

Г. Н. Войнов

ПРИЛИВЫ В ОБСКОЙ ГУБЕ (КАРСКОЕ МОРЕ) II. ВЛИЯНИЕ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИЛИВОВ

G. N. Voinov

TIDES IN THE GULF OF OB (KARA SEA) II. THE INFLUENCE OF ICE COVER ON THE CHARACTERISTICS OF THE TIDES

Исследовано влияние ледяного покрова на характеристики приливов. Впервые изучена сезонная изменчивость основных суточных и полусуточных волн прилива на всех стационарных постах. Произведена оценка многолетней изменчивости амплитуд и углов положений волны M_2 на всех постах в Обской губе.

Ключевые слова: сезонная изменчивость волн M_2 , S_2 , N_2 , K_1 , O_1 , M_4 . Многолетняя изменчивость волны M_2 . Обская губа (Карское море).

The influence of ice cover on the characteristics of the tide. We first studied seasonal variability of the main diurnal and semi-diurnal tidal waves on all stationary posts. The assessment of long-term variability in the amplitudes and the phase lages of the M_2 constituent at all stations in the Gulf of Ob.

Keywords: the seasonal variation in the M_2 , S_2 , N_2 , K_1 , O_1 , M_4 tides. Multiyear variability of the tidal constituent M_2 . The Gulf of Ob (Kara Sea).

Влияние ледяного покрова на характеристики прилива

В 1-й части работы [1] было показано, что амплитуды и фазы основных волн прилива в сильной степени зависят от ледяного покрова. Ранее в работах [10, 11] была установлена изменчивость характера и других характеристик прилива от ледяного покрова. Полученные в этих работах результаты в общем были ориентировочными, предварительными оценками, и не везде были достоверными. Полученные в нашей работе новые оценки позволяют провести ревизию ранних оценок и взглядов.

Прежде всего уточним общие черты распространения прилива в летний и зимний периоды. В табл. 1 даны оценки времени движения волны прилива для зимы и лета по данным таблиц (1, 5 и 6) и других, полученных в нашей работе данных.

В целом по данным табл. 1 видно, что в августе волна прилива проходит всю Обскую губу за время, большее суток (27,7 ч), а в апреле к Новому Порту волна приходит позже на 4,6 ч. (южнее для зимы нет наблюдений).

Таблица 1

**Время движения прилива волны M_2
для зимнего и летнего периода в пунктах Обской и Тазовской губ**

Пункт	Время, t , ч, лето (август)	Время, t , ч, зима (апрель)	Разность (запаздывание), Δt
Тамбей	4,1	6,3	2,2
Сабетта	4,4	6,5	2,1
Се-Яха	9,0	12,9	3,9*
Яптик-Сале	11,8	14,9	3,1
Каменный	13,8	17,0	3,2
Новый Порт	18,0	22,6	4,6
Вершина губы	27,7	—	—
Антипаюта	4,1	8,7	4,6

Примечание. * — отклонение вызвано местными факторами. Для Антипаюты (Тазовская губа) время отсчитывалось от меридиана слияния с Обской губой.

В Тазовской губе, в Антипаюте, наблюдается такой же сдвиг времени (зима—лето). По всей губе оценку провести пока невозможно вследствие отсутствия наблюдений.

В табл. 2 приведены значения характера прилива, величин отношения амплитуд волн S_2/M_2 и волн M_4/M_2 для лета (август) и зимы (апрель) в пунктах Обской и Тазовской губ.

Таблица 2

**Значения характера прилива, величин отношения амплитуд волн S_2/M_2
и волн M_4/M_2 для лета (август) и зимы (апрель) в пунктах Обской и Тазовской губ**

Пункт/ критерий	$(H_{K1} + H_{O1})/(H_{M2} + H_{S2})^*$		H_{S2}/H_{M2}		H_{M4}/H_{M2}	
	август	апрель	август	апрель	август	апрель
Нгарка	0,178	0,235	0,429	0,380	0,02	0,02
Тамбей	0,136	0,258	0,398	0,380	0,05	0,04
Сабетта	0,134	0,202	0,437	0,397	0,08	0,04
Тадибеяха	0,138	0,402	0,380	0,352	0,05	0,01
Се-Яха	0,148	0,198	0,427	0,328	0,125	0,06
Котельникова	0,186	0,361	0,379	(0,435)	0,106	0,04
Каменный	0,176	0,213	0,369	0,391	0,138	0,09
Новый Порт	0,184	0,536	0,355	0,533	0,127	0,08
Антипаюта	0,128	0,236	0,385	0,359	0,152	0,04

Примечание. * — при значении отношения $> 0,25$ и $< 1,50$ прилив смешанный, в основном полусуточный. В скобках — сомнительные значения.

В качестве критерия характера (формы) прилива использован критерий Куртье, так как критерий Дуванина в силу неполноты (нет волны S_2) для наших данных дает в ряде случаев неверные определения формы прилива. По данным этой таблицы видно,

что во всех пунктах в зимний период значение критерия возрастает, а в четырех пунктах (Тамбей, Тадибеяха, Котельникова, Новый Порт) характер прилива меняется: в летний период прилив носит полусуточный характер, а в зимний период происходит переход к смешанному виду с преобладанием полусуточного характера. Этот вывод является новым, не выявленным ранее фактом.

Во временном ходе приливных колебаний уровня наиболее выражено фазовое неравенство приливов. Величина отношения амплитуд волн H_{S_2}/H_{M_2} , отвечающая за ход фазового неравенства прилива (цикл «сизигия – квадратура»), также существенно меняется между летним и зимним периодами. В основном в зимний период (в апреле) величина отношения уменьшается. Это означает, что изменчивость прилива в цикле «сизигия – квадратура» становится менее выраженной в зимний период по сравнению с летним. Исключение составляют Каменный и Новый Порт, в которых фазовое неравенство больше выражено в зимний период.

Возраст полусуточного прилива в северном и среднем участках составляет 3 сут., поэтому здесь сизигийные приливы достигают максимального развития на третьи сутки после астрономической сизигии (полнолуние и новолуние). На южном участке и в Тазовской губе возраст полусуточного прилива возрастает до 3,5–4,0 сут. Величина квадратурных приливов в 2,3–2,5 раза меньше величины сизигийных приливов.

Параллактическое неравенство, связанное с моментами прохождения Луны через перигей или апогей, почти не выражено, так как амплитуда волны N_2 по величине гораздо меньше амплитуды волны S_2 .

В связи с тем, что возраст суточного прилива в основном достигает 5–6 дней (иногда становится отрицательным), тропические приливы, соответственно, будут запаздывать на это значение от определенных астрономических моментов склонений Луны. По существу равноденственные приливы (минимум развития суточных приливов) будут наблюдаться в дни максимальных значений склонений Луны, а тропические приливы (наиболее сильные суточные приливы) — в дни с нулевым ее склонением.

Для западного побережья Обской губы в зимний период заметным становится тропическое неравенство приливов. При нулевых значениях склонения Луны и в квадратуру суточное неравенство становится таким, что приливы на п/ст Тамбей приобретают в основном суточный характер развития. У восточного побережья Обской губы такого заметного перехода к суточным приливам не происходит.

Наконец, величина отношения мелководных волн H_{M_4}/H_{M_2} демонстрирует поведение кривой прилива и отвечает за продолжительность времени падения и времени роста прилива. Наиболее выражены мелководные волны в летний период, где их величина для основных волн M_4 и MS_4 достигает около 3 см каждая (рис. 1). В зимний период наблюдается очень сильное гашение амплитуд мелководных волн, и их амплитуда для отдельной волны не превышает 0,5 см. Такое поведение отражается на значениях критерия H_{M_4}/H_{M_2} (см. табл. 2), который в зимний период более чем на порядок меньше, чем в летний период.

Мелководный прилив с периодом 4 ч не играет заметной роли в описании кривой прилива, так как по величине волна M_6 даже в летний период не превышает 0,5–0,6 см. В зимний период его амплитуда падает в разы, и он практически полностью затухает.

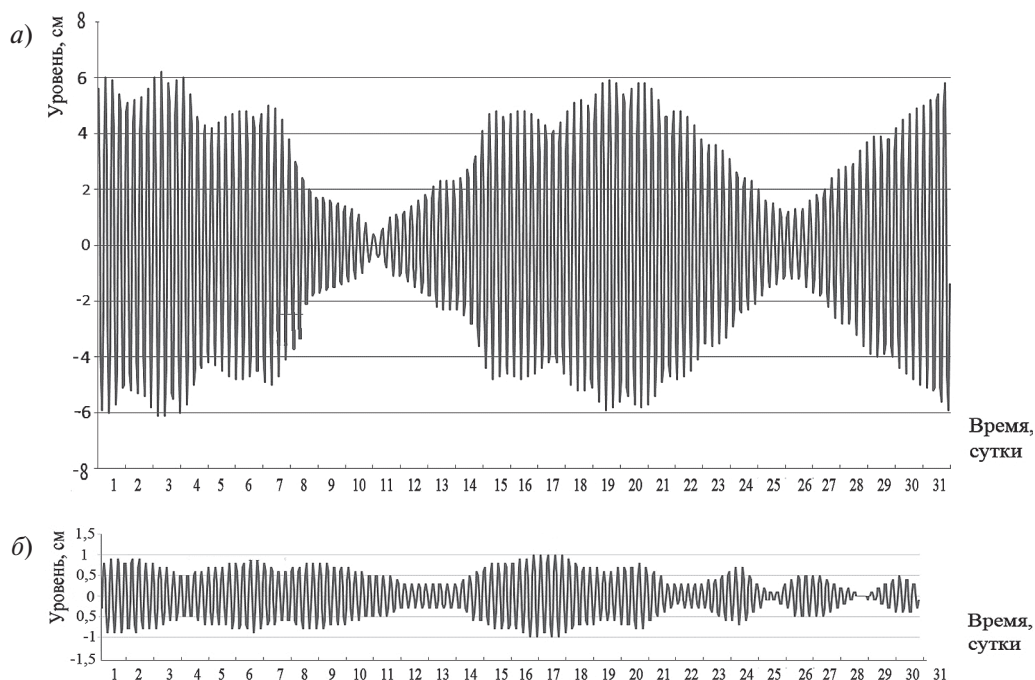


Рис. 1. Временной ход кривых прилива с периодом около 6 ч ($1/4$ -суточный класс) в Се-Яхе в 1977 г. в августе (а) и апреле (б). Выделены полосовым нерекursивным фильтром, рассчитанным нами по идеальному фильтру с окном Кайзера, с $M(0) = 61$

В целом наглядное представление о временном ходе высот приливных колебаний уровня моря в районе п/ст Тамбей и п/ст 60 лет ВЛКСМ в летний период (август) и в зимний период (апрель) можно получить из рис. 2.

Таким образом, наши данные подтверждают теоретические положения о влиянии ледяного покрова на спектр волн прилива в зависимости от периода волны [12, 13]. Волны под ледяным покровом гасятся тем сильнее, чем короче период (длина) волны. В наименьшей степени трансформируются суточные волны, и в наибольшей степени — мелководные волны. Это касается всех характеристик или параметров прилива: распространения амплитуд и фаз конкретной волны прилива, ее характера и всех производных величин.

Сезонная изменчивость прилива по наблюдениям

В Обской и Тазовской губах наблюдается самая большая в Карском море изменчивость амплитуд и фаз основных полусуточных волн M_2 , S_2 и N_2 , а также основных суточных волн K_1 и O_1 в годовом цикле. Константы этих волн (амплитуды и фазы) настолько резко изменяются от месяца к месяцу, что было бы неверно определять их как средние значения даже за любые два соседние месяца года.

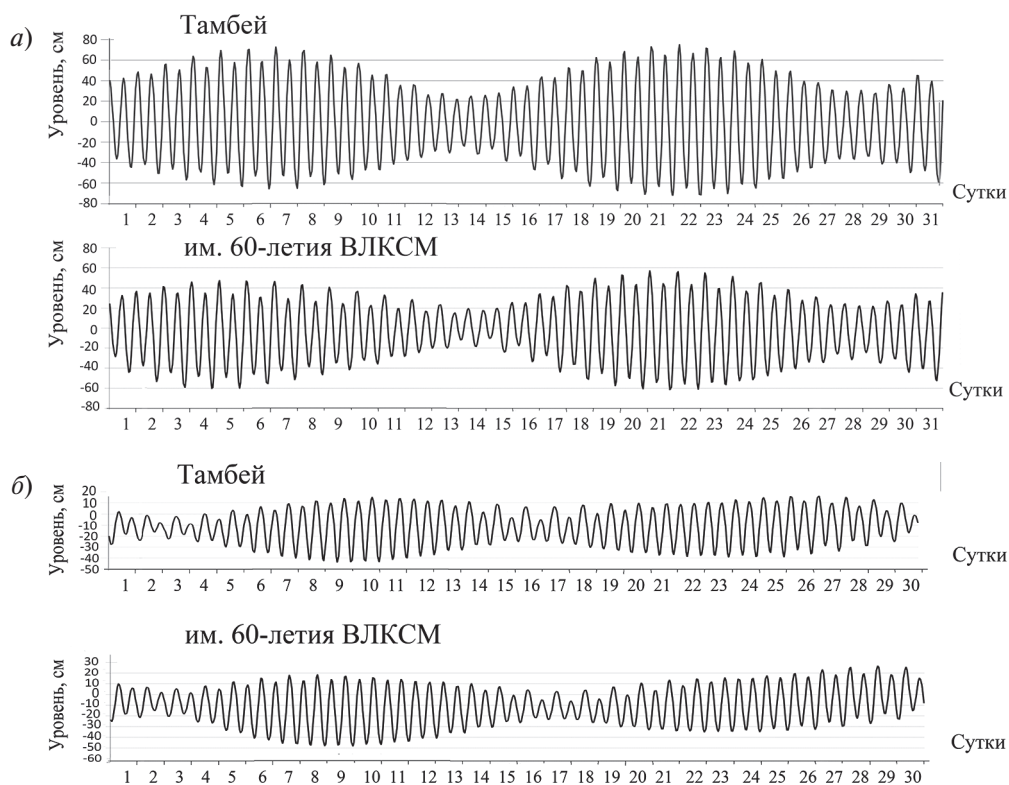


Рис. 2. Временной ход приливных колебаний уровня моря в районе п/ст Тамбей и п/ст 60 лет ВЛКСМ в августе (а) и апреле (б) 2016 г.

Поэтому применявшийся ранее прием определения гармонических постоянных волн прилива в среднем за навигационный (летний) или зимний периоды не дает хороших результатов при расчете приливов [10, 11]. В остаточных рядах при подобном подходе будет присутствовать приливной остаток, вызванный не ошибками наблюдений, а изменчивостью констант приливов внутри периода расчета. Для адекватного наблюдениям описания прилива в годовом цикле нами введены в гармонический анализ сложные волны, отвечающие за годовую, полугодовую и третьегодовую изменчивость амплитуды наблюдаемого прилива в годовом цикле [2, 3, 6].

Сезонная изменчивость волны M_2

Результаты гармонического анализа месячных серий наблюдений за уровнем моря позволили выявить среднюю сезонную изменчивость гармонических постоянных основных волн прилива. Для получения устойчивых оценок этой изменчивости необходимы регулярные многолетние и, предпочтительно, ежечасные наблюдения за уровнем моря. Такие наблюдения имеются только на п/ст Тадибеяха, Сеяха и Антипаюта [1].

На других п/ст: Нгарка, Тамбей, Каменный, Новый Порт — приходится использовать весь имеющийся массив наблюдений за разные годы, где преобладают данные летнего периода. Поэтому здесь результаты анализа для летнего периода гораздо более надежны, чем для зимнего периода.

Сезонный ход амплитуды представлен также в виде относительного изменения (dH) ее средней величины (H) как $dH = (H_m - H_r) / H_r$ (в процентах), где H с индексом «м» — среднее векторное значение из всех серий за данный месяц, а с индексом «г» — 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 $dg = (g_m - g_r)$. Среднее квадратическое отклонение (с.к.о. или σ) для амплитуды и фазы рассчитывались по формулам ошибок векторного среднего. Для этого средняя и индивидуальные месячные значения амплитуды и фазы преобразовывались в компоненты $H \cos g$ и $H \sin g$. По ним рассчитывалась стандартная ошибка для амплитуды σ_H , и затем для фазы σ_g :

$$\sigma_H = \left[\sigma_A^2 (\cos g)^2 + \sigma_B^2 (\sin g)^2 \right]^{1/2}, \quad \sigma_g = \sigma_H / H \quad (\text{в рад}), \quad (1)$$

где σ_A — с.к.о. для компоненты $H \cos g$, а σ_B — с.к.о. для компоненты $H \sin g$;

$$H = \left\{ (H \cos g)^2 + (H \sin g)^2 \right\}^{-1/2}, \quad \text{tg}(g) = H \sin g / H \cos g.$$

По формуле (1) были получены средние месячные оценки и их изменения от месяца к месяцу в годовом цикле. Эти оценки для волны M_2 в пункте северного участка Обской губы представлены в табл. 3, в пунктах среднего участка Обской губы и Тазовской губе — в табл. 4, и для южного участка Обской губы — в табл. 5.

Таблица 3

Оценки средних значений амплитуд (H) и фаз (g) волны M_2
и их сезонный ход на п/ст Тамбей

Месяц	Тамбей средние оценки		Тамбей сезонный ход	
	H , см	g , град	DH , %	dg , град
I	24,32	72,09	—	20,8
II	21,79	83,06	—	31,8
III	17,82	89,05	—	37,8
IV	18,04	93,82	—	42,5
V	21,78	88,64	—	37,3
VI	28,59	62,18	3,2	10,9
VII	42,79	35,48	54,4	15,8
VIII	46,94	28,06	69,4	23,2
IX	43,90	29,97	58,5	21,3
X	37,33	35,16	34,7	16,1
XI	31,46	40,36	13,5	10,9
XII	26,50	52,68	—	1,4

Таблица 4

**Оценки средних значений амплитуд (H) и фаз (g) волны M_2
и их сезонный ход на п/ст Сеяха и п/ст Антипаюта**

Месяц	Сеяха средние оценки		Сеяха сезонный ход		Антипаюта средние оценки		Антипаюта сезонный ход	
	H , см	g , град	dH , %	dg , град	H , см	g , град	dH , %	dg , град
I	7,60	255,93	—	53,7	2,31	137,18	—	74,9
II	6,09	268,71	34,1	66,5	2,27	148,88	—	86,6
III	5,59	271,80	—	69,6	2,22	157,17	—	94,9
IV	4,45	284,84	—	82,6	2,12	163,29	—	101,0
V	4,36	293,35	—	91,1	2,21	166,89	—	104,6
VI	6,69	218,16	—	15,9	1,73	87,74	—	25,4
VII	19,68	180,89	112,9	—	9,43	33,79	184,8	—
VIII	24,89	171,40	169,3	—	11,34	30,13	242,4	—
IX	22,31	175,68	141,5	—	9,38	31,93	183,2	—
X	16,76	190,77	81,4	—	7,01	59,15	111,6	—
XI	12,06	206,98	30,5	4,8	4,16	88,90	25,5	26,6
XII	8,40	235,92	—	33,7	2,85	110,61	—	48,3

Таблица 5

**Оценки средних значений амплитуд (H) и фаз (g) волны M_2
и их сезонный ход на п/ст Каменный**

Месяц	Каменный средние оценки		Каменный сезонный ход	
	H , см	g , град	dH , %	dg , град
I	5,15	28,33	—	47,5
II	3,50	34,31	—	53,5
III	3,12	49,12	—	68,3
IV	3,91	44,56	—	63,7
V	4,86	37,06	—	56,2
VI	3,41	30,19	—	49,3
VII	13,06	335,97	92,8	4,9
VIII	19,28	310,64	184,8	30,2
IX	17,46	314,64	157,7	26,2
X	15,04	318,54	122,0	22,3
XI	6,53	342,07	—	1,2
XII	4,95	45,51	—	64,7

Согласно классификации кривых сезонного хода констант полусуточных волн прилива в арктических морях [3], в Обской и Тазовской губах наблюдается классический 1-ый тип с выраженным максимумом амплитуды в августе и минимумом фазы в этот же месяц (табл. 3–5).

Сезонный ход кривых амплитуд и фаз волн M_2 , S_2 и N_2 для четырех пунктов представлен на рис. 3. Общей чертой результатов, приведенных в таблицах 3–5 и на рис. 3, является рост максимальных значений амплитуд всех волн в августе и величины размаха изменения фазы за год от северного к южному участку, где в Каменном эти величины соответственно достигают около 185 % и 98°. Аномальное увеличение величины размаха фазы за год для Сеяхи (122°) вызвано, по-видимому, влиянием местных условий.

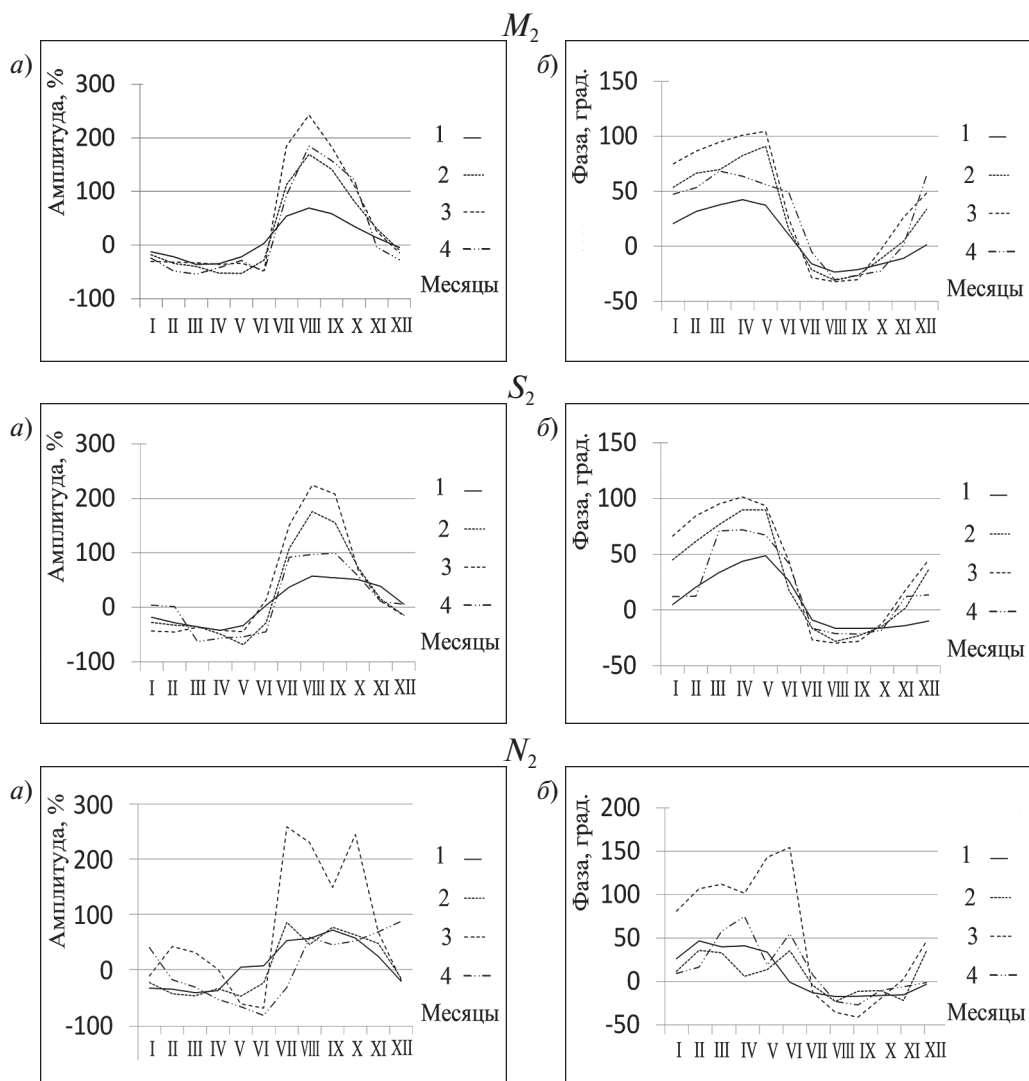


Рис. 3. Средний сезонный ход относительной амплитуды, dH (а) и разности фаз, dg (б), по средним векторным оценкам констант волн M_2 , S_2 и N_2 в Тамбее (1), Сеяхе (2), Антипауле (3) и Каменном (4)

В годовом цикле амплитуда волны M_2 в январе – мае в разы меньше, чем в августе – сентябре. Изменение фазы (угла положения) в течение года может достигать 137° (см. табл. 4, Антипаюта). Отсюда понятно, что предвычисление прилива на весь год по константам на август – сентябрь, как это делается в отечественных (и зарубежных – Tide Tables) Таблицах приливов, не может обеспечить приемлемый результат. Такие расчеты будут описывать прилив адекватно только в августе – сентябре, но вне этого периода, например в июле и октябре, кривая прилива будет рассчитываться с ошибкой, а в остальные месяцы года – просто неверно.

Сезонный ход амплитуды и фазы волн полусуточных приливов S_2 и N_2 в общих чертах соответствует таковому у волны M_2 (см. рис. 3). В большей степени подобие кривых хода амплитуды и фазы и сезонного хода их изменений в годовом цикле наблюдается для волны S_2 и в меньшей степени – для волны N_2 . В целом максимум амплитуд и их относительных значений отмечается в августе, и также минимум фаз и их отклонений от средних годовых значений наступает в этот же месяц. Причина имеющихся расхождений, на наш взгляд, обусловлена случайными отклонениями и большим разбросом вследствие малых значений амплитуд этих приливов, в особенности в зимний период.

Сезонная изменчивость суточных волн K_1 и O_1

Кривые сезонного хода значений относительных амплитуд и значений отклонений фаз от средних в годовом цикле волн K_1 и O_1 представлены на рис. 4. Во-первых, не наблюдается такой же однозначности результатов, как для полусуточных волн. Это становится понятным, если принять во внимание величины амплитуд волн этих приливов (см. рис. 4) и величины разброса средних оценок за каждый месяц. Для вывода устойчивых оценок волн с амплитудой 1–3 см требуются многолетние наблюдения не менее, чем за 10–15 лет [3, 7].

Но за отдельными исключениями максимальные относительные величины амплитуд волны K_1 наблюдаются в сентябре, а для волны O_1 – в июле – октябре. В отклонениях фаз присутствует минимум в августе, но не самый выраженный. Причиной такого расхождения может быть большой разброс в средних месячных значениях, обусловленный малыми величинами этих приливов. В этих условиях для надежных оценок требуются более продолжительные ряды наблюдений.

Константы волн, описывающие сезонный ход суточных и полусуточных волн прилива

Астрономические аргументы второстепенных волн, модулирующих основные полусуточные и суточные волны, даны нами в ряде работ [2, 3, 6]. В них же обсуждаются физические механизмы сезонной изменчивости прилива. В настоящее время эти проблемы стали одними из главных в полярной океанологии. Здесь приведем сравнительные оценки гармонических постоянных сложных волн, полученные нами при гармоническом анализе многолетних временных рядов уровня моря (табл. 6).

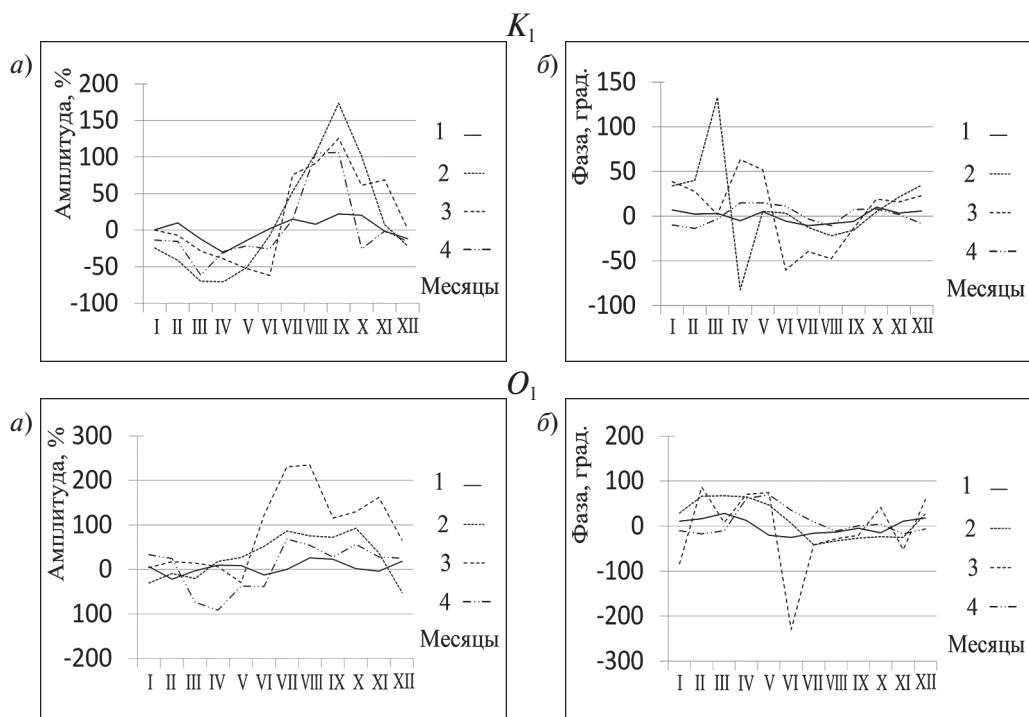


Рис. 4. Средний сезонный ход амплитуды, dH (а), и фазы, dg (б), волн K_1 и O_1 в Тамбее (1), Сеяхе (2), Антипаюте (3) и Каменном (4)

Таблица 6

Сравнительные оценки констант сложных волн, модулирующих волну M_2 в годовом цикле

Пункт/ параметр	Отношение амплитуд сложных волн к амплитуде $M_2(H)$				Разность фаз с волной $M_2(g)$			
	MTS_2/H	MST_2/H	OP_2/H	MKS_2/H	MTS_2-g	MST_2-g	OP_2-g	MKS_2-g
Нгарка	0,274	0,407	0,057	0,075	53	195	143	208
Тамбей	0,368	0,394	0,063	0,144	62	201	206	242
Тадибейха	0,467	0,513	0,122	0,210	80	205	202	252
Сеяха	0,809	0,607	0,239	0,326	79	204	196	245
Каменный	0,624	0,639	0,279	0,314	85	213	188	271
Новый Порт	0,906	0,886	0,769	0,792	126	219	252	274
Антипаюта	1,052	0,770	0,448	0,433	87	200	198	234

Поясним, что пара волн MTS_2 и MST_2 описывает годовой ход изменчивости амплитуды и фазы волны M_2 в годовом цикле, а пара волн OP_2 и MKS_2 отвечает за их полугодовую изменчивость. Кроме этого, нами используются волны, модулирующие третьегодовой сезонный ход волны M_2 , но в силу незначительности этой периодичности в Обской губе здесь мы их не рассматриваем.

Величина отношения амплитуд сложных волн к амплитуде волны M_2 возрастает к вершине Обской губы, что означает возрастание размаха сезонного хода. В пунктах Новый Порт и Антипаюта амплитуда этих волн практически одинакова с амплитудой волны M_2 . Этот факт является отражением аномального хода прилива в этих пунктах в течение года. Здесь в зимний период в январе – мае величина приливных колебаний уровня не превышает нескольких сантиметров.

Значения разностей фаз (углов положения) между сложными волнами и волной M_2 , как видно из данных табл. 6, мало меняются вдоль Обской губы. За исключением Нового Порта, эти разности остаются близки к определенным постоянным значениям с некоторым разбросом. Очевидно, это связано с характером временного сезонного хода кривых амплитуд и фаз волны M_2 в годовом цикле, который подобен для всех пунктов (см. рис. 3).

Волны MTS_2 и MST_2 могут быть связаны с гидрометеорологическими факторами, но распространяются в море, как обычная волна прилива и по фазе высоко когерентны с приливом M_2 (рис. 5). Величина амплитуд волн MTS_2 и MST_2 также следует характеру изменения амплитуды волны M_2 вдоль Обской губы.

Межгодовая изменчивость гармоник MTS_2 и MST_2 , по данным результатов 12-ти годовых анализов в Тадибеяхе, невелика (табл. 7). Среднее квадратическое отклонение от средних векторных значений по амплитуде равно $\pm 0,5$ см, а по фазе составляет 4...5 (меньшая величина для MST_2), что лишь немного превышает разброс в межгодовой изменчивости гармоник S_2 и T_2 . Разброс констант волн MTS_2 и MST_2 , помимо метеорологических и других влияний, также зависит от качества наблюдений за уровнем моря.

Таблица 7

Среднее квадратическое отклонение средних векторных оценок амплитуд (σ_H) и фаз (σ_g) волн в Тадибеяхе, по данным годовых анализов за 1974–1988 гг.

Волна	σ_H , см	σ_g , град
M_2	0,36	1,74
S_2	0,20	2,32
T_2	0,23	6,31
MTS_2	0,51	5,34
MST_2	0,43	4,07
S_a	7,12	53,25

Для выявления взаимосвязи между межгодовыми колебаниями констант волн S_a , M_2 , S_2 , MTS_2 и MST_2 были определены парные коэффициенты корреляций между их амплитудами и углами положений (табл. 8).

Анализ данных табл. 8 не позволяет утвердительно говорить о какой-либо значимой взаимосвязи в межгодовом ходе констант пар волн S_a и MTS_2 , S_a и MST_2 , а также S_2 и M_2 . Поэтому наличие явного нелинейного взаимодействия между волнами S_a и M_2 в качестве механизма образования сложных волн, модулирующих прилив M_2 , не подтверждается. Изменение среднего уровня моря, вызываемое совместным влиянием волн S_a и S_{sa} , не имеет выраженной связи с сезонными возмущениями волны

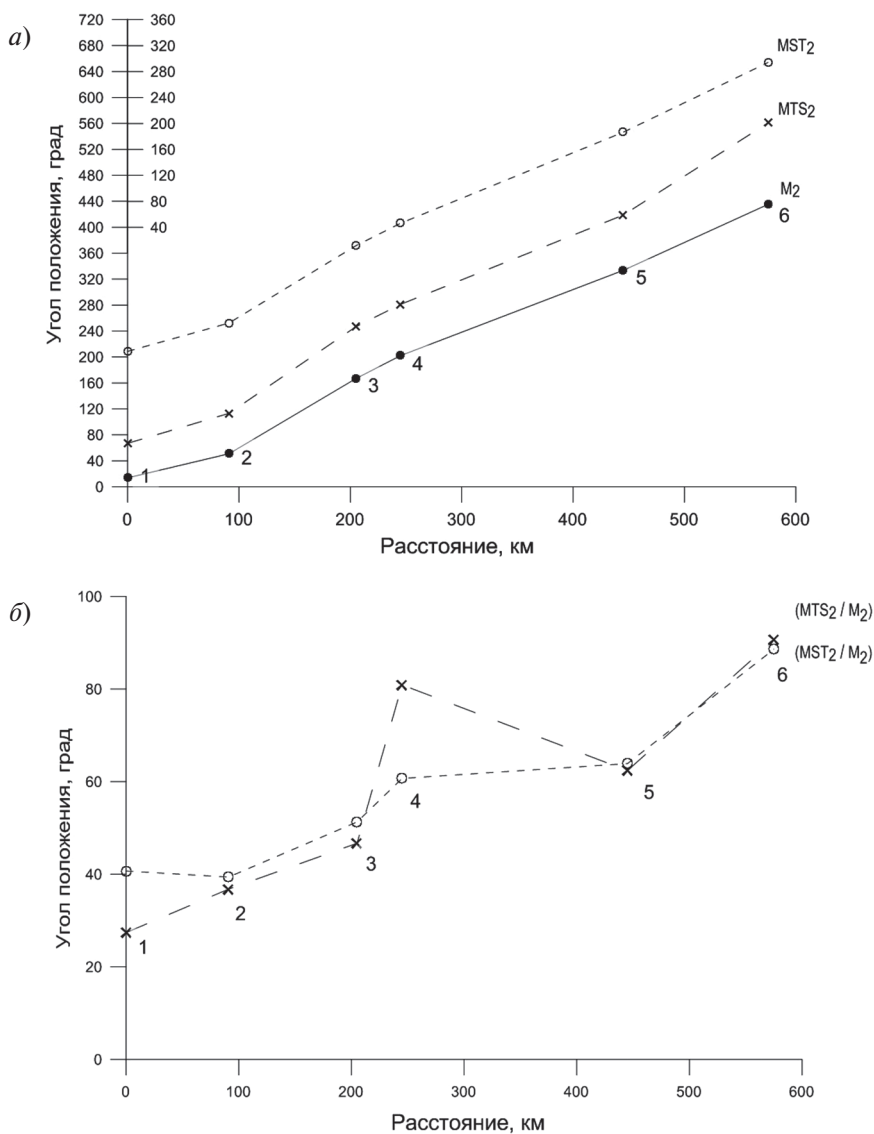


Рис. 5. Распределение фаз волн MTS_2 (штрих-линия), MST_2 (пунктирная линия), M_2 (сплошная линия) и отношений амплитуд MTS_2 к M_2 (штрих-линия) и MST_2 к M_2 (пунктирная линия) вдоль Обской губы: 1 — Нгарка; 2 — Тамбей; 3 — Тадибеяха; 4 — Сеяха; 5 — Каменный; 6 — Новый Порт

M_2 , соответственно, от пар волн MTS_2 и MST_2 и OP_2 и MKS_2 . Экстремальные значения среднего уровня, обусловленные волнами S_a и S_{sa} , не совпадают с экстремумами возмущений волны M_2 от соответствующих пар волн.

Таблица 8

**Коэффициенты регрессии между амплитудами и углами положений волн
по результатам анализа годовых серий в Тадибеяге**

Волна	S_a	M_2	S_2	MTS_2	MST_2
S_a	1,00	0,07	0,02	0,02	0,03
M_2	0,09	1,00	<u>0,52</u>	<u>0,24</u>	0,03
S_2	0,06	<u>0,42</u>	1,00	0,00	0,00
MTS_2	0,02	<u>0,53</u>	0,00	1,00	0,11
MST_2	0,01	<u>0,28</u>		<u>0,24</u>	1,00

Примечание. В верхней треугольной матрице даны коэффициенты для амплитуд, а в нижней треугольной матрице — для углов положений. Выделены значимые значения коэффициентов.

Значимые коэффициенты корреляции (везде оцененные по 95 % доверительному интервалу) проявляются, как и следовало ожидать, между волнами M_2 и MST_2 и составляют значение 0,53 и для амплитуды, и для фазы. Волна MTS_2 в Обской губе по величине в целом немного меньше волны MST_2 и выделяется при анализе годовых рядов с большей ошибкой. Но коэффициенты корреляции между волнами между M_2 и MTS_2 являются значимыми. Выражена связь между волнами M_2 и S_2 . Эти результаты обосновывают реальное существование нелинейного взаимодействия в виде $M_2 + T_2 - S_2(MTS_2)$ и $M_2 + S_2 - T_2(MST_2)$. То же касается пар волн $OP_2(MSK_2)$ и MKS_2 .

Расчет возмущения волны M_2 за счет годовой и полугодовой модуляции от сложных волн

Выше было показано, что сезонный ход волны M_2 описывается с помощью четырех сложных волн. Для исследования физических механизмов этого хода приходится принимать во внимание амплитуды и фазы каждой из этих волн в отдельности и/или во взаимосвязи. Альтернативное описание сезонного хода волны прилива позволяет упростить эту задачу. Сезонный ход амплитуды и фазы основной волны можно представить также в виде изменения скалярной величины возмущения этой волны от линейной комбинации 2-х, 4-х и более гармоник.

Впервые такой подход использовался в работе Р. Коркана [14], но только для описания годовой модуляции волны M_2 под действием волн MA_2 и MB_2 (в нашей работе это волны MTS_2 и MST_2). Формулы, предложенные Р. Корканом, не всегда дают правильный результат, и более строгий учет модуляции дан в работе [15], но только для двух волн в виде MA_2 и MB_2 .

Ниже дано аналитическое описание модуляции волны M_2 для набора волн. Как известно, общая формула предвычисления любой волны прилива (пренебрегая нодальными факторами, то есть $f=1$, $u=0$ для всех волн) будет

$$H_i \cos(q_i t + V_i - g_i). \quad (2)$$

Здесь H_i , g_i — гармонические постоянные волны; q_i — угловая скорость; V_i — астрономический аргумент на начало расчета.

Суммарное колебание во времени группы этой волны можно представить в виде сложения высоты прилива от волны M_2 и от группы смежных волн, вызывающих ее годовую и полугодовую модуляцию:

$$h(t) = H_{M_2} \cos(q_{M_2}t + V_{M_2} - g_{M_2}) + S(t), \quad (3)$$

где суммарная величина модуляционной волны (или возмущение) будет

$$S(t) = \sum H_i \cos(dq_i t + dV_i + dg_i), \quad (4)$$

где H_i — амплитуда модуляционной волны; член dq_i представляет разность угловых скоростей между модуляционной и основной волной, член dV_i есть разность их аргументов, а dg_i есть разность фаз (углов положений).

Значения угловых скоростей основных и второстепенных волн и выражения для расчета астрономических аргументов даны в работе [7].

Общую величину возмущения волны M_2 от совместного влияния волн MTS_2 и MST_2 нетрудно определить по значению огибающей суммарного предвычисленного колебания всех трех волн в течение года. Разность значений огибающей суммарного колебания и величины амплитуды волны M_2 как раз и является искомой величиной возмущения, которую рассматривал Р. Коркан [14].

В табл. 9 приведены значения возмущения $S(t)$ волны M_2 , рассчитанные по выражению (4) для пяти пунктов Обской губы.

Таблица 9

Значения возмущения волны M_2 (в см) в пунктах
Тамбей, Тадибеяха, Сеяха, Каменный и Новый Порт

Месяц\пункт	Тамбей	Тадибеяха	Сеяха	Каменный	Новый Порт
I	−4,7	−4,3	−3,8	−4,1	−1,8
II	−8,8	−5,8	−5,9	−4,1	−1,0
III	−13,4	−7,8	−8,8	−5,1	−3,5
IV	−15,0	−8,5	−10,5	−6,4	−6,6
V	−10,1	−5,7	−8,0	−5,6	−5,7
VI	0,4	0,7	−1,0	−1,3	0,5
VII	11,2	7,6	7,3	5,1	8,1
VIII	16,5	11,3	12,4	9,7	11,3
IX	14,4	9,8	11,6	9,6	7,5
X	8,1	5,0	6,7	5,2	0,3
XI	2,1	0,1	1,3	−0,1	−4,7
XII	−1,6	−2,9	−2,0	−3,4	−4,6

Из данных табл. 9 видно, что величина возмущения в пунктах правильно отражает полученные выше результаты сезонного хода волны M_2 . Подобная форма представления сезонного хода удобна тем, что заменяет четыре второстепенные волны, имеющие

каждая свою амплитуду и фазу, на одну скалярную величину. Она предпочтительна при отыскании регрессионных связей, раскрывающих физические причины сезонной изменчивости основных волн приливов. Эти причины до настоящего времени до конца не раскрыты в арктических морях России.

На первый взгляд, кажется странным, что максимальный размах значений возмущения наблюдается не в пунктах с наибольшим сезонным ходом, например в Каменном и Новом Порту, а в Тамбее. Однако это объясняется большей величиной амплитуды волны M_2 , что и приводит при расчете к большим абсолютным значениям возмущения. Если посмотреть на значения относительных величин возмущения в сравнении со средней годовой амплитудой, то ситуация полностью совпадает с оценками сезонного хода, приведенных ранее в табл. 3–5.

Сезонная изменчивость волны M_4

Этот природный феномен был открыт и изложен нами в 2007 г. по наблюдениям в Баренцевом и Белом морях [5]. В Обской и Тазовской губах величина мелководных волн гораздо меньше наблюдаемых в этих морях, но более резко выражена изменчивость амплитуд и фаз волн в годовом цикле. Вследствие этого, как показано выше, при использовании стандартных программ гармонического анализа приливов необходим раздельный помесечный расчет приливов в годовом цикле.

В табл. 10 приведены оценки средних значений амплитуд и фаз волн M_4 и MS_4 в годовом цикле, выведенные по наблюдениям в Сеяхе за 1977–1988 гг.

Таблица 10

Оценки средних значений амплитуд (H) и фаз (g) волны M_4 и MS_4
и их сезонный ход на п/ст Сеяха

Месяц	M_4 средние оценки		M_4 сезонный ход		MS_4 средние оценки		MS_4 сезонный ход	
	H , см	g , град	dH , %	dg , град	H , см	G , град	dH , %	dg , град
I	0,40	72,3	—	145,6	0,21	132,7	—	122,7
II	0,27	93,8	61,1	167,1	0,24	180,6	—	170,7
III	0,20	124,9	—	198,2	0,33	212,5	—	202,5
IV	0,40	153,8	—	227,1	0,39	202,6	—	192,6
V	0,50	114,5	—	187,8	0,34	189,4	—	179,5
VI	0,49	8,2	—	81,5	0,29	49,3	—	39,3
VII	2,33	282,3	241,9	—	1,51	15,1	122,0	5,1
VIII	3,28	267,1	381,1	—	2,74	4,0	302,3	—
IX	2,43	270,7	256,2	—	2,84	357,6	316,6	—
X	1,59	309,8	133,4	23,0	1,72	10,6	153,0	0,6
XI	0,86	346,7	25,8	60,0	0,61	33,3	—	23,3
XII	0,24	12,4	—	85,6	0,31	94,8	—	84,9

Как видно из данных этой таблицы, в среднем в период с декабря по июнь амплитуда мелководных волн настолько мала, что на практике нет необходимости ее

учитывать. Однако в июле – октябре волны M_4 и MS_4 играют значимую роль в описании кривой прилива. Также понятно, что нельзя применять в расчете только те средние оценки этих волн, которые могут быть получены в результате стандартной обработки годовых серий. При этом мы не сможем правильно описать кривую сезонного хода мелководных волн. Но если включить в расчет новые мелководные волны, описывающие сезонную изменчивость основных мелководных волн M_4 и MS_4 , то получим в результате правильное изменение амплитуд и фаз этих волн в годовом цикле. Экстремальные значения в амплитуде и фазе (см. табл. 10) наблюдаются в одинаковые месяцы. Сезонная изменчивость амплитуд волны имеет местные особенности в каждом пункте, но в целом максимумы ее наступают в августе – сентябре.

Ниже, в табл. 11, даны астрономические сведения для формирования и расчета новых сложных волн.

Таблица 11

**Параметры дополнительных мелководных волн, модулирующих
основные волны в группах при анализе месячных серий наблюдений**

Волна	Комбинация основных волн	Угловая скорость, град/час	Период отделения от основной волны, сут
Группа волны M_4			
$*2MTK_4$	$M_2 + M_2 + T_2 - K_2$	57,8450044	121,7
$2MSK_4$	$M_2 + M_2 + S_2 - K_2$	57,8860711	182,6
$*2MTS_4$	$M_2 + M_2 + T_2 - S_2$	57,9271417	365,2
$*2MST_4$	$M_2 + M_2 + S_2 - T_2$	58,0092751	365,2
$2MKS_4$	$M_2 + M_2 + K_2 - S_2$	58,0503457	182,6
$*2MKT_4$	$M_2 + M_2 + K_2 - T_2$	58,0914124	121,7
Группа волны MS_4			
$*2SMK_4$	$S_2 + S_2 + M_2 - K_2$	58,9019669	182,6
$*MT_4$	$M_2 + T_2$	58,9430375	365,2
$*MR_4$	$M_2 + R_2$	59,0251709	365,2
MK_4	$M_2 + K_2$	59,0662415	182,6

Примечание. * — Новые сложные волны.

Наиболее выражены величины новых мелководных волн в среднем и южном участках западного берега Обской губы (Сеяха, Каменный). На станциях восточного берега Обской губы (Нгарка, Тадибеяха, Ямбург) значения амплитуд новых волн даже в летний период не выше 0,5 см.

В сезонном ходе констант волн M_4 и MS_4 преобладает годовая периодичность (табл. 12). Это колебание формируется, соответственно, парами волн $2MTS_4$ и $2MST_4$, MT_4 и MR_4 (табл. 11). Наибольшие значения амплитуд этих волн наблюдаются в Сеяхе и в Каменном.

Полугодовая изменчивость в ходе амплитуд и фаз волн M_4 и MS_4 менее выражена, но ее также необходимо учитывать.

Таблица 12

Амплитуды (H) и фазы (g) новых сложных волн в группах волн M_4 и MS_4 по наблюдениям в Сеяхе за 1977–1988 гг.

Группа волн M_4			Группа волн MS_4		
Волна	H , см	g , град	Волна	H , см	g , град
$2MSK_4$	0,43	316	$2SMK_4$	0,29	34
$2MTS_4$	0,91	44	MT_4	0,80	121
M_4	0,69	286	MS_4	0,70	10
$2MST_4$	0,64	154	MR_4	0,71	70
$2MKS_4$	0,49	190	MK_4	0,41	300
$2MKT_4$	0,38	13			

Включение в модель прилива новых сложных волн позволяет точно воспроизвести наблюдаемую сезонную изменчивость мелководных волн, что совместно с волнами, модулирующими полусуточные и суточные приливы, дает адекватное наблюдениям изменение прилива в годовом цикле (рис. 6).

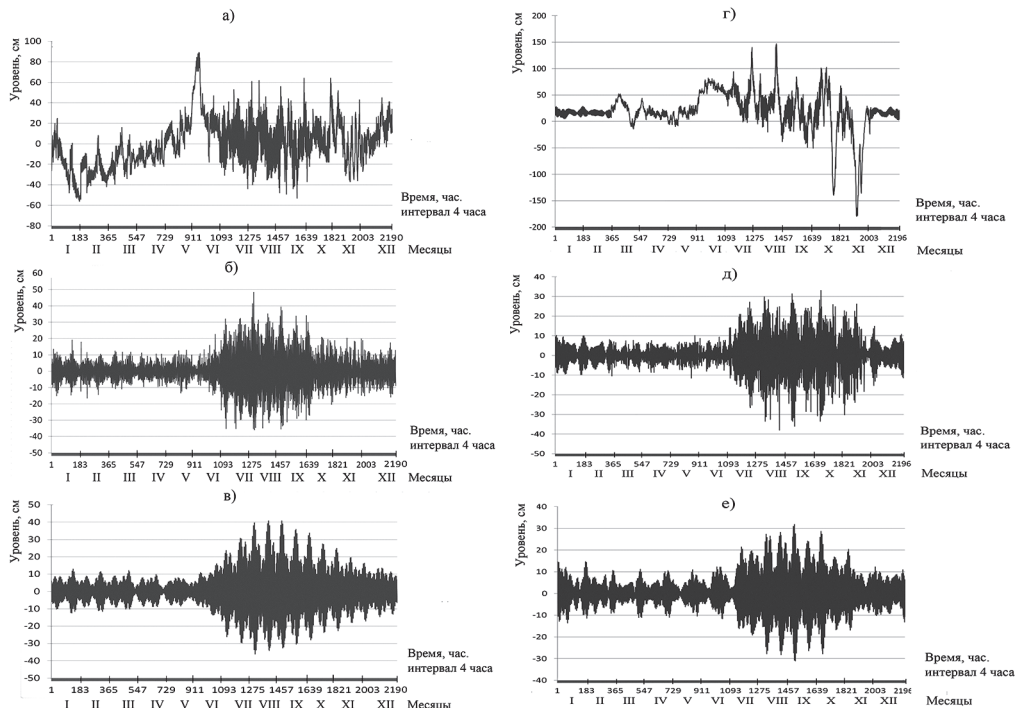


Рис. 6. Наблюдения за уровнем моря в Сеяхе за 1977 (а) и в Каменном за 1948 г. (г). Квазиприливной компонент уровня, выделенный обратным фильтром низких частот в Сеяхе (б) и Каменном (д). Предвычисленные приливные колебания уровня (без долгопериодных колебаний) в Сеяхе (е) и Каменном (е). Все ряды выборка из ежечасных данных с дискретностью 4 ч

Оценка многолетней изменчивости амплитуд и фаз (углов положений) волны M_2 в Обской губе

Устойчивость констант составляющих волн прилива (гармонических постоянных) является одной из главных проблем океанологии. Все данные, опубликованные в Таблицах приливов, как правило, получены в XX в. или даже раньше. Всегда остается неясным вопрос: насколько достоверны и неизменны эти данные. Отражаются ли изменения глобального уровня в Мировом океане и изменения в площади ледяного покрова в СЛО в последние десятилетия на формирование и распространение приливов? Для ответа на этот вопрос требуются многолетние ряды наблюдений за уровнем моря. В Обской губе Карского моря наблюдения за уровнем моря на всех станциях, кроме бухты Новый Порт, были прекращены в начале 90-х гг. Многолетние результаты гармонического анализа прилива в Новом Порту с 1977 по 2012 г. являются единственными в этом плане и представляют несомненный интерес [9].

В настоящее время в рамках проектов освоения новых месторождений нефти и газа и строительства порта Сабетта стали проводиться наблюдения за колебаниями уровня моря. Но для изучения данного вопроса материалов собрано недостаточно и их затруднительно использовать для сравнения с материалами, полученными на п/ст.

Средние годовые оценки даже волны M_2 после коррекции по программе приведения к однородным рядам все же не обладают необходимой устойчивостью во времени вследствие большого разброса в результатах анализа по исходным данным, не имеющим в большинстве случаев хорошего качества [9]. Более устойчивые оценки волны M_2 наблюдаются в средних месячных результатах анализа за август (также сентябрь). Именно эти значения использованы для изучения многолетней изменчивости констант прилива и представлены на рис. 7.

Из визуальной оценки кривых многолетнего хода амплитуд и фаз (углов положений) волны M_2 за август на шести станциях Обской губы трудно получить однозначную оценку о временной изменчивости констант прилива. Ход кривых констант прилива (амплитуды и фазы) в целом свидетельствует о преобладающем влиянии на них региональных условий. В противном случае мы наблюдали бы общие особенности во временном ходе, если не для всех станций, то хотя бы для северного, среднего и южного участков Обской губы. Для подтверждения наличия или отсутствия временной зависимости мы привлекали данные многолетнего хода констант прилива в сентябре. Понятно, что во временном ходе констант прилива волны M_2 за август и сентябрь на конкретной станции межгодовые изменения должны быть тождественны. Если этого нет, то можно предположить искажающее влияние ошибок в данных вследствие низкого качества наблюдений. Наконец, была изучена связь временного хода между пунктами, расположенными в одинаковом участке Обской губы. Здесь мы также предположили, что их межгодовой ход должен быть близок вследствие сходных условий распространения приливной волны (но это не всегда справедливо из-за различия местных условий расположения постов).

Мы применили статистические оценки значимости, рассчитанные по уравнениям линейных трендов в амплитудах и углах положений волны M_2 для августа (дополнительно сентября) для шести станций в Обской губе. Эти оценки в символьном виде приведены в табл. 13.

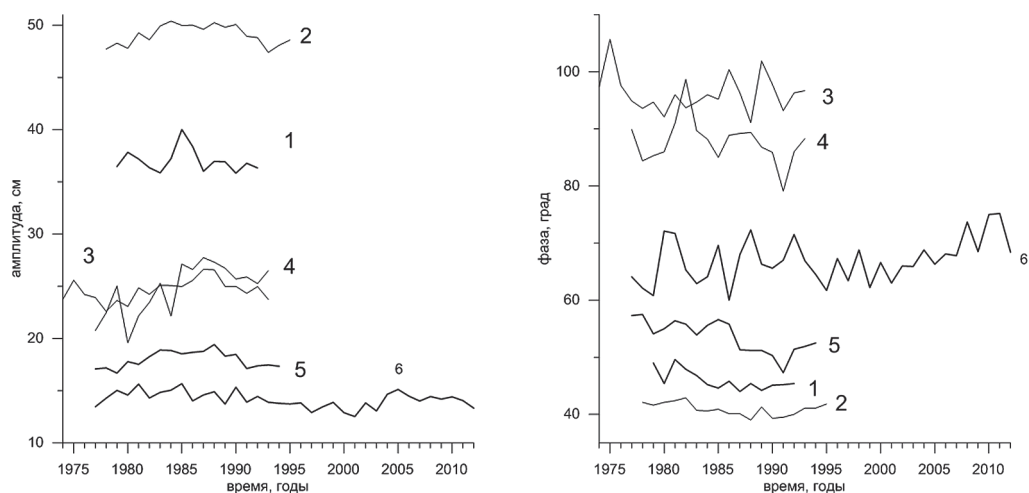


Рис. 7. Многолетний временной ход амплитуды и угла положения (фазы) волны M_2 в августе в Обской губе: 1 — ст. 60 лет ВЛКСМ (Нгарка); 2 — ст. Тамбей; 3 — ст. Тадибейаха; 4 — ст. Сеяха; 5 — ст. Каменный; 6 — ст. Новый Порт. Среднее значение рядов изменено для удобства представления

Таблица 13

Результаты оценки значимости линейных трендов в амплитудах и углах положений волны M_2 для августа (сентября) для шести станций в Обской губе

№ пункта, период	Пункт	Оценка тренда в амплитуде			Оценка тренда в угле положения		
		тренд	связь августа и сентября	связь между пунктами	тренд	связь августа и сентября	связь между пунктами
1. 1979–1992	Нгарка	Нет	Нет	1 и 2 нет	Да –	Нет	1 и 2 нет
2. 1978–1995	Тамбей	Нет	Нет		Да –	Нет	
3. 1974–1993	Тадибейаха	Да +	Нет	3 и 4 нет	Нет	Да	3 и 4 нет
4. 1977–1993	Сеяха	Да +	Нет		Нет	Да	
5. 1977–1994	Каменный	Нет	Нет	5 и 6 да	Да –	Нет	5 и 6 нет
6. 1977–2012	Новый Порт	Да –	Да –		Да +	Да +	

Примечание. «Да» означает наличие значимой связи, «нет» — ее отсутствие. Знак «+» указывает на увеличение во времени амплитуды или угла положения (рост), а знак «–» — на уменьшение во времени амплитуды или угла положения (падение).

Из данных табл. 13 следует, что в северном участке Обской губы (Нгарка и Тамбей) значимой изменчивости констант прилива волны M_2 не наблюдается. Обнаруженный в этих пунктах тренд в угле положения в августе не подтверждается в сентябре. Отсутствует также связь хода кривых между пунктами.

На среднем участке Обской губы (Тадибейаха и Сеяха) был установлен положительный тренд в амплитуде в августе, но он не был подтвержден в сентябре. Здесь кривые временного хода не имели тренда в угле положения. Отсутствие корреляции

между пунктами во временном ходе кривых амплитуды и угла положения указывает на различия местных условий или же на влияние ошибок в данных.

На южном участке Обской губы (Каменный и Новый Порт) подтвержден отрицательный тренд в амплитуде только в Новом Порту (см. табл. 13). При этом он вызван уменьшением амплитуды в 1993–2003 гг., связанной с остаточным эффектом низкого качества наблюдений [9]. В период синхронных рядов в Каменном и Новом Порту в 1977–1994 гг. тренд в амплитуде отсутствовал (см. рис. 7). В многолетнем ходе угла положения в Новом Порту с 2007 г. наблюдалось увеличение фазы, что привело к положительному тренду, который отсутствовал в 1977–1994 гг. в Каменном. В Каменном тренд в угле положения в августе был с отрицательным знаком (падение), но он не подтвердился в сведениях за сентябрь. В целом в южном участке (Каменный и Новый Порт) взаимная корреляция во временном ходе угла положения за период 1977–1994 гг. отсутствовала.

Таким образом, результаты статистической оценки линейных трендов во временном ходе амплитуд и фаз волны M_2 в августе (также в сентябре) за период с 1974 (1978) по 1995 (1993) гг. показали отсутствие значимых параметров этих трендов на всех станциях Обской губы. В многолетнем ходе амплитуды волны M_2 в августе на ст. Новый Порт имеются тенденции к уменьшению амплитуды с 2004 г. и увеличению фазы с 2007 г. Однако значимость оценок трендов в настоящее время не может быть надежно установлена вследствие низкого качества наблюдений. Для подтверждения полученных результатов необходима постановка дополнительных ежечасных наблюдений за уровнем моря.

Заключение

Установлено определяющее влияние ледяного покрова на характеристики прилива, приводящее к аномальной сезонной изменчивости констант основных и мелководных волн в годовом цикле, и, как следствие, к изменению характера прилива, развития фазового неравенства, изменению вида кривой прилива в летний и зимний периоды. Подтверждены теоретические положения [12, 13] о влиянии ледяного покрова на спектр волн прилива в зависимости от периода волны. Выявлено, что гашению подвергаются суточные, полусуточные и мелководные волны. Чем короче период волны, тем сильнее проявляется влияние ледяного покрова. Самое сильное гашение видно для $1/4$ -суточных и $1/6$ -суточных приливов. Волна M_4 , например, в августе в Сеяхе равна 3 см, а в апреле составляет всего 0,5 см.

Новая версия гармонического анализа приливов показала свою эффективность даже в условиях аномальной сезонной изменчивости приливов, которая наблюдается в Обской губе. Единственным обнаруженным в настоящее время исключением является временной ход приливов в Новом Порту. Здесь прилив проявляется только в июле–сентябре, а в октябре–июне он практически вырождается. Сизигийная величина прилива в апреле равна 3,3 см. В этих условиях описание прилива в годовом цикле с помощью сложных волн неэффективно.

Исследованы сложные волны, описывающие модуляцию прилива M_2 в годовом цикле. Амплитуды этих волн достигают 0,6–0,8 амплитуды волны M_2 , а их величина

увеличивается к вершине Обской губы, что означает возрастание размаха сезонного хода прилива в годовом цикле. Установлены также сложные мелководные волны, описывающие модуляцию прилива M_4 и MS_4 в годовом цикле.

Произведена оценка многолетней изменчивости амплитуд и фаз (углов положений) волны M_2 в Обской губе. Эта оценка выполнена по средним месячным значениям амплитуд и фаз волны M_2 за август и сентябрь. По значениям статистических оценок линейных трендов можно утверждать об устойчивости констант прилива M_2 на исследуемых станциях за период 1974–1995 гг. (значимые тренды отсутствовали). В отношении обнаруженных трендов в константах прилива волны M_2 в 2004–2012 гг. на ст. Новый Порт значимость оценок сомнительна и подлежит подтверждению по новым наблюдениям за уровнем моря.

Литература

1. *Войнов Г.Н.* Приливы в Обской губе (Карское море). I. Общая характеристика приливов // Учен. зап. РГГМУ. 2016. № 44. — С. 70–95.
2. *Войнов Г.Н.* Приливные явления в Карском море. — СПб.: Изд-во Русского геогр. общества. 1999. — 109 с.
3. *Войнов Г.Н.* О новой интерпретации сезонной изменчивости приливов арктических морей России // Метеорология и гидрология. 2003. № 9. — С. 59–70.
4. *Войнов Г.Н.* Приливные явления и методология их исследований в шельфовой зоне арктических морей (на примере Карского и северо-восточной части Баренцева морей): Автореф. дисс. ... д-ра геогр. наук. — СПб.: РГГМУ, 2003. — 45 с.
5. *Войнов Г.Н.* О сезонной изменчивости гармонических постоянных 1/4-суточных и 1/6-суточных волн приливов в Баренцевом и Белом морях // Метеорология и гидрология. 2007. № 4 — С. 55–68.
6. *Войнов Г.Н.* Методика контроля и редакции многолетних временных рядов уровня моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. № 4. — С. 51–61.
7. *Войнов Г.Н.* Способ расчета сезонной изменчивости основных волн приливов при их малой величине (на примере Балтийского моря) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 3(93). — С. 101–109.
8. *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.
9. *Войнов Г.Н., Пискун А.А.* Оценка приливов в Новом Порту (Обская губа) по наблюдениям за уровнем за период 1977–2012 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 3(105). — С. 51–65.
10. *Диепсеров Р.А.* Приливы Северного Ледовитого океана // Тр. ГОИН. 1954. Вып. 19. — 74 с.
11. *Коптева А.В.* Уровень и течения Обской губы // Тр. Арктич. ин-та. 1953. Т. 59. — С. 84–148.
12. *Крылов Ю.М.* Распространение длинных волн под ледяным полем // Тр. ГОИН. 1948. Вып. 8(20). — С. 107–111.
13. *Максимов И.В.* О зависимости элементов прилива от ледяного покрова моря // Учен. зап. Высш. Аркт. Морского уч. им. С.О. Макарова. 1953. Вып. IV. — С. 115–129.
14. *Corkan R.H.* An annual perturbation in the range of tide // Proc. R. Soc. Lond. 1934. A144. № 853. — P. 537–559.
15. *Woodworth P.L., Shaw S.M., Blackman D.L.* Secular trends in mean tidal range around the British isles and along the adjacent European coastline // Geophys. J. int. 1991. Vol. 164. — P. 593–609.