

ПРИЛИВЫ В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СПОСОБА КАЛИБРОВКИ ПРИЛИВОВ

Г.Н. ВОЙНОВ^{1,2}, А.К. НАУМОВ²

¹ — ФГБУ Государственный океанографический институт, Санкт-Петербургское отделение, e-mail: voinovgn@mail.ru

² — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

Приведены оценки гармонических постоянных приливов на станции имени Е.К. Федорова за период с 1962 по 1993 г., полученные с помощью метода наименьших квадратов по версии ААНИИ. Произведена оценка качества наблюдений за уровнем моря. Годовые серии с плохими наблюдениями исправлены по способу калибровки приливов. Получена оценка тонкой структуры приливов — гармоник второй и третьей степени потенциала по анализу за период 1962–1985 гг. По исходным и исправленным рядам рассчитаны статистические оценки уровня моря в отдельные типичные годы.

Ключевые слова: гармонические постоянные приливов для ст. имени Е.К. Федорова, сезонный ход волн M_2 , S_2 , N_2 , K_1 , O_1 , оценка гармоник второй и третьей степени потенциала в суточных и полусуточных группах, статистические оценки наблюдаемых и исправленных колебаний уровня, Карское море.

ВВЕДЕНИЕ

Формирование и характер приливов в юго-западной части Карского моря представляют собой не в полном объеме изученное явление в силу разных причин, в том числе и вследствие низкого качества наблюдений. В юго-западной части Карского моря в середине и конце XX столетия работали полярные станции м. Болванский Нос, Югорский Шар и Амдерма (рис. 1), на которых с 1950-х гг. велись круглогодичные наблюдения за уровнем моря с помощью самописца уровня моря в начале (затем с 1970-х гг. — «Шторм» или «ГМ-28»).

Сведения о приливах на этих станциях были получены по единичным месячным и полумесячным сериям экспедиционных наблюдений в 1930–1940-е гг. (Коптева и др., 1952), длительное время были закрытыми и не освещались в научной литературе. Характеристики приливов, определенные по таким данным, в ряде случаев были малодостоверными. Гармонический анализ приливов многолетних временных рядов ранее был выполнен только для Амдермы (Voinov, 1997; Войнов, 1999, 2006), а для станций Болванский Нос и Югорский Шар был произведен лишь разведочный анализ (Войнов, 1999). При этом по результатам оценок месячных и годовых серий за период 1970–1993 гг. на ст. Болванский Нос были обнаружены нереальные значения констант основных волн приливов (Войнов, 2013, 2015). Интерпретация этих сведений была сильно затруднена и даже невозможна, но с помощью способа калибровки приливов были исправлены плохие наблюдения и получены новые достоверные сведения о при-

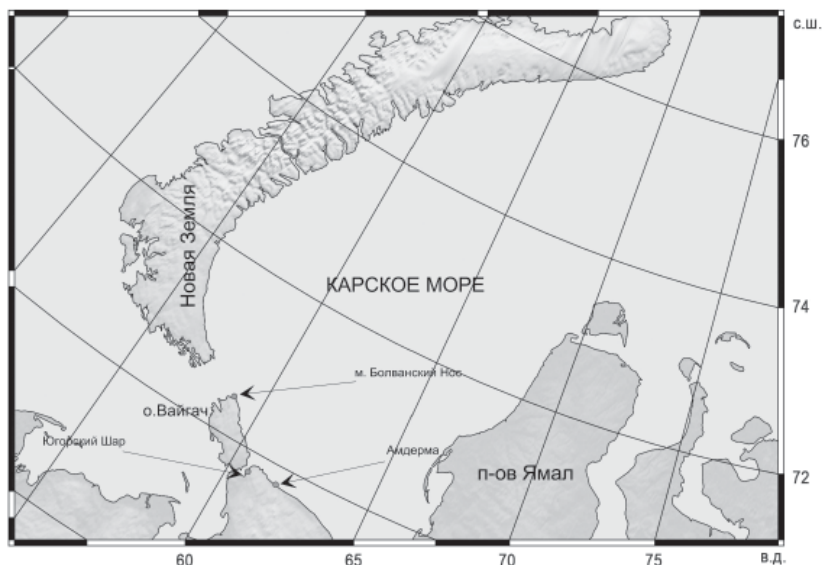


Рис. 1. Расположение полярных станций: имени Е.К. Федорова (м. Болванский Нос), Югорский Шар, Амдерма.

ливах. В работе (Войнов, 2015) были рассмотрены проблемы, связанные с обработкой и анализом наблюдений за уровнем в Карском море. В данной работе внимание будет уделено методике исправления наблюдений за уровнем моря на ст. имени Е.К. Федорова (ранее Болванский Нос) с помощью калибровки приливов в случае недостоверных наблюдений за очень большой период (23 года). На станциях Югорский Шар и Амдерма в наблюдениях за уровнем моря были выявлены лишь единичные годовые серии с отдельными кратковременными периодами плохих наблюдений.

В настоящей работе было проведено более полное исследование приливов на станциях имени Е.К. Федорова и Югорский Шар. Будут рассмотрены некоторые ранее не выявленные черты формирования и характера приливов в юго-западной части Карского моря. Мы полагаем, что предпринятая процедура обработки и анализа может быть использована для контроля качества наблюдений и исправления наблюдений с низким качеством (приведения их к однородным рядам) для решения различных научных задач при расчете необходимых статистических и приливных характеристик.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Условия наблюдений за уровнем моря на ст. имени Е.К. Федорова были благоприятными в сравнении с таковыми для других станций и производились в бухте Болванской на западной стороне полуострова. Бухта имеет свободное сообщение с морем и хорошо защищена от волнения практически всех направлений. Летний водомерный пост, представлявший собой водомерную рейку, прикрепленную к металлической свае, располагался у берега на глубине 1,5–2,5 м. Зимний пост (декабрь–июнь) устанавливался на льду в бухте на расстоянии 50–100 м от берега на глубине 3–5 м.

Исходными данными для анализа приливов на ст. имени Е.К. Федорова послужили материалы ежечасных наблюдений, выполненных за период 1962–1993 гг., а для анализа приливов на ст. Югорский Шар — таковые за период 1962–1989 гг. На ст. Амдерма

привлекались результаты анализа приливов за 1962–1992 гг., частью рассмотренные в работах (Войнов, 1999, 2006). Для ежечасных временных рядов колебаний уровня моря нами разработан способ контроля и интерполяции случайных выбросов (Войнов, 2015). Тестирование временных рядов проводилось с критерием отклонения более 6 см.

Гармонический анализ измерений колебаний уровня моря проводился по методу наименьших квадратов (МНК) по методике, разработанной в ААНИИ (Войнов, 1999). Получены оценки средних годовых гармонических постоянных 92 волн прилива (в первом приближении) из годовых серий (28–32 года) и константы средних месячных 33 волн из месячных серий (336–384 серий).

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА НАБЛЮДЕНИЙ ЗА УРОВНЕМ МОРЯ И ПРИВЕДЕНИЕ ИХ К ОДНОРОДНЫМ РЯДАМ С ПОМОЩЬЮ КАЛИБРОВКИ ПРИЛИВОВ

По значениям месячных и годовых констант основных волн прилива (в виде временных рядов амплитуд и углов положений) были рассчитаны некоторые статистические оценки: среднее, дисперсия (среднее квадратическое отклонение), экстремальные величины (максимум и минимум). На рассматриваемых нами станциях в приливе определяющей (наибольшей по величине) является волна M_2 , поэтому оценку качества наблюдений предпочтительно проводить по константам этой волны. В таблице 1 даны некоторые статистические оценки временных рядов констант прилива волны M_2 на трех станциях.

Таблица 1

Значения средних амплитуд (H) и фаз (g) волны M_2 из годовых оценок за весь период анализа, их среднеквадратические отклонения (с.к.о.), максимумы и минимумы на станциях Болванский Нос (имени Е.К. Федорова), Югорский Шар и Амдерма

Станция	Период анализа (число лет)	Амплитуды, см				Фазы, град.			
		H	с.к.о.	макс.	мин.	g	с.к.о.	макс.	мин.
Болванский Нос	1962–1993 гг.(32)	15,01	±2,30	19,02	9,68	346,7	±8,8	364	334
Югорский Шар	1962–1989 гг. (28)	18,75	±0,66	20,02	17,49	360,0	±2,0	365	355
Амдерма	1962–1992 гг. (31)	19,52	±0,44	20,44	18,72	356,7	±1,3	360	352

Временной ход годовых оценок амплитуд и фаз (углов положений) волны M_2 для станций Болванский Нос (исходные наблюдения), Югорский Шар и Амдерма дан на рис. 2.

По значениям временного хода кривых годовых оценок констант прилива M_2 на ст. Болванский Нос (имени Е.К. Федорова) на рис. 2 видно, что их устойчивый ход сохранялся только с 1962 по 1968 г. В дальнейшем начались большие аномальные отклонения как в амплитуде, так и в фазе. Во временном ходе средних месячных оценок констант волны M_2 за период с 1969 по 1993 г. наблюдается еще более хаотический характер изменения этих значений. Они не могут быть объяснены влиянием природных факторов, так как на ст. Амдерма и ст. Югорский Шар, расположенных в этой же части акватории Карского моря, нет таких колебаний констант прилива. В табл. 1 на уровне простых статистик показано, что значения средних констант (H и g) волны M_2 , выведенные за весь период, для ст. Болванский Нос являются неустойчивыми и недостоверными величинами. Значения с.к.о. и разброс амплитуд и фаз на

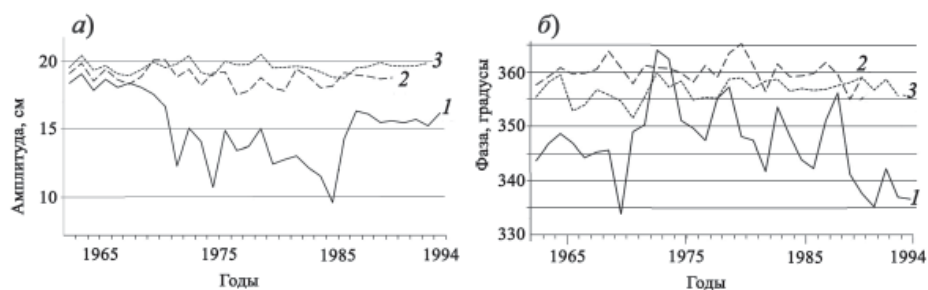


Рис. 2. Временной ход годовых оценок амплитуды (а) и фазы (б) волны M_2 на станциях имени Е.К. Федорова (1), Югорский Шар (2), Амдерма (3).

этой станции очень существенно (в разы) превышают таковые значения для станций Амдерма и Югорский Шар. Как видно из сравнения хода кривых средних годовых амплитуд и фаз трех станций, период с устойчивыми значениями констант прилива волны M_2 на ст. Болванский Нос наблюдается только на интервале с 1962 по 1968 гг., когда наблюдения производились с помощью самописца уровня моря.

Возникает вопрос — что делать с данными об уровне моря за период с 1969 (1970) по 1993 г., которые показывают низкое качество наблюдений. В работе (Войнов, 2015) предложен способ калибровки приливов для приведения наблюдений низкого качества к однородным рядам (норме). Для применения этого способа необходимо получить: а) модель прилива в данном пункте на базе качественных наблюдений; б) оценку среднего сезонного хода основных волн прилива и, прежде всего, волны M_2 .

Модель прилива (средние оценки констант волн, полученные в результате гармонического анализа ежечасных серий за 7 лет (1962–1968 гг.)) дана в таблице 2.

В табл. 2 приведены волны с амплитудой, превышающей 95-процентный доверительный интервал (ε), определенный по формуле:

$$\varepsilon = t_a \cdot \text{с.к.о.} \cdot N^{1/2},$$

где t_a — критерий Стьюдента, задаваемый для 95-процентного доверительного интервала как 2,447; N — число годовых серий (7).

По константам волн в табл. 2 можно производить предвычисление прилива с описанием сезонного хода основных волн прилива O_1 , K_1 , M_2 , S_2 , N_2 . В табл. 2 не даны долгопериодные приливы, так как из наблюдений за 7 лет практически все они достоверно не выделяются (кроме волны S_a). Эти приливы выделялись нами из наблюдений за весь период по специальной методике (Войнов, 1999).

Модель среднего за 7 лет сезонного хода констант волны M_2 дана в табл. 3. 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 данный месяц, а H_r — 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 средние и индивидуальные месячные значения амплитуды и фазы преобразовывались в ком-

**Средние векторные оценки гармонических постоянных приливов
ст. имени Е.К. Федорова за 1962–1968 гг.**

Волна	Угловая скорость, град/ч	Амплитуда		Угол положения	
		<i>H</i>	±с.к.о.	<i>g</i>	± с.к.о.
$2Q_1$	12,854286	0,39	0,13	165,2	19
σ_1	12,927139	0,36	0,19	181,4	31
Q_1	13,398661	1,38	0,31	241,6	13
P_1	13,471514	0,20	0,18	224,9	51
O_1	13,943035	4,53	0,23	323,2	3
MP_1	14,025173	0,20	0,15	225,9	42
$OSta_1$	14,066239	0,17	0,13	147,0	43
M_1	14,492052	0,51	0,23	260,4	26
π_1	14,917865	0,23	0,16	356,4	39
P_1	14,958931	1,30	0,19	90,6	8
S_1	15,000002	0,41	0,20	300,8	28
K_1	15,041068	3,39	0,24	103,4	4
Ψ_1	15,082135	0,31	0,16	57,1	29
OO_1	16,139102	0,22	0,09	307,3	24
$2N_2$	27,895355	0,27	0,12	291,4	25
μ_2	27,968208	0,17	0,07	327,5	24
NA_2	28,398663	0,22	0,07	336,3	18
N_2	28,439729	3,00	0,12	315,8	2
Na_2	28,480796	0,19	0,10	124,4	31
v_2	28,512583	0,61	0,10	315,9	9
OP_2	28,901967	0,32	0,16	187,3	29
MTS_2	28,943037	1,23	0,41	15,1	19
M_2	28,984104	18,32	0,43	345,9	1
MST_2	29,025171	1,47	0,33	165,1	13
λ_2	29,455625	0,29	0,08	358,4	15
L_2	29,528479	0,69	0,08	4,9	7
$2SK_2$	29,917863	0,12	0,09	132,5	46
T_2	29,958933	0,69	0,12	71,4	10
S_2	30,000000	7,77	0,21	42,9	2
R_2	30,041067	0,68	0,14	72,0	12
K_2	30,082137	2,23	0,12	40,0	3
MSN_2	30,544375	0,13	0,05	225,3	24
KJ_2	30,626512	0,12	0,04	236,5	21
MO_3	42,927140	0,07	0,02	242,4	19
SO_3	43,943035	0,05	0,02	17,5	28
MK_3	44,025173	0,11	0,04	12,8	19
MN_4	57,423834	0,06	0,01	216,5	14
M_4	57,968208	0,11	0,04	276,1	22
MS_4	58,984104	0,08	0,04	261,2	31
S_4	60,000000	0,05	0,02	333,3	29
$2MN_6$	86,407938	0,08	0,01	93,2	9
M_6	86,952313	0,10	0,03	127,7	19
$2MS_6$	87,968208	0,06	0,03	153,9	35

Примечания. 1. Приведены волны с амплитудой, превышающей 95-процентный доверительный интервал. 2. *H* — амплитуда, см; *g* — угол положения, град. с.к.о. — значения среднего квадратического отклонения (векторного). Углы положений приведены к нулевому поясу.

Оценки средних значений амплитуд (H) и фаз (g) волны M_2 (в нулевом поясе) и их сезонный ход на ст. имени Е.К. Федорова за период 1962–1968 гг.

Месяц	Средние оценки		Сезонный ход		С.к.о.	
	H , см	g , град.	dH , %	dg , град.	σ_H	σ_g
I	17,81	349,3	-2,7	3,4	0,54	1,74
II	18,00	352,1	-1,7	6,1	0,71	2,28
III	18,02	353,2	-1,6	7,3	0,68	2,15
IV	18,09	352,7	-1,2	6,8	1,33	4,20
V	17,84	352,6	-2,6	6,6	1,46	4,68
VI	18,17	348,3	-0,8	2,3	0,91	2,86
VII	18,95	341,0	3,5	-4,9	0,69	2,08
VIII	19,45	338,6	6,2	-7,3	0,49	1,45
IX	19,63	337,8	7,2	-8,1	0,67	1,95
X	19,00	339,6	3,8	-6,3	0,39	1,17
XI	18,04	342,4	-1,5	-3,5	0,41	1,31
XII	17,84	345,5	-2,6	-0,4	0,77	2,46

поненты $H\cos g$ и $H\sin g$. По ним рассчитывалась стандартная ошибка для амплитуды σ_H и затем для фазы σ_g .

Из данных табл. 3 следует, что на ст. имени Е.К. Федорова сезонный ход волны M_2 имеет классический вид — наибольшие амплитуды наблюдаются в летний период, в августе–сентябре (больше нормы на 6–7 %), и в эти же месяцы прилив приходит раньше по времени (в среднем на 15 мин). Однако это средний сезонный ход, а в действительности наблюдаются вариации этого хода до месяца в ту или другую часть года.

Способ калибровки применялся нами иногда не ко всей годовой серии, а к тем месяцам года, где наблюдались аномальные отклонения в амплитуде и/или фазе. Это делалось для максимального сохранения исходных наблюдений в первоначальном виде.

Например, в значении фазы (угле положения) за 1969 г. видно аномальное уменьшение (рис. 2б). В форме стандартной таблицы ТГМ-1 время наблюдений указано в целые часы, но на самом деле, как записано в техническом деле (фонды ААНИИ), время измерений было установлено начальником станции для «удобства работы» с отклонением +30 мин после часа. Но зачастую такие записи вообще не делались. На самом деле, как следует из результатов месячных анализов, время измерений менялось произвольным образом. К этому надо добавить, что в некоторые годы, а как часто — осталось неизвестным, применялась установка с недельной мареограммой записи колебаний уровня.

На рис. 3 показан пример аномального хода амплитуды и фазы (угла положения) волны M_2 в 1973 г. Амплитуда существенно занижена с января по октябрь, а в ноябре–декабре имеет совсем нереальную величину (около 8 см). Видно по кривым наблюдаемой и средней сезонной фаз (рис 3б), что расхождение между ними составило за январь–апрель в среднем $20,7^\circ$ (около -43 мин), за май–сентябрь уменьшилось до 15° (-31 мин) и в октябре–декабре составило только 10° (-20 мин). Именно эти поправки в соответствующие интервалы были введены во временной ряд до амплитудной калибровки приливов. При этом применялась скользящая полиномиальная регрессия по 3 точкам ряда.

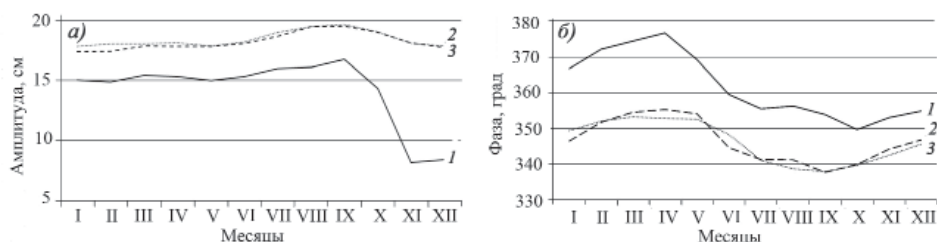


Рис. 3. Временной ход месячных оценок амплитуды (а) и фазы (б) волны M_2 на ст. имени Е.К. Федорова в 1973 г. исходных наблюдений (1), после калибровки уровня (2) и в среднем (норма) за 1962–1968 гг. (3).

Средние годовые оценки амплитуды и фазы волны M_2 до и после калибровки уровня приведены в табл. 4 для периода 1969–1993 гг. За этот период из 9131 суток наблюдений пропуск в данных составил 300 сут (3,3 %), а число исправленных данных достигло 822 сут (9,0 %). В целом число пропусков и брака составило 1122 сут (12,3 %).

Таблица 4

Средние за год значения амплитуды H (см) и фазы g (угла положения) волны M_2 (в градусах по нулевому поясу) до и после калибровки на ст. имени Е.К. Федорова за 1969–1993 гг.
Распределение количества случаев брака и пропусков в исходных рядах уровня

Год	Число суточного брака с пропусками	Наблюдения		Калибровка	
		H	g	H	g
1969	19	17,55	<u>333,9</u>	17,96	345,4
1970	10	16,62	348,9	18,24	348,7
1971	42	12,33	350,2	18,15	351,5
1972	53	15,05	<u>364,0</u>	18,04	346,4
1973	22	14,09	<u>362,4</u>	18,19	346,2
1974	194	10,79	<u>351,0</u>	18,22	346,6
1975	159	14,88	<u>349,6</u>	18,51	348,6
1976	24	13,46	347,4	18,19	347,3
1977	38	13,74	<u>355,1</u>	18,27	348,9
1978	66	15,04	<u>357,2</u>	18,02	351,3
1979	55	12,48	348,1	17,85	348,5
1980	76	12,79	347,4	18,15	347,3
1981	22	13,07	<u>341,7</u>	18,04	346,4
1982	18	12,22	<u>353,5</u>	18,13	353,0
1983	15	11,60	348,2	18,23	348,1
1984	20	9,68	343,9	18,17	344,0
1985	66	14,30	342,3	17,88	344,8
1986	19	16,31	<u>351,0</u>	18,07	348,4
1987	9	16,09	<u>356,1</u>	18,07	350,6
1988	20	15,48	<u>341,2</u>	18,08	346,5
1989	13	15,61	<u>337,7</u>	18,12	346,6
1990	8	15,46	<u>335,2</u>	18,26	346,8
1991	22	15,71	<u>342,2</u>	18,18	345,3
1992	35	15,24	<u>337,0</u>	18,09	347,0
1993	97	16,16	<u>336,7</u>	18,16	347,0

Примечание. Жирным шрифтом выделены аномальные значения амплитуды. Подчеркнуты аномальные значения фазы (иногда явные внутри года).

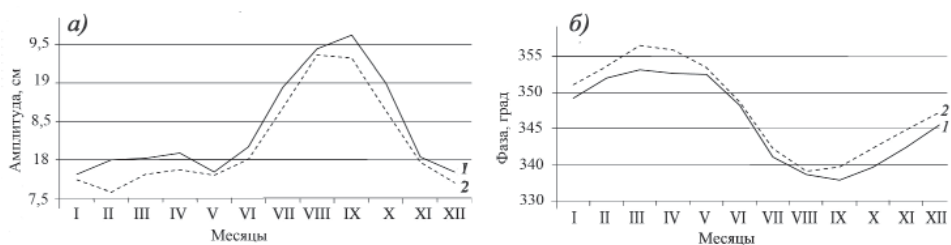


Рис. 4. Средний сезонный ход амплитуды (а) и фазы (б) волны M_2 за период 1962–1968 (1) и 1975–1993 гг. (2).

Из данных табл. 4 видно, что калибровка уровня по амплитуде была произведена по всем годовым сериям с 1970 по 1993 г. Интерполяция по фазе применялась для 17 годовых серий из 25. Обратим внимание, что в 1969 г., когда наблюдения вели только по рейке футштока, амплитуда волны по наблюдениям была в норме, но наблюдался сдвиг фазы, о котором упоминалось выше, вследствие изменения времени измерений. С 1970 г. начались не обеспеченные в полном объеме контрольными измерениями по рейке футштока искаженные наблюдения.

В работе (Войнов, 2015) указывалось, что надежность способа калибровки приливов основана на условии постоянства констант приливов в многолетнем плане. Имеющиеся у нас оценки многолетней изменчивости констант основных волн приливов на ст. Югорский Шар и ст. Амдерма показали отсутствие значимых трендов в 60–90-е гг. XX в. (рис. 2). Исправленные константы прилива волны M_2 на ст. имени Е.К. Федорова (см. табл. 4) также подтверждают этот вывод, хотя в определенной степени новые сведения являются зависимыми от принятой модели прилива и нормы среднего сезонного хода.

На рис. 4 для сравнения с ранее приведенным периодом оценки сезонной изменчивости за 1962–1968 гг. (табл. 3) приведен средний сезонный ход констант волны M_2 за период в 19 лет после калибровки наблюдений (1975–1993 гг.).

Как видно из хода кривых на рис. 4, наблюдаются некоторые различия как в ходе амплитуд, так и в ходе фаз, но они и должны быть вследствие неодинаковых во времени периодов и числе лет расчета средних. В ходе амплитуд максимальная разница между ними не превышала 0,4 см в феврале, а в средних за весь период значениях всего 0,2 см. Это различие не является значимым согласно критерию Стьюдента. В ходе фаз (рис. 4б) максимум разности наблюдается в марте и равен 3° , а в средних за периоды составляет $1,8^\circ$. Это значение по оценке с помощью критерия Стьюдента (t) не является значимым.

НОВЫЕ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЛИВОВ НА СТАНЦИЯХ В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

На основании новых результатов были рассчитаны некоторые негармонические постоянные приливов, которые представлены в табл. 5. Критерий Дуванина определялся как отношение амплитуд волн $H_{k1} + H_{O1}/H_{M2}$, а критерий Куртье по отношению амплитуд волн $H_{k1} + H_{O1}/H_{M2} + H_{S2}$. Для критерия Дуванина тип прилива считается полусуточным, если значение критерия не выше 0,5. При нахождении этого значения в пределах $> 0,5$ и $< 2,0$ тип прилива определяется как неправильный полусуточный. Согласно данным табл. 5, средние месячные значения для всех месяцев года и средние значения за год критерия Дуванина для всех станций не превышали значения

Значения критериев Дуванина и Куртье, величин отношений H_{M_1}/H_{M_2} на ст. Болванский Нос (Б), Югорский Шар (Ю), Амдерма (А), рассчитанные как средние за период 19 лет (1962–1980 гг.)

Месяц	Критерий Дуванина			Критерий Куртье			Отношение H_{M_1}/H_{M_2}		
	Б	Ю	А	Б	Ю	А	Б	Ю	А
I	0,470	0,454	0,452	0,333	0,322	0,318	0,0084	0,0037	0,0078
II	0,446	0,447	0,431	0,319	0,319	0,305	0,0073	0,0021	0,0082
III	0,447	0,439	0,431	0,321	0,315	0,307	0,0067	0,0036	0,0061
IV	0,445	0,413	0,414	0,318	0,299	0,293	0,0050	0,0068	0,0077
V	0,500	0,469	0,454	0,356	0,337	0,321	0,0039	0,0084	0,0072
VI	0,483	0,474	0,448	0,340	0,335	0,312	0,0088	0,0069	0,0121
VII	0,437	0,462	0,396	0,304	0,323	0,274	0,0048	0,0021	0,0063
VIII	0,440	0,469	0,404	0,306	0,325	0,278	0,0057	0,0053	0,0073
IX	0,440	0,512	0,419	0,307	0,356	0,288	0,0041	0,0026	0,0099
X	0,416	0,430	0,381	0,289	0,299	0,263	0,0069	0,0026	0,0097
XI	0,422	0,452	0,415	0,294	0,314	0,286	0,0078	0,0005	0,0093
XII	0,443	0,444	0,432	0,312	0,313	0,302	0,0056	0,0011	0,0088
Среднее	0,449	0,455	0,423	0,316	0,321	0,295	0,0062	0,0038	0,0084

0,5 (одно исключение имеется для сентября в Югорском Шаре), то есть прилив в течении годового цикла оставался полусуточным. Это не противоречит имевшимся ранее представлениям о характере приливов в юго-западной части Карского моря (Войнов, 1999).

На самом деле при просмотре предвычисленных рядов на станциях (также и кривых хода уровня моря при отсутствии сгонно-нагонных колебаний) обнаружился при определенных астрономических условиях неправильный полусуточный тип хода кривых прилива. Полусуточный тип хода прилива сохраняется только при условии развития сизигийных приливов, а в остальные сутки проявляется суточное неравенство двух последовательных полных вод (и/или двух малых вод), наиболее заметное при развитии тропических приливов.

Если опираться на критерий Куртье, то согласно ему при значении отношения более 0,25 и менее 1,50 прилив является смешанным, преимущественно полусуточным.

По данным табл. 5 на всех станциях и везде в годовом цикле значение критерия Куртье более 0,25, то есть прилив не является полусуточным. Получается, что критерий Куртье в нашем случае дает более правильное определение типа прилива, чем критерий Дуванина. На основании новых данных, приведенных в табл. 5, мы должны считать приливы в юго-западной части Карского моря не полусуточными, а *смешанными, преимущественно полусуточными*. По-видимому, при величине отношения амплитуды волны S_2 к амплитуде волны M_2 более 0,4 (значения этих отношений для трех станций равны 0,42–0,43) критерий Дуванина не дает точного разделения типов прилива.

Еще одним важным выводом из данных табл. 5 является отсутствие какой-либо периодичности в годовом ходе значений критериев Дуванина или Куртье на всех станциях. Также нет значимых различий между зимним и летним периодами. Это означает, что значимого изменения критериев внутри года не выявляется. В свою

очередь это говорит об отсутствии гашения полусуточных приливов под действием ледяного покрова (дрейфующего льда или местного припая) в зимний период.

Этот вывод подтверждается также отсутствием значимого изменения величины отношения амплитуды волны M_4 к амплитуде волны M_2 в годовом цикле. Мелководные волны более чувствительны к влиянию ледяного покрова по сравнению с суточными и полусуточными волнами. Однако значимых различий величины отношения волн H_{M_4}/H_{M_2} между зимним и летним периодами не видно.

СЕЗОННЫЙ ХОД ПОЛУСУТОЧНЫХ ПРИЛИВОВ ВОЛН M_2, S_2, N_2 И СУТОЧНЫХ ПРИЛИВОВ ВОЛН K_1, O_1 В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

Уже в 30-е гг. XX в. было известно о наличии сезонной изменчивости приливов в Карском море (Коптева и др., 1952). Но первые оценки этой изменчивости были малодостоверными и носили случайный характер. Дело в том, что вследствие большого разброса (значений с.к.о.) результатов анализа приливов из месячных серий для получения устойчивого сезонного хода амплитуд и фаз какой-либо основной волны прилива требуются многолетние наблюдения. Первые достоверные оценки сезонного хода всех основных волн приливов в Карском море в п. Амдерма были представлены в (Войнов, 1999). Значения средних месячных оценок амплитуд и фаз основных волн полусуточных и суточных приливов в годовом цикле рассчитаны нами за период 1962–1980 гг. для ст. Болванский Нос, Югорский Шар, Амдерма. Они представлены на рис. 5 и рис. 6.

Априори следует ожидать близкого по характеру изменения кривых сезонного хода констант полусуточных волн на трех станциях, как расположенных в одном районе Карского моря, однородном по гидрометеорологическим условиям. Однако в сезонном ходе амплитуд волн M_2, S_2, N_2 наблюдаются значимые различия между станциями и между волнами (рис. 5а). В ходе кривых волны M_2 очень слабо выражен годовой ход в Югорском Шаре и наиболее ярко — в Болванском Носе. Для волны S_2 наблюдается близкое соответствие между станциями. Но для волны N_2 отчетливо видна полугодовая периодичность в амплитудах, отсутствующая в волнах M_2 и S_2 . По-видимому, эта периодичность является ложной, возникающей от влияния волны Na_2 , имеющей угловую скорость, близкую к волне v_2 , которая отделяется от волны N_2 в результатах анализа месячных серий по теоретическим соотношениям. Второстепенная волна Na_2 составляет 6–7 % основной волны N_2 . На фоне малой величины амплитуды волны N_2 (3 см) этого достаточно для создания полугодовой периодичности в результатах анализа из месячных серий.

В сезонном ходе фаз полусуточных волн M_2, S_2, N_2 наблюдаются общие черты: везде присутствует годовая периодичность, а максимумы (март–апрель) и минимумы (август) практически совпадают (рис. 5б). В целом на акватории в юго-западной части Карского моря согласно классификации, предложенной в работе (Войнов, 2003), наблюдается 1-й классический тип сезонного хода полусуточного прилива с максимумом амплитуды и минимумом фазы в июле–августе. При этом увеличение амплитуд полусуточных волн в летний период (июль–август) составляет 7–11 % среднегодовой величины (нормы), а уменьшение их в зимний период (март–апрель) достигает 6–8 % относительно нормы. В сезонном ходе фаз полусуточных волн увеличение фазы в марте–апреле составляет 6–8° от нормы, а уменьшение наблюдается в августе (в среднем) и равно 8–10° среднегодовой нормы.

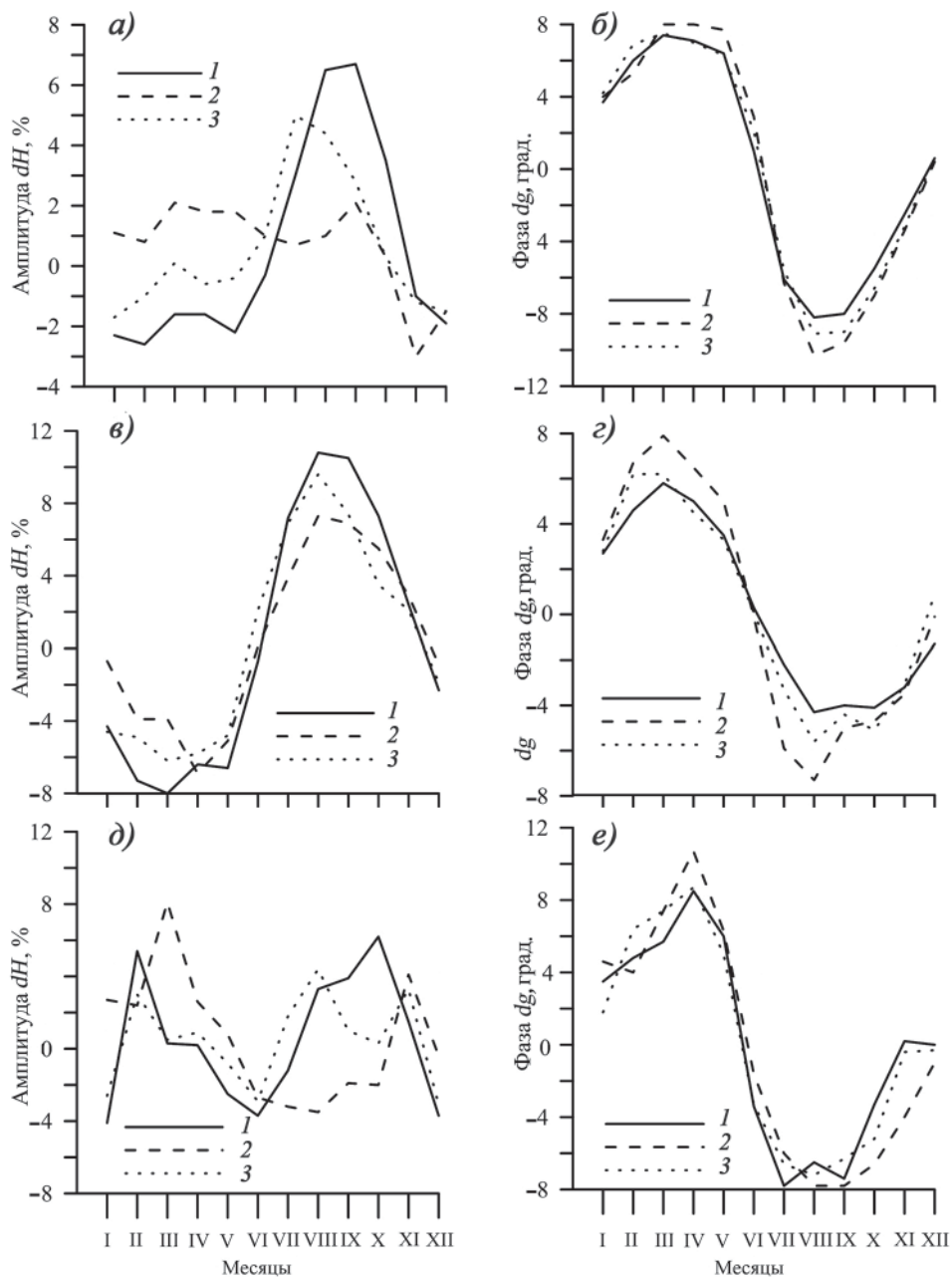


Рис. 5. Сезонный ход относительных амплитуд dH (а, в, д) и разности фаз dg (б, г, е) волн M_2 (а, б), S_2 (в, г), N_2 (д, е) в юго-западной части Карского моря. 1 — Болванский Нос, 2 — Югорский Шар, 3 — Амдерма.

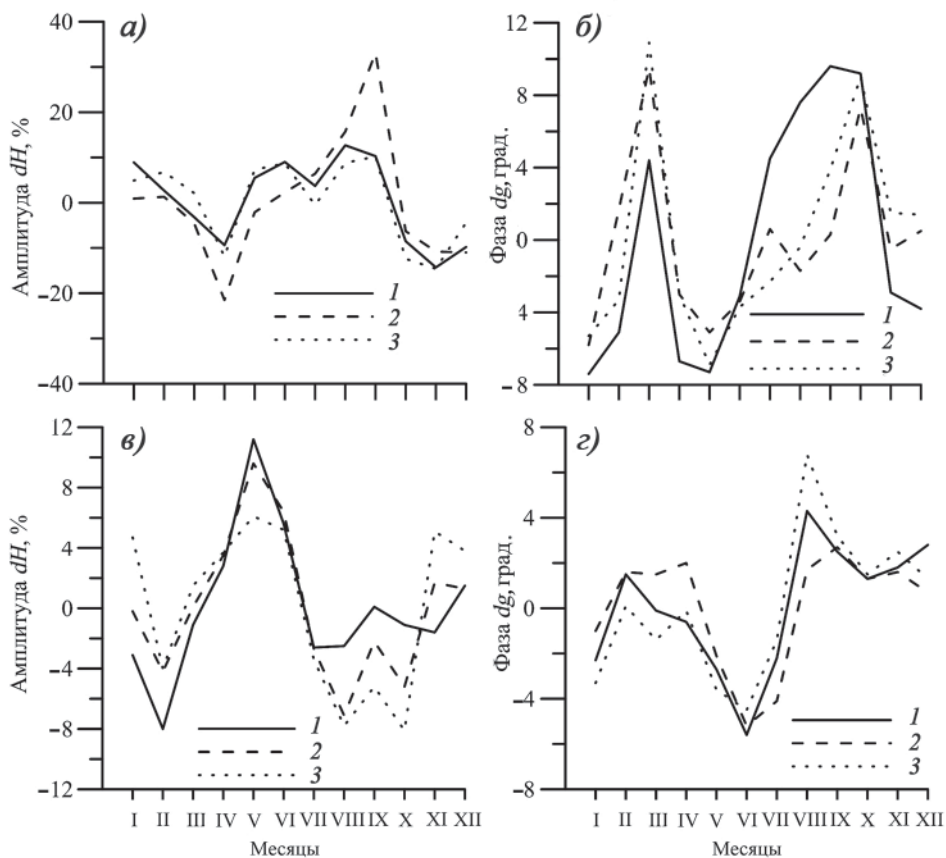


Рис. 6. Сезонный ход относительных амплитуд dH (а, в) и разности фаз dg (б, г) волн K_1 и O_1 в юго-западной части Карского моря. 1 — Болванский Нос, 2 — Югорский Шар, 3 — Амдерма.

В кривых сезонного хода амплитуд суточных волн K_1 и O_1 (рис. 6а) плохо выражен годовой ход, или вследствие присутствия более коротких периодов вид кривых становится неопределенным. В сезонном ходе фаз суточных волн наблюдается полугодовая периодичность, но с различием наступления максимумов между ними (рис. 6б). В целом между кривыми сезонного хода амплитуд и фаз суточных волн K_1 и O_1 не наблюдается соответствия. Нет соответствия вида и характера хода этих кривых с полусуточным приливом. Позволяет ли такой результат говорить о разной физической природе формирования сезонного хода полусуточных и суточных волн прилива? Однозначно и полностью ответить на этот вопрос в настоящее время затруднительно.

Дело в том, что, как показано в (Войнов, 1999), при выделении волны K_1 во втором приближении используется стандартное разделение по теоретическим соотношениям. При этом не учитывается влияние волны S_1 , которая близка по угловой скорости к волне P_1 (табл. 2). Вклад второстепенной волны S_1 составляет 6–8% амплитуды основной волны K_1 . Наибольшее влияние волны S_1 проявляется на ст. Югорский Шар (рис. 6а), где величина этой волны равна 0,3 см (около 8% основной волны).

В группе прилива O_1 также присутствуют волны со значимой амплитудой, как MP_1 и MS_1 , которые не отделяются в стандартных анализах, но вызывают ложные полугодовые периодичности в обычных результатах анализа по месячным сериям. Возможно, что учет приведенных второстепенных волн для очищения результатов волн K_1 и O_1 позволит получить более правильные сведения о сезонном ходе суточных волн.

**ТОНКАЯ СТРУКТУРА ПРИЛИВОВ НА СТ. ИМЕНИ Е.К. ФЕДОРОВА
И СТ. ЮГОРСКИЙ ШАР ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
ПО МЕТОДУ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ПЕРИОД 1962–1985 гг.**

Самую полную оценку достоверности исправленных рядов дает оценка тонкой структуры приливов из наблюдений за нодальный период. Подробное изложение процедуры анализа многолетних рядов в 19 и более лет дано в (Войнов, 1999, 2006, 2011). Здесь мы сравнили константы гармоник второстепенных волн с наибольшей амплитудой в потенциале, от которых зависит расчет нодальной коррекции, с таковыми, полученными для ст. Югорский Шар, за почти одинаковый период 1962–1985 гг. Если сами значения констант гармоник второй и третьей степени близки между собой (обе станции расположены в одной акватории Карского моря), а соотношения амплитуд по наблюдениям соответствуют соотношениям по потенциалу, то нашей методике исправления рядов следует доверять. Также и результаты оценки тонкой структуры приливов можно считать достоверными.

В табл. 6 приведены значения амплитуд и фаз (углов положений) для основных волн в группах $Q_1, O_1, P_1, K_1, OO_1, N_2, M_2, K_2$ и второстепенных гармоник от второй

Таблица 6

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		$H_{ст}$, см	Отношение амплитуд	
		H , см	g , град.		наблюдения	теория
Q_1	13,398660	1,459/1,723	241,6/238,1	1,2229		
$Q_{1,N'}$	13,396454	0,234/0,353	233,5/234,9	0,2307	0,161/0,205	0,1886
O_1	13,943035	4,580/4,605	325,1/323,0	6,3878		
$O_{1,N'}$	13,940829	0,851/0,917	314,2/322,4	1,2047	0,186/0,199	0,1886
P_1	14,958931	1,337/1,317	96,1/99,4	2,9728		
$P_{1,N'}$	14,956724	0,096/0,056	181,9/279,1	0,0334	0,071/0,042	0,0112
K_1	15,041068	3,544/3,906	108,3/113,7	8,9840		
$K_{1,N'}$	15,043275	0,380/0,481	115,3/115,3	1,2183	0,107/0,123	0,1356
OO_1	16,139101	0,228/0,211	303,8/292,3	0,2750		
$OO_{1,N'}$	16,141308	0,113/0,080	317,2/304,4	0,1761	0,495/0,382	0,6404
N_2	28,439729	2,945/2,966	317,6/329,9	0,5233		
$N_{2,N'}$	28,437523	0,097/0,108	324,0/314,6	0,0195	0,033/0,036	0,0373
M_2	28,984104	18,175/18,814	347,5/360,5	2,7333		
$M_{2,N'}$	28,981898	0,625/0,464	3,1/4,3	0,1020	0,034/0,025	0,0373
K_2	30,082137	2,186/2,179	42,4/56,7	0,3459		
$K_{2,N'}$	30,084343	0,686/0,690	36,9/52,6	0,1031	0,314/0,317	0,2981

Примечание. В графе наблюдения значения для H и g в числителе относятся к ст. имени Е.К. Федорова, а в знаменателе — к ст. Югорский Шар.

степени потенциала. Последние не имеют стандартных обозначений, но в их аргументах присутствует долгота узла лунной орбиты N , поэтому эти гармоники имеют этот индекс. Для разделения основных и второстепенных волн в этих группах требуются ряды наблюдений не менее 18,6 года.

Как видно из данных табл. 6, для основных суточных и полусуточных волн между значениями амплитуд и фаз между станциями если и наблюдаются, то небольшие естественные различия вследствие влияния местных условий на распространение конкретной волны прилива между ними. В целом такие же различия наблюдаются в значениях амплитуд и фаз второстепенных волн (гармоник второй степени потенциала).

Среднее из значений отношений амплитуд по наблюдениям к амплитудам по теории потенциала из 7 пар (кроме волны P_1) составило 0,895. Аналогичное значение для ст. Югорский Шар равно 0,907.

В идеальном случае это отношение будет равно 1, но следует иметь в виду, что у всех волн прилива есть мелководные двойники (Войнов, 2006, 2011), которые нарушают теоретические результаты.

Для гармоник третьей степени потенциала, вследствие их малости по теории потенциала, надежные результаты можно получить для крайне ограниченного списка волн. В качестве примера приведем наши результаты по группе суточного прилива NO_1 , где по теории потенциала находится наибольшая по величине гармоника M_1 третьей степени (они даны в табл. 7).

Таблица 7

Средние значения амплитуд (H) и углов положений (g) основных и второстепенных гармоник 3-й степени потенциала в группе суточного прилива NO_1 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	
NO_1	14,496694	0,198/0,174	23,1/19,2	0,5023			
$NO_{1,N'}$	14,489845	0,036/0,054	291,6/236,6	0,0220	0,1800	0,0438	4,110
M_1	14,492052	0,514/0,517	257,5/259,6	0,1484	2,5976	0,2954	8,794

Примечание. В графе наблюдения значения для H и g в числителе относятся к ст. имени Е.К. Федорова, а в знаменателе — к ст. Югорский Шар. R — отношение амплитуд по наблюдениям к теории.

Прежде всего отметим близкое соответствие амплитуд и фаз волн в группе прилива NO_1 между ст. имени Е.К. Федорова и ст. Югорский Шар. Некоторое различие между углами положений видно у гармоники третьей степени $NO_{1,N'}$, но амплитуда этих волн находится на пороге 90-процентного доверительного интервала.

Наиболее значительным результатом является факт, выявленный ранее для Баренцева и Карского морей (Войнов, 2011), что суточный прилив M_1 здесь существенно больше основного прилива группы NO_1 , а это противоречит теории потенциала (табл. 7).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ И ИСПРАВЛЕННЫХ РЯДОВ

Представляет интерес степень различия между исходными и исправленными рядами. Проведем ее оценку с помощью стандартных статистических характеристик и установим их статистическую значимость. По нашей оценке дисперсия прилива без

**Основные статистические характеристики исходного и исправленного
ежечасных годовых рядов за 1973 г. и соответствующих остаточных рядов
(наблюдения минус предвычисления)**

Ряды	Среднее	Максимум	Минимум	Дисперсия	<i>A</i>	<i>E</i>	Квартиль
Исходный	173,1	244	102	467,14	-0,016	-0,036	159,0/188,0
Исправленный	172,9	250	98	553,79	0,042	-0,181	156,7/188,9
Остаточный	0,0	56	-49	243,96	0,039	0,093	-10,32/10,12
Остаточный исправленный	0,0	58	-50	248,21	0,048	0,159	-10,06/10,03

Примечание. *A* — коэффициент асимметрии ряда с ошибкой $\pm 0,026$. *E* — коэффициент эксцесса ряда с ошибкой $\pm 0,052$. Ошибки одинаковы для всех рядов, так как зависят только от длины ряда. Квартили нижний и верхний (соответственно квантили 0,25 и 0,75) приведены в виде дроби. Число значений каждого ряда равно 8760.

гармоник, описывающих сезонный ход колебаний суммарного уровня, составила за период 1962–1993 гг. в среднем 43 %. В разные годы изменчивость дисперсии прилива в зависимости от астрономических условий и степени развития неперiodических колебаний находилась в пределах 31–55 %.

В качестве показательного ряда рассмотрим ежечасную годовую серию за 1973 г. В этом году дисперсия прилива была близка к средней и равна 44 %.

Из данных табл. 8 следует, что значения средних исходного и исправленного рядов практически не различаются (по *t*-критерию Стьюдента с 95 %-м доверительным интервалом). Этот факт следует из особенности процедуры обработки по способу калибровки (Войнов, 2015). Максимумы и минимумы в исходном и исправленном рядах различаются существенно, но в соответствующих остаточных рядах не значимо. В последнем случае проявляются особенности обработки по методу МНК. Степень выделения и исключения прилива почти одинакова в исходном и исправленном рядах, несмотря на различия в амплитудах волн прилива. Поэтому остаточные ряды получаются близкими по форме кривых. Расхождения в остаточных рядах видны только на интервалах замены брака. Однако в целом дисперсии сравниваемых рядов различаются существенно по *F*-критерию Фишера с 95 %-м доверительным интервалом. Здесь отметим интересную черту остаточных рядов после исправления. В их спектрах не проявляется пик на частоте волны M_2 , который всегда присутствует в неисправленных рядах с ошибками времени измерений.

Значения коэффициентов асимметрии всех сравниваемых рядов не выходят за значимые границы ошибок. Значения коэффициентов эксцесса в исправленных рядах существенно отличаются от исходных рядов, что свидетельствует об изменении вида распределения кривой от нормального распределения.

Проверка критерием согласия показывает, что годовые серии обоих рядов не подчиняются нормальному распределению. На уровне месячных серий различия проявляются более резко. Так, для исходного ряда за 1973 г. нормальное распределение имеют месячные серии за май, август, сентябрь и ноябрь, а для исправленного ряда — за май, июнь, июль и сентябрь.

Для определения статистически значимого различия двух рядов были применены ряд критериев. Это *t*-критерий, критерий Тьюки, критерий Брауна–Форсайта, критерий Левена, а также непараметрические критерии: критерий знаков и критерий Вилкоксона (Кобзарь, 2006).

Наблюдается значимость различия дисперсии годовых рядов, так как обработка увеличивает дисперсию исходного ряда. Для месячных серий наблюдается сильная межмесячная изменчивость критериев. Критерии сравнения средних (t-критерий и Тьюки) показывают отсутствие изменения средних для всех месяцев, кроме ноября (в этом месяце было 6 сут брака). При этом результаты непараметрических критериев показывают незначимое различие средних для всех месяцев. Что касается дисперсии, то незначимые изменения дисперсии наблюдаются только в январе и марте 1973 г. (в эти месяцы брака не было).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов гармонического анализа многолетних наблюдений за уровнем моря в юго-западной части Карского моря, приведенных к однородным рядам, получены новые выводы о формировании и характере приливов. Временной ход наблюдений за уровнем моря на ст. Болванский Нос, Югорский Шар и Амдерма показал, что приливы здесь по типу развития являются не полусуточными, как считалось ранее, а смешанными, преимущественно полусуточными. Критерий Куртье здесь правильно определяет тип прилива, а критерий Дуванина дает ненадежный результат.

Внутригодовой ход значений критериев типа прилива (Дуванина и Куртье), рассчитанных как средние месячные за 19 лет на трех станциях, не подтверждает наличия закономерной изменчивости их между летним и зимним периодами. Также не обнаруживается достоверных различий в значениях средних месячных отношений за 19 лет амплитуд волны M_4 к амплитуде волны M_2 в годовом цикле. Это косвенно свидетельствует об отсутствии значимого влияния дрейфующего льда на параметры прилива.

Впервые представлены кривые сезонного хода амплитуд и фаз полусуточных волн M_2 , S_2 , N_2 и суточных волн K_1 и O_1 на ст. Болванский Нос и Югорский Шар. Характер изменения кривых годового хода констант полусуточных волн отражает наличие общих черт изменчивости, но наблюдаются и различия между станциями и между волнами прилива. При этом различия присутствуют в годовом ходе амплитуд волн и практически отсутствуют в годовом ходе фаз волн. За исключением сезонного хода амплитуды волны N_2 , общей чертой всех кривых является годовая периодичность изменчивости амплитуд и фаз полусуточных волн (рис. 5). При этом увеличение амплитуд полусуточных волн в летний период (июль–август) составляет 7–11 % среднегодовой величины (нормы), а уменьшение их в зимний период (март–апрель) достигает 6–8 % относительно нормы. В сезонном ходе фаз полусуточных волн увеличение фазы в марте–апреле составляет 6–8 градусов от нормы, а уменьшение наблюдается в августе (в среднем) и равно 8–10 градусам среднегодовой нормы.

В сезонном ходе кривых суточных волн K_1 и O_1 нет такой согласованной картины изменчивости амплитуд и фаз в годовом цикле. Эта изменчивость носит разный характер между волнами K_1 и O_1 и также не соответствует сезонному ходу полусуточных волн. Выше была предложена гипотеза о влиянии ряда второстепенных волн, не принимаемых во внимание в стандартном втором приