем результате количество пропусков и замен осталось примерно одинаковым. В целом контроль и коррекция (редакция) наблюдений с приведением их к однородным временным рядам выполнялись по методике, изложенной в (Войнов, 2015). В итоге за период 1963–2006 гг. количество пропусков, заполненных предвычислением, составило 5,4 % ряда, а количество замен брака достигло 9,8 %.

На первом этапе гармонический анализ проводился последовательно по годовым сериям по версии МНК для пропусков. Это делается с целью сохранения индивидуального сезонного хода непериодических и периодических колебаний уровня в конкретном году. Пропуски сначала восстанавливались по предвычислению «на

Таблица 1

**Сведения о периодах анализа, пропусках в измерениях и заменах сомнительных участков (брака) на предвычисления на п/ст. о. Голомянный**

Период анализа	Число лет (сутки)	Число пропусков, сутки	Число замен, сутки	Общее число пропусков и замен, сутки, в % длины ряда
1963–1980	18 (6575)	460	487	947 (14,4 %)
1963–1985	23 (8401)	575	830	1405 (16,5 %)
1986–2006	21 (7670)	290	747	1037 (13,5 %)
1963–2006	44 (16071)	865	1577	2442 (15,2 %)

себя». Повторно они заполнялись после создания модели прилива в пункте, но также с учетом индивидуальных колебаний уровня в конкретном году. Объективным критерием качества наблюдений являются результаты гармонического анализа приливов по последовательным месячным сериям и годовым сериям. В необходимых случаях применялась калибровка приливов. Замена сомнительных участков производилась только в самых очевидных эпизодах, чтобы максимально сохранить исходные ряды. Предварительные выборочные результаты анализа приведены в (Войнов, 2015). Здесь они представлены более подробно.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПО МЕТОДУ МНК ПО ВЕРСИИ ААНИИ

#### Сезонная изменчивость основных полусуточных и суточных волн прилива

На рис. 2 дан временной ход последовательных месячных оценок значений амплитуды и фазы (угла положения) волны  $M_2$  за период 44 года. Кривые на рис. 2 показывают четко выраженный годовой цикл во временном ходе амплитуды и фазы волны  $M_2$ . Как правило, максимум амплитуды и минимум фазы наступает в августе. Но за 44 года (1963–2006) в 17 случаях (38,6 %) максимум амплитуды отмечался в сентябре, а минимум фазы в этот месяц наблюдался в 23 случаях (52,2 %).

Для о. Голомянный были рассчитаны средние месячные оценки амплитуд и фаз основных суточных ( $K_1$  и  $O_1$ ) и главных полусуточных волн ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ), а также и ряда других значимых волн за период 19 лет. Для волны  $M_2$  эти оценки даны в табл. 2. Для расчета оценок значений средних месячных значений амплитуд и фаз этих волн применялись правила векторного осреднения. Сезонный ход амплитуды представлен также в виде относительного изменения ( $dH$ ) ее средней величины ( $H$ ) как  $dH = (H_m - H_r)/H_r$  (%), где  $H_m$  — среднее векторное значение из всех серий за

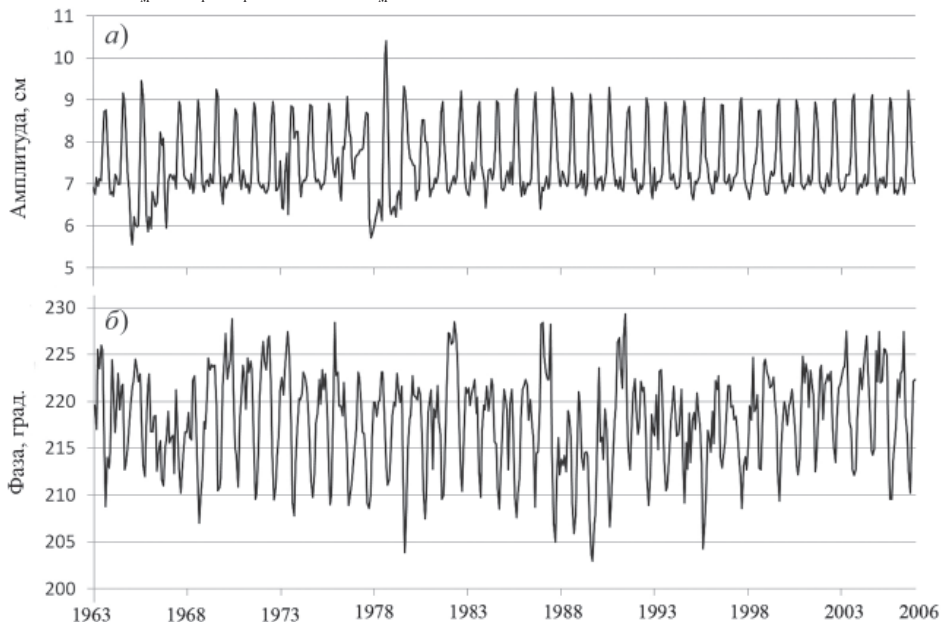


Рис. 2. Временной ход амплитуды (а) и фазы (б) (угла положения) волны  $M_2$  по результатам анализа 528 последовательных месячных серий за период 1963–2006 гг. на п/ст. о. Голомянный.

Оценки средних векторных значений амплитуд ( $H$ , см) и фаз ( $g$ , град.) в нулевом поясе волны  $M_2$ , их среднее квадратическое отклонение и средний сезонный ход на п/ст. о. Голомянный за период 1963–1981 гг.

Месяц	Средние оценки		С.к.о.		Сезонный ход	
	$H$ , см	$G$ , град.	$\pm\sigma_H$ , см	$\pm\sigma_g$ , град.	$dH$ , %	$dg$ , град.
I	7,02	220,8	0,40	3,30	-5,9	3,3
II	6,93	219,6	0,38	3,16	-7,2	2,2
III	6,95	221,5	0,37	3,04	-6,9	4,0
IV	7,03	221,0	0,40	3,26	-5,9	3,6
V	7,08	222,4	0,41	3,30	-5,2	4,9
VI	7,00	220,3	0,43	3,53	-6,2	2,8
VII	8,00	215,8	0,30	2,13	7,2	-1,7
VIII	9,00	210,2	0,33	2,12	20,6	-7,3
IX	8,89	210,4	0,37	2,39	19,1	-7,1
X	7,85	213,7	0,44	3,23	5,1	-3,7
XI	7,17	218,2	0,47	3,77	-4,0	0,7
XII	6,93	220,5	0,47	3,91	-7,2	3,0

данный месяц, а  $H_T$  — среднее векторное за весь период. Сезонный ход фазы ( $dg$ ) дан в виде отклонения средней величины из всех серий за данный месяц от средней за весь период  $dg = (g_m - g_T)$ . Среднее квадратическое отклонение (с.к.о., или  $\sigma$ ) для амплитуды и фазы рассчитывалось по формулам ошибок векторного среднего. Для этого средние и индивидуальные месячные значения амплитуды и фазы преобразо-

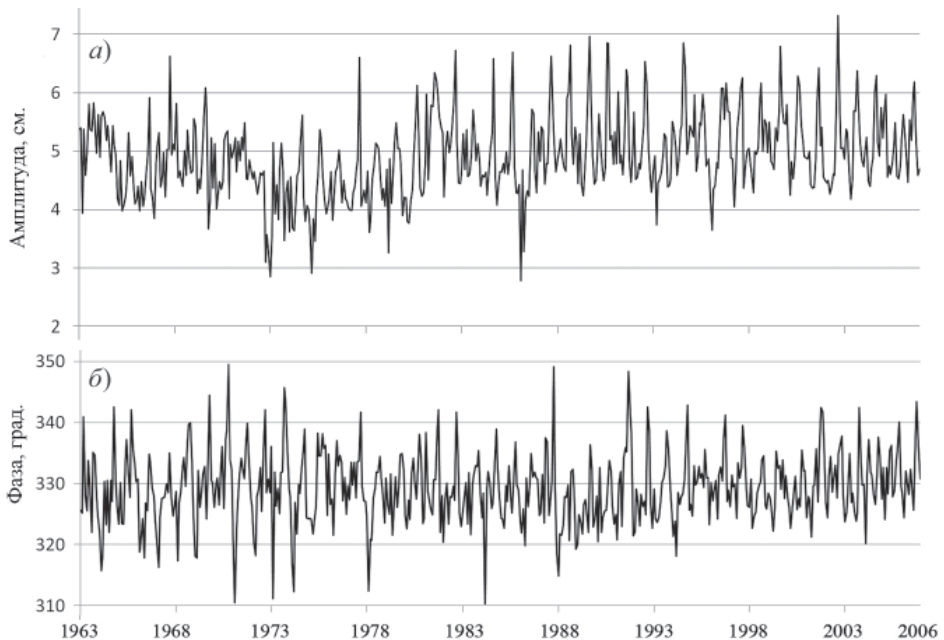


Рис. 3. Временной ход амплитуды ( $a$ ) и фазы ( $б$ ) (угла положения) волны  $K_1$  по результатам анализа 528 последовательных месячных серий за период 1963–2006 гг. на п/ст о. Голомянный.

вывалились в компоненты  $H\cos g$  и  $H\sin g$ . По ним рассчитывалась стандартная ошибка для амплитуды  $\sigma_H$  и затем для фазы  $\sigma_g$ .

В средних месячных значениях амплитуды в среднем максимум амплитуды наблюдается в августе, а минимум отмечается в феврале–марте. При этом отклонение от средней годовой величины (нормы) в августе достигает 20,6 %, а уменьшение амплитуды в феврале составляет 7,2 % относительно нормы. Размах изменения фазы в годовом цикле в среднем равен 12,2°, а уменьшение ее в сентябре по отношению к норме равно 7,3°. Практически тождественный сезонный ход наблюдается и в других циклах в 19 лет на интервале с 1982 по 2006 г.

Временной ход амплитуды и фазы волны  $K_1$  по результатам анализа месячных серий за период 1963–2006 гг. дан на рис. 3. По кривым рис. 3 также виден основной годовой цикл изменчивости амплитуды и фазы, но он зачастую становится плохо выраженным.

Сезонный ход амплитуды и фазы волн  $S_2$  и  $N_2$  в общих чертах соответствует таковому у волны  $M_2$ . Но характеры сезонного хода суточных волн  $K_1$  и  $O_1$  отличны от полусуточных волн и различаются между собой. Кривые сезонного хода значений относительных амплитуд и значений отклонений фаз от средних в годовом цикле для волн  $M_2$  и  $K_1$ ,  $O_1$  представлены на рис. 4. Из поведения кривых видно, что ход амплитуд волн  $K_1$  и  $O_1$  в годовом цикле находится в противофазе между собой. Изменение амплитуды волны  $K_1$  в годовом цикле коррелирует с волной  $M_2$  в общих чертах. Ход фаз волн  $K_1$  и  $O_1$  сходен, но кардинально различается с сезонным ходом волны  $M_2$  в годовом цикле.

Таким образом, можно говорить о различных физических механизмах сезонной изменчивости полусуточных и суточных волн прилива. В научной литературе в отдельных случаях находили связь сезонной изменчивости констант волны  $K_1$  с влиянием бризовых ветров. Мы считаем, что сезонная изменчивость констант волн

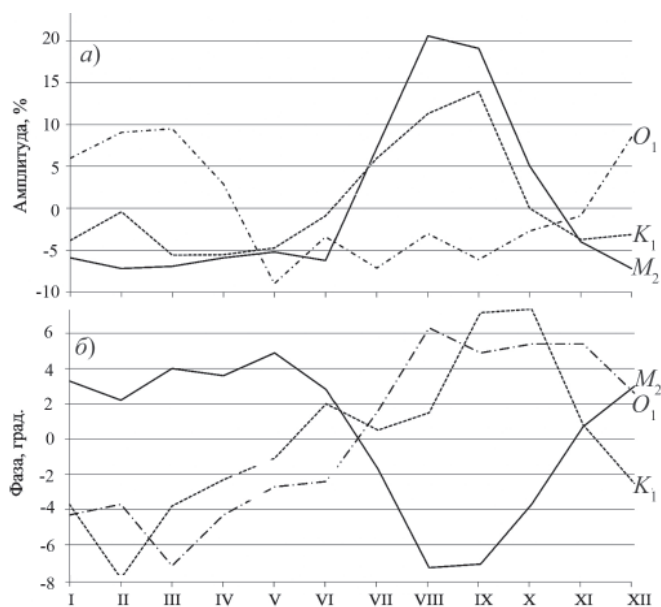


Рис. 4. Средний сезонный ход относительной амплитуды,  $dH$  (а) и отклонений фазы,  $dg$  (б) волн  $M_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  на п/ст. о. Голомянный за период 1963–1981 гг.

$K_1$  и  $O_1$  в Карском море может объясняться недостатками теоретического отделения основных волн от второстепенных в результатах второго приближения при гармоническом анализе месячных серий.

Важным фактом, как показано выше, является эффект *индивидуального сезонного хода* полусуточных и суточных волн в конкретном году в данном пункте, зависящий, вероятно, от ледовых, гидрологических и метеорологических условий, а может быть, и других факторов. Поэтому при применении для предвычисления прилива средних многолетних оценок констант волн прилива мы все же будем допускать определенные неточности, связанные с особенностями распространения приливной волны в конкретном году.

#### Многолетний временной ход средних годовых значений амплитуды и фазы волн $M_2$ и $K_1$ на п/ст. о. Голомянный с 1963 по 2006 г.

Средние годовые оценки констант волн  $M_2$  и  $K_1$  приведены на рис. 5 и 6 соответственно.

Оценка линейных трендов амплитуды и угла положения (фазы) волны  $M_2$  не выявила значимых трендов этих констант. Скорости изменения амплитуды и фазы ниже уровня значимости. За весь период в 44 года изменение амплитуды (уменьшение) в среднем составило не более 0,001 см, а увеличение фазы равно  $+0,7^\circ$ . Но эти значения не превосходят величин с.к.о. в амплитуде ( $\pm 0,20$  см) и фазе ( $\pm 1,54^\circ$ ) и недостоверны.

Во временном ходе средних годовых констант волны  $K_1$  присутствует значимый линейный тренд, но он выражен только в амплитуде. Скорость изменения амплитуды составляет  $+0,0106$  см/год, а угла положения (фазы) равна  $+0,042$  град./ч. За период 44 года амплитуда волны  $K_1$  увеличивается на 0,47 см, а фаза прибавляется на  $1,8^\circ$ . Эти значения выходят за пределы с.к.о. средних годовых констант в амплитуде ( $\pm 0,29$  см), но не в фазе ( $\pm 3,41^\circ$ ). Поэтому можно считать достоверным рост амплитуды волны  $K_1$ , хотя это увеличение составляет всего 9,5 % средней величины амплитуды волны за весь период наблюдений.

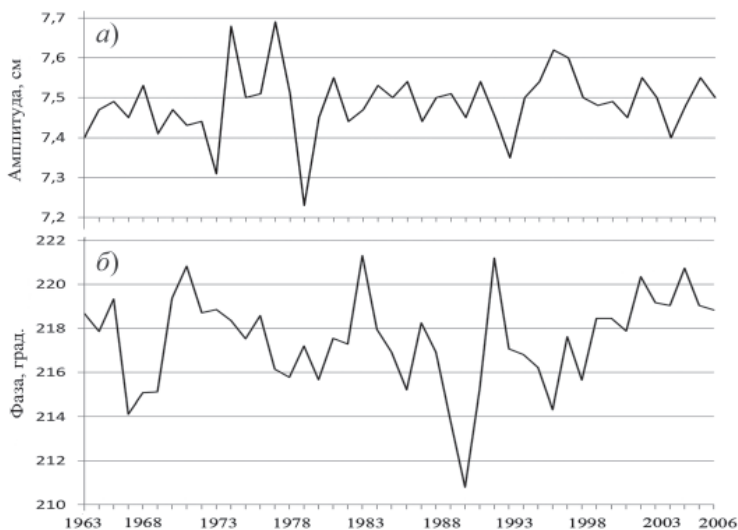


Рис. 5. Временной ход годовых оценок амплитуды (а) и фазы (б) волны  $M_2$  на п/ст. о. Голомянный с 1963 по 2006 г.



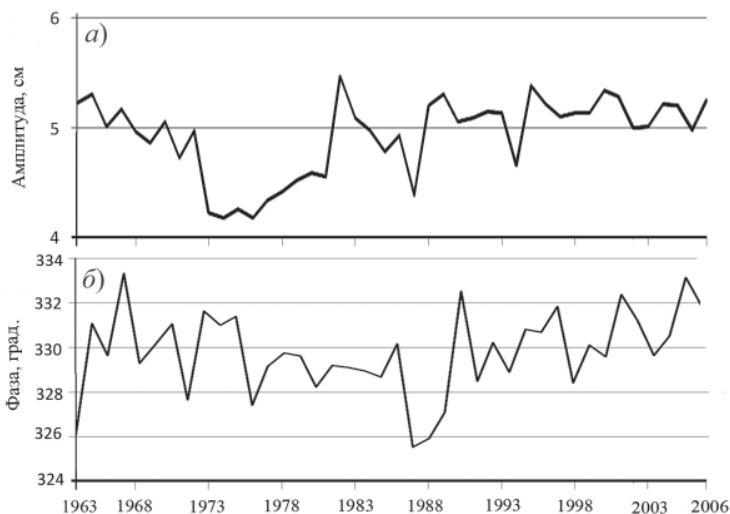


Рис. 6. Временной ход годовых оценок амплитуды (а) и фазы (б) волны  $K_1$  на п/ст. о. Голомянный с 1963 по 2006 г.

### Многолетний временной ход средних за 19 лет значений амплитуд и фаз волн $M_2$ и $K_1$ на п/ст. о. Голомянный с 1963 по 2006 г.

Для исследования многолетней изменчивости гармонических постоянных волны  $M_2$  иногда рассматриваются «сырые» оценки этой волны без введения астрономических аргументов. Считается, что с помощью этого приема можно исключить нодальный цикл изменчивости, который в наблюдениях предположительно мало отличается от теоретического (Muller, 2011; Woodworth, 2010). Но этот прием будет эффективен только в случае соответствия группы или кластера (основная гармоника с второстепенными гармониками, образующими нодальную коррекцию) волны  $M_2$  потенциалу, что не подтверждается в наблюдениях.

В работе (Войнов, 2006) было показано, что для точного расчета нодальной модуляции прилива  $M_2$  в Амдерме (Карское море) требуется учет 8 спутников (второстепенных волн) в кластере (группе) этой волны, включая нелинейный член  $2MM_{2,-N}$ , который отсутствует в потенциале. Поэтому для о. Голомянный необходимо было выполнить анализ тонкой структуры по двум независимым периодам в 19 лет (для сравнения результатов) и определить реальные константы спутников в группах основных волн прилива.

Альтернативный подход заключается в расчете констант волн прилива при производстве скользящего гармонического анализа по МНК с длиной ряда (окном) в 19 лет. При такой длине ряда все волны (гармоники) выделяются без влияния спутников, то есть у всех волн редуцированные множители ( $f$ ) равны 1, а поправки фазы ( $u$ ) равны 0. Результаты последовательных анализов всего периода с окном 19 лет и сдвигом в один год позволяют получить средние реальные оценки всех основных и второстепенных волн прилива. Средние за 19 лет оценки констант волн  $M_2$  и  $K_1$  даны на рис. 7 и 8 соответственно.

По кривым средних за 19 лет значений амплитуды и фазы волны  $M_2$  (см. рис. 7) видно, что их колебания не имеют выраженной закономерности. Точность опреде-

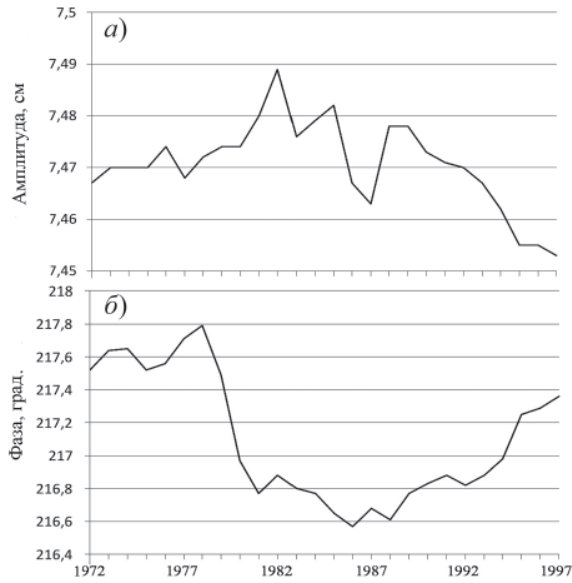


Рис. 7. Временной ход средних за 19 лет оценок амплитуды (а) и фазы (б) волны  $M_2$  на п/ст. о. Голомянный с 1963 по 2006 г. (26 значений). Первый период 1963–1981 гг. (середина 1972 г.) и последний период 1988–2006 гг. (середина 1997 г.).

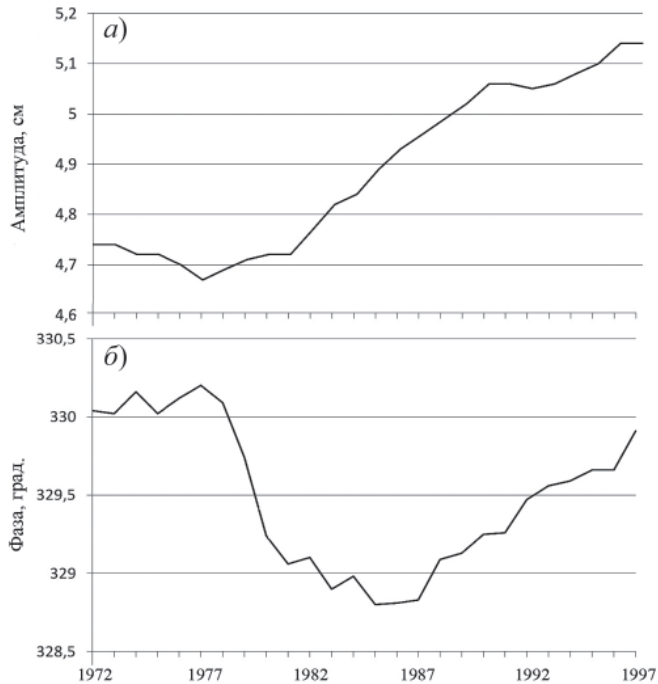


Рис. 8. Временной ход средних за 19 лет оценок амплитуды (а) и фазы (б) волны  $K_1$  на п/ст. о. Голомянный с 1963 по 2006 г. (26 значений). Первый период 1963–1981 гг. (середина 1972 г.) и последний период 1988–2006 гг. (середина 1997 г.).

ления констант прилива настолько высока, что различия видны на уровне сотых см в амплитуде ( $\sigma = \pm 0,036$  см) и десятых градуса в фазе ( $\sigma = \pm 0,28^\circ$ ). Коэффициент линейного тренда в амплитуде не превышает значений с.к.о. констант прилива за весь период. Линейный тренд в фазе имеет небольшой уклон, и уменьшение фазы в конце периода составляет  $-0,7^\circ$ . Но границы доверительного интервала этого значения очень широкие и не вполне убедительные. В целом подтверждается оценка, выполненная ранее на основе кривых средних годовых констант прилива, которая не выявила значимого тренда в константах волны  $M_2$ .

Для средних за 19 лет значений констант прилива волны  $K_1$  виден положительный тренд в амплитуде и неявный отрицательный тренд в фазе. Скорость роста значений амплитуды составила  $+0,021$  см/19 лет, а скорость падения фазы равна  $-0,037$  град./19 лет (по оценкам линейных трендов). Эти значения не полностью соответствуют таковым, полученным при оценке трендов средних годовых значений волны  $K_1$ . В целом значение амплитуды увеличивается на  $+0,53$  см к последнему периоду в 19 лет (1988–2006). Значение фазы уменьшается на  $-0,62^\circ$  к этому же периоду, что не превосходит с.к.о. для фазы ( $\pm 1,52^\circ$ ).

В конечном счете анализ линейных трендов средних за 19 лет констант прилива волны  $K_1$  подтверждает полученный ранее при анализе средних годовых значений амплитуды этой волны вывод о значимом росте амплитуды за период наблюдений. Так же, как и для средних годовых значений, не признан достоверным тренд фазы (угла положения) волны  $K_1$ .

#### **ТОНКАЯ СТРУКТУРА ПРИЛИВОВ НА П/СТ. О. ГОЛОМЯННЫЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПО МНК ДВУХ НЕЗАВИСИМЫХ СЕРИЙ ПО 22 ГОДА (1963–1984 гг. и 1985–2006 гг.)**

Гармонический анализ выполнялся по МНК по всем линиям или гармоникам в суточном и полусуточном диапазоне потенциала, разрешаемым за период нодального цикла (в действительности более этого периода). При этом 179 гармоник рассчитано в суточном классе приливов из 197 гармоник второй и третьей степени в разложении потенциала и 142 гармоники выделены в полусуточном классе из 150 гармоник от сферических функций второй и третьей степени потенциала. Угловые скорости 26 гармоник (из 347) имеют разность по частоте между соседней гармоникой меньше, чем скорость изменения угловой скорости восходящего узла лунной орбиты  $N$  ( $0,0022$  град./ч), и требуют для разделения период в сотни лет и более. В этих случаях вместо двух гармоник выделялась большая по амплитуде гармоника. Для понижения размерности матрицы линейных уравнений производилось выделение отдельных классов прилива с помощью специальных полосовых фильтров. Этот прием позволяет производить гармонический анализ по МНК отдельно для суточного или полусуточного временных рядов после фильтрации.

Общий период наблюдений на п/ст. о. Голомянный позволяет произвести гармонический анализ по МНК для двух независимых серий с периодом 22 года каждая, соответственно равных 192864 ч (1963–1984 гг.) и 192840 ч (1985–2006 гг.). Далее были получены средние векторные гармонические постоянные констант гармоник из двух серий. В тех случаях, где значения амплитуды гармоник не превышали 90 % доверительный интервал, равный для суточного класса  $\pm 0,054$  см и для полусуточного класса  $\pm 0,053$  см, они не осреднялись при расхождении в углах положений более  $90^\circ$ .

Основная задача гармонического анализа длительных временных рядов колебаний уровня моря заключается в проверке соответствия приливного компонента

уровня потенциалу. Это означает, что следует проверить нодальную модуляцию для всех основных групп гармоник в полусуточном и суточном классах прилива. В суточном классе прилива по разложению потенциала Картрайта (Cartwright, Tayler, 1971) содержится 21 группа гармоник, а в полусуточном классе их определяется 17 групп. Поскольку прилив на о. Голомянный небольшой — средняя сигийная величина прилива в летний период составляет всего 26 см, то и амплитуды основных гармоник прилива имеют небольшую величину. Самая большая гармоника в суточном классе — гармоника  $K_1$  равна 4,9 см, а в полусуточном — гармоника  $M_2$  составляет 7,5 см. Поэтому ясно, что в некоторых группах амплитуды даже основных гармоник не превышают уровень шума, а в большинстве групп достоверные выводы можно делать только по наибольшим по величине второстепенным гармоникам в группах.

Для решения поставленной задачи можно рассматривать только те гармоники прилива, которые имеют минимальные по величине мелководные двойники. То есть в этих гармониках должен преобладать астрономический прилив, соотношения в котором между главной линией в группе и линиями сателлитов следуют теории потенциала. Как правило, значения углов положений гармоник второй степени в группе близки к таковому значению для основной линии. В группах суточного и полусуточного классов прилива были рассчитаны теоретические и наблюдаемые отношения между величинами амплитуд второстепенных гармоник и основной линией (гармоникой) в группе.

Здесь и далее будем называть приливами второй и третьей степени по (Cartwright, Tayler, 1971) гармоники в группах (кластерах) суточных и полусуточных приливов, возникающих от сферических гармоник второй и третьей степени потенциала.

Например, аргумент основной линии в кластере волны  $Q_1$  равен  $(1, -2, 0, 1, 0, 0)$  с амплитудой по теории 0,6918 см (здесь и далее с учетом широтного коэффициента). Аргумент второй линии в кластере этой волны равен  $(1, -2, 0, 1, -1, 0)$ , а амплитуда по теории составляет 0,1305 см. Разность аргументов этих волн будет  $-N'$  ( $N' = -N$  — средняя долгота узла орбиты Луны), а отношение амплитуд (второй гармоники к основной) по теории равно 0,1886.

Теоретический статический прилив  $H_{ст} = C_n^m \cdot W_n^m$  определялся с учетом широтных коэффициентов для приливов второй и третьей степени  $W_n^m$  (Cartwright, Tayler, 1971).

Результаты расчетов для суточных и полусуточных гармоник второй степени сведены в табл. 3. В табл. 3 не включены гармоники прилива, в которых существенно влияние мелководных двойников:  $\alpha_1(\mu J_1)$ ,  $MP_1(\tau_1)$ ,  $SJ_1(\beta_1)$ ,  $TK_1(S_1)$ ,  $TP_1(S_1)$ ,  $SO_1(SO_1)$ , и ряд других менее значимых по величине гармоник, которые не превышали уровень шума.

Данные табл. 3 подтверждают приближенное соответствие с разложением потенциала для гармоник от 2-й степени. Имеющиеся расхождения значений отношений вполне объяснимы, хотя и не строго. Во-первых, любая основная гармоника имеет своего мелководного двойника, но разделить их не всегда представляется возможным. Для некоторых пар гармоника — двойник, как  $NO_1 - NO_1$ ,  $J_1 - MQ_1$ ,  $SO_1 - SO_1$ ,  $L_2 - 2MN_2$ , и ряда других такое разделение можно провести с помощью функций отклика (Войнов, 2006). В этих случаях мелководный двойник имеет амплитуду, соизмеримую с основной гармоникой. В других случаях, где амплитуда двойника намного меньше основной гармоники, это разделение проблематично выполнить: например, для пар  $M_2 - KO_2$ ,  $P_1 - SK_1$ ,  $K_1 - MO_1$  и т.д.

**Средние значения амплитуд ( $H$ ) и углов положений ( $g$ ) основных и второстепенных гармоник второй степени потенциала в группах суточных и полусуточных приливов и отношения их амплитуд по наблюдениям и по теории**

Гармоника	Угловая скорость, град./ч	Наблюдения		Статическая амплитуда, см	Отношение амплитуд	
		$H$ , см	$g$ , град.		Наблюдения	Теория
$Q_1$	13,398660	0,132	324,9	0,6918		
$Q_{1,N}$	13,396454	0,024*	(16,9)	0,1305	0,1835	0,1886
$O_1$	13,943035	2,398	302,5	3,6132		
$O_{1,N}$	13,940829	0,474	307,8	0,6814	0,1976	0,1886
$NO_1$	14,496693	0,245	309,7	0,2841		
$NO_{1,2P}$	14,487410	0,069	309,7	0,1021	0,2833	0,3594
$P_1$	14,958931	1,541	320,7	1,6816		
$P_{1,N}$	14,956724	0,092	352,1	0,0189	(0,0595)	0,0112
$K_1$	15,041068	4,906	329,9	5,0817		
$K_{1,N}$	15,043275	0,696	319,8	0,6891	0,1419	0,1356
$J_1$	15,585443	0,228	332,0	0,2841		
$J_{1,N}$	15,587649	0,033	298,2	0,0564	0,1447	0,1983
$OO_1$	16,139101	0,101	310,1	0,1556		
$OO_{1,N}$	16,141308	0,053	322,7	0,0996	0,5276	0,6404
$N_2$	28,439729	1,349	184,8	0,1538		
$N_{2,N}$	28,437523	0,064	185,2	0,0057	0,0473	0,0373
$M_2$	28,984104	7,468	217,4	0,8030		
$M_{2,N}$	28,981898	0,313	214,7	0,0299	0,0419	0,0373
$M_{2,2P}$	28,993387	0,070	191,3	0,0005	(0,0093)	0,0006
$L_2$	29,528478	0,246	248,6	0,0227		
$L_{2,2P}$	29,537762	0,050	265,2	0,0057	0,2048	0,2502
$L_{2,N}$	29,539968	0,024*	277,7	0,0025	0,0963	0,1101
$K_2$	30,082137	0,903	267,9	0,1016		
$K_{2,N}$	30,084343	0,247	270,7	0,0303	0,2735	0,2982

Примечание. \* — амплитуда выше уровня шума, но ниже 90 % доверительного интервала. В скобках указаны сомнительные значения.

Соответствие разложению потенциала подтверждается также близостью углов положений основных и второстепенных гармоник в наблюдениях. Имеющиеся расхождения не выходят за пределы доверительных интервалов.

Среднее из значений отношений по наблюдениям к отношениям по теории для 8 пар наиболее надежных определений в табл. 3 (кроме гармоник  $NO_1$ ,  $P_1$  и  $L_2$ ) составило 0,991.

Расчеты, аналогичные выполненным в табл. 3, но для гармоник третьей степени в группах суточного и полусуточного класса приливов, приведены в табл. 4. Здесь принимались во внимание гармоники, не имеющие вкладов от гармоник второй степени потенциала с почти совпадающими угловыми скоростями.

Вследствие очень малых амплитуд гармоник третьей степени в большинстве групп приливов и присутствия во многих случаях гармоник второй степени с почти совпадающими угловыми скоростями удалось привлечь к рассмотрению приливы в шести группах (см. табл. 4).

Из данных табл. 4 следует, что во всех случаях отношения амплитуд гармоник третьей степени к основной гармонике существенно превосходят теоретические

**Средние значения амплитуд ( $H$ ) и углов положений ( $g$ ) основных и второстепенных гармоник третьей степени потенциала в группах суточных и полусуточных приливов и отношения их амплитуд по наблюдениям и по теории**

Гармоника	Угловая скорость, град./ч	Наблюдения		$H_{ст}$ , см	Отношение амплитуд		$R$
		$H$ , см	$g$ , град.		наблюдения	теория	
$O_1$	13,943035	2,398	302,5	3,6132			
$O_{1,P}$	13,947677	0,0637	185,4	0,0146	0,2656	0,0040	>>
$NO_1$	14,496693	0,245	309,7	0,2841			
$NO_{1,N}$	14,489845	0,020*	169,2	0,0133	0,0816	0,0468	1,744
$M_{1,P}$	14,492052	<b>0,191</b>	140,8	0,0897	<b>0,7796</b>	<b>0,3157</b>	<b>2,469</b>
$K_1$	15,041068	4,906	329,9	5,0817			
$K_{1,N}$	15,034220	0,038	271,3	0,0007	0,0077	0,0001	>>
$K_{1,2N}$	15,047916	0,070	54,1	0,0007	0,0143	0,0001	>>
$J_1$	15,585443	0,228	332,0	0,2841			
$J_{1,N}$	15,592291	0,028*	186,9	0,0133	0,1228	0,0466	2,635
$N_2$	28,439729	1,349	184,8	0,1538			
$N_{2,N}$	28,432881	0,023*	59,3	0,0022	0,0170	0,0143	1,189
$M_2$	28,984104	7,468	217,4	0,8030			
$M_{2,P}$	28,988746	0,058	291,1	0,0019	0,0078	0,0024	3,250

*Примечания.* \* — амплитуда выше уровня шума, но ниже 90% доверительного интервала; >> — определение  $R$  не выполнено ввиду очень малой величины по теории. Жирным шрифтом выделена гармоника  $M_1$ .

значения отношений. Отклонения от этого правила связаны с малодостоверными оценками при малых величинах амплитуд. Значения углов положений основной и второстепенной (третьей степени) гармоник существенно различаются между собой (в отличие от гармоник второй степени). Можно предположить влияние мелководных гармоник-двойников второго и третьего порядка взаимодействия, которые формируются под влиянием различных физических причин (Le Provost, 1991). Но для более

Таблица 5

**Значения амплитуд  $H$  (см) и углов положений  $g$  (град.) по времени нулевого пояса и величина отношения  $R$  в кластере суточного прилива  $NO_1$  ( $M_1$ )**

Пункт	Гармоника третьей степени. $q = 14,489846$			Прилив $M_1$			Прилив $NO_1$		
	$H$	$g$	$R$	$H$	$g$	$R$	$H$	$G$	$R$
Полярное	0,101	65,0	4,412	0,709	86,6	4,596	0,342	289,4	0,647
Териберка	0,077	104,7	3,377	0,736	92,8	4,764	0,414	289,7	0,782
Хейса	0,023*	153,8	3,250	0,181	217,8	2,054	0,202	358,1	0,773
Амдерма	0,111	297,8	4,724	0,490	306,1	3,208	0,241	42,3	0,466
Голомянный	0,020*	169,2	1,504	0,191	140,8	2,129	0,245	309,7	0,862
Правды	0,029*	8,0	1,726	0,119	133,6	1,045	0,182	294,5	0,495

*Примечание.* Средний уровень шума остаточных рядов в суточном диапазоне спектра для Полярного, Териберки, Хейса, Амдермы равен соответственно 0,03 см, 0,03 см, 0,02 см, 0,04 см. Среднее квадратическое отклонение для амплитуд соответственно составляет  $\pm 0,024$  см,  $\pm 0,029$  см,  $\pm 0,015$  см,  $\pm 0,043$  см. \* — амплитуда гармоники ниже доверительного 90 % интервала.

обоснованных выводов необходимо понизить уровень шума в классах прилива и повысить разрешение по частоте с помощью гармонического анализа временных рядов с наблюдениями более 50 лет.

В настоящее время получено мало сведений о поведении гармоник третьей степени. Мы произвели анализы многолетних рядов в Амдерме, о. Хейса (обс. Дружная) в Карском море и в пунктах Полярное и Териберка (Баренцево море) (Войнов, 2011). Выборочные результаты гармонического анализа этих рядов приводились частично в (Войнов, 2011) и даны для линий в кластерах суточных приливов  $NO_1(M_1)$  в табл. 5, где  $R$  — величина отношения амплитуд прилива наблюдаемой к статической.

Наибольший интерес из данных табл. 4 и табл. 5 представляет явление аномального усиления лунного суточного прилива  $M_1$  (имеющего наибольший коэффициент в потенциале среди суточных приливов третьей степени) во всех пунктах, с превышением амплитуд в 2,1–4,7 раза в сравнении с теоретическим приливом.

В некоторых районах Мирового океана выявлены аномальные амплитуды суточных приливов третьей степени. О необычно больших амплитудах лунного прилива  $M_1$  с периодом в одни средние лунные сутки в морях Западной Европы впервые сообщил Д. Картрайт (Cartwright, 1975). Это явление обнаружил также М. Эймин (Amin, 1982) при изучении приливов вдоль западного побережья Англии, но длина используемых им рядов уровня не превышала 9 лет.

Выводы Д. Картрайта были подтверждены Р. Рэем (Ray, 2001) по результатам анализа наблюдений за уровнем с длиной в 38 лет в 3 пунктах в Западной Европе. Благодаря очень длительным рядам с отличным качеством данных Рэю удалось выделить суточные приливы с амплитудой в потенциале выше 0,03 см.

Г. Платцмен рассматривал распространение синтеза суточных приливов третьей степени  $M_1$  и  $J_1$  в виде моды с периодом 25,7 ч с участием моды с периодом 23,7 ч и предсказал увеличение амплитуд этих приливов в Северной Атлантике и Арктике (Platzman, 1984).

Как известно, иногда аномальные линии в приливном спектре могут возникать вследствие нелинейных взаимодействий в виде сумм или разностей угловых скоростей (частот). Например, прилив второй степени  $NO_1$  может иметь двойника от взаимодействия  $N_2$  и  $O_1$ , но эмпирические функции отклика (кривые отношения амплитуд волн наблюдаемых к статическим) не подтверждают присутствия этого двойника. Также на частоте прилива третьей степени  $M_1$  может возникать двойник от разности волн  $M_2$  и  $M_1$ . Оценка такого двойника  $MM_1$  была произведена по коэффициенту взаимодействия и фазовому соотношению волны  $MP_1$ , представляющей в основном мелководный прилив (Войнов, 2006). Оказалось, что амплитуда двойника прилива  $MM_1$  не должна превышать 0,07 см.

С учетом этих оценок трудно объяснить явлением локального резонанса причину усиления только прилива  $M_1$ , так как разность угловых скоростей приливов  $NO_1$  и  $M_1$  очень мала (0,0046 град./ч).

Рэй (Ray, 2001) подтвердил расчеты Платцмена и гипотезу Картрайта (Cartwright, 1975) о пространственном соответствии или корреляции приливообразующей силы и нормальных мод колебаний с периодом 25,7 ч (и отчасти 23,7 ч) в Северной Атлантике. Рэй также получил оценки приливов третьей степени для волн  $2Q_1$ ,  $Q_1$ ,  $O_1$ , что позволило ему рассчитать «наилучший» период фундаментальной моды, равный 27–29 ч. В целом наши результаты не противоречат выводам Рэя (Ray, 2001).

Приведенные нами данные позволяют утверждать о неприменимости классической нодальной коррекции к приливу  $M_1$  при анализе и предвычислении этого прилива. Нодальную модуляцию этого прилива рассчитывают или по Дудсону (Doodson, 1928), или по соотношениям потенциала (Foreman, 1977). Как следует из результатов, приведенных в табл. 3–5, также полученных в работах (Amin, 1982; Cartwright, 1975), реальную модуляцию прилива нельзя рассчитывать ни по Дудсону, ни по потенциалу. В крайнем случае лучше считать, что она отсутствует, и принимать условно значение редуцированного множителя  $f$  равным 1 и поправку фазы  $u$  равной нулю.

К сожалению, рамки настоящей работы не позволяют нам рассмотреть некоторые другие проблемы, касающиеся анализа и предвычисления приливов, а именно: проверить правильность расчета стандартной нодальной коррекции всех основных волн приливов, показать применение функций отклика для разделения астрономических и мелководных приливов, выяснить преимущество точного предвычисления с помощью гармоник второй и третьей степени, полученных из наблюдений, по сравнению со стандартным предвычислением и ряд других вопросов теоретического характера.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Близкое соответствие констант основных и второстепенных гармоник (волн) для всех групп в суточном и полусуточном диапазоне приливного потенциала, рассчитанных из двух независимых периодов обработки и гармонического анализа приливов на полярной станции Голомянный (1963–1984 гг. и 1985–2006 гг.), подтверждает надежность и эффективность применяемой методики (способа калибровки приливов) для приведения временных рядов к однородным массивам.

Произведена оценка многолетней изменчивости амплитуд и углов положений (фаз) волн  $M_2$  и  $K_1$  за 44 года (1963–2006 гг.) по временному ходу средних годовых констант волн и средних оценок за 19 лет (26 последовательных результатов). Оценка линейных трендов амплитуд и фаз волн  $M_2$  и  $K_1$  показала, что в обоих способах не выявлен значимый тренд в амплитуде и фазе волны  $M_2$ . Во временном ходе амплитуды волны  $K_1$  присутствует значимый тренд в амплитуде со скоростью  $+0,01$  см/год, что дает увеличение амплитуды этой волны на 9,5 % за весь период наблюдений. Во временном ходе фазы виден неявный отрицательный тренд, который не является значимым. Таким образом оценки тренда главных полусуточной ( $M_2$ ) и суточной ( $K_1$ ) волн не подтверждают гипотезу о сильном влиянии дрейфующего льда в Северном Ледовитом океане (СЛО) на распространение приливной волны (с учетом резкого уменьшения площади льдов в СЛО в последнее десятилетие).

Подтверждено приближенное соответствие констант волн из наблюдений с разложением приливного потенциала для гармоник от второй степени потенциала, которые отделяются от основных волн в группах за период более 9 лет. Однако амплитуды гармоник от третьей степени потенциала существенно превосходят теоретические значения отношений. В особенности это проявляется в аномальном увеличении амплитуды суточного прилива  $M_1$ , имеющего также наибольшую величину по теории среди гармоник третьей степени потенциала. В таких случаях нельзя применять теоретическую нодальную коррекцию.

Для более обоснованных выводов в отношении волн третьей степени потенциала, имеющих очень малую величину, но входящих в расчет теоретической нодальной коррекции, необходимо повысить разрешение по частоте и понизить уровень шума при обработке временных рядов наблюдений с периодом более 38 лет.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Войнов Г.Н.* Приливные явления в Карском море. СПб.: Изд-во Русского географического общества, 1999. 109 с.
- Войнов Г.Н.* Гармонический анализ приливов за нодальный период 18, 61 года (на примере п. Амдерма) // *Метеорология и гидрология*. 2006. № 1. С. 60–75.
- Войнов Г.Н.* Аномальные суточные приливы третьей степени в Баренцевом и Карском морях // Доклады Академии наук. 2011. Т. 438. № 2. С. 271–274.
- Войнов Г.Н.* Способ приведения ежечасных наблюдений за уровнем моря к однородным рядам с помощью калибровки приливов // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2015. № 2 (104). С. 68–80.
- Руководство по морским гидрологическим прогнозам. СПб.: Гидрометеоиздат, 1994. 525 с.
- Спидченко А.Н.* Анализ и предвычисление приливов. Обзор. Сер. Океанология. Обнинск: Инф. Центр. ВНИИГМИ-МЦД, 1978. 43 с.
- Amin M.* The fine resolution of tidal harmonics // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1976. Vol. 44. P. 293–310.
- Amin M.* On analysis and prediction of tides on the west coast of Great Britian // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1982. Vol. 68. P. 57–78.
- Bell C., Vassie J.M., Woodworth P.L.* TASK-tidal analysis software Kit-200. Proudman Oceanogr. Lab. PSMSL. 1996 (version dec. 1999). 19 p.
- Cartwright D.E., Tayler R.J.* New computations of the tide-generating potential // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1971. Vol. 23. № 1. P. 45–74.
- Cartwright D.E.* A subgarmonic lunar tide in the seas off Western Europe // *Nature*. 1975. Vol. 257. № 5524. P. 277–288.
- Crawford W.R.* A technique for quality control and selection of tidal harmonic constituents // *Inter. Hydrogr. Rev.* 1995. Vol. LXXII. №. 2. P. 135–150.
- Corkan R.H.* An annual perturbation in the range of tide // *Proc. of the Royal Society of London*. 1934. Vol. A144. №. 853. P. 537–559.
- Doodson A.T.* Perturbations of harmonic tidal constants // *Proc. of the Royal society of London*. 1924. Vol. A106. № 739. P. 513–526.
- Doodson A.T.* The analysis of tidal observations // *Phil. Trans. Royal society of London*. 1928. Vol. A227. P. 223–279.
- Foreman M.G.G.* Manual of tidal heights analysis and prediction: Pasific Marine Science Report 77-10. Inst. Ocean Sci., Sidney, B.C., Canada. 1977. Reprinted, 1984. 97 p.
- Foreman M.G.G., Cherniawsky J.Y., Ballantine V.A.* Versatile harmonic tidal analysis: improvements and applications // *J. of atmospheric and oceanic technology*. 2009. Vol. 26. P. 806–817.
- Franko A.S., Harari J.* On stability of long series tidal analyses // *Inter. Hydrogr. Rev.* 1993. № 1. P. 77–89.
- Godin G.* The analysis of tides. Liverpool: Liverpool University press, 1972. xxi+264 p.
- Hartman T., Wenzel H.G.* Catalogue HW95 of the tide generating potential // *Bull. Inf. Marees Terestres*. 1995. № 123. P. 9278–9301.
- Le Provost C.* Generation of overtides and compounds tides (review) / *Tidal Hydrodynamics* (Parker B.B. ed). 1991. Wiley. New York. P. 269–295.
- Muller M.* Rapid change in semi-diurnal tides in the North Atlantic // *Geophysical research letters*. 2011. Vol. 38. L11602. doi: 10.1029/2011gl047312.
- Parker B.B.* Tidal analysis and prediction. NOAA Special publication NOS CO-OPS 3. U.S. Department of Commerce. 2007. 378 p.

- Pawlowicz R., Beardsley B., Lentz S.* Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE // *Comput. Geosci.* 2002. Vol. 28. № 8. P. 929–937.
- Platzman G.W.* Normal modes of the World Ocean. Part IV: Synthesis of diurnal and semidiurnal tides // *J. Phys. Oceanogr.* 1984. Vol. 14. P. 1532–1550.
- Ponchaut F., Lyard F., Le Provost C.* An analysis of the tidal signal in the WOCE Sea level dataset // *J. atmosph. And oceanic technol.* 2001. Vol. 18. P. 77–91.
- Ray R.D.* Resonant third-degree diurnal tides in the Seas off Western Europe // *J. Phys. Oceanogr.* 2001. Vol. 31. № 12. P. 3581–3586.
- Rossiter J.R., Lennon G.W.* An intensive analysis of shallow water tides // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1968. Vol. 16. P. 275–293.
- Woodworth P.L.* A survey of recent changes in the main components of the ocean tide // *Continental shelf research.* 2010. Vol. 30. P. 1680–1691.
- Zetler B.D., Cummings R.A.* A harmonic method for predicting shallow-water tides // *J. Marine Res.* 1967. Vol. 25. № 1. P. 103–114.
- Zetler B.D.* A necessary constraint on the use of extended harmonic analysis for tide predictions // *Inter. Hydrogr. Rev.* 1991. Vol. LXVIII. № 2. P. 109–111.

G.N. VOINOV

## THE PRACTICE OF HARMONIC TIDAL ANALYSIS OF LONG SEA LEVEL DATASET

(AS AN EXAMPLE POLAR STATION GOLOMYANNIY, THE KARA SEA)

The features of modified version of the extended harmonic analysis of tides in a least-squares version of the AARI, taking into account the seasonal variability of tides in the annual cycle are evaluated. For example analysis and prediction of the tides in the Kara sea shows its higher accuracy describe the curve of the tide. There is also effective method of calibration of tides in the control, quality assessment and correction of observations at polar stations, bringing the long series in sea level dataset to uniforms series. The results of evaluating seasonal and multiyear variability of the tidal constituents  $M_2$  and  $K_1$  of the p/st. Golomyanniy for the period 1963–2006 yy. are received. The fine resolution (satellites) of the main diurnal and semi-diurnal tides forming a nodal modulation is performed.

*Keywords:* tides, the extended tidal analysis, the seasonal variation in the  $M_2$  and  $K_1$  tide, the trends of the  $M_2$  and  $K_1$  tide, the fine resolution of the main diurnal and semi-diurnal tides, the Kara Sea, p/st. Golomyanniy.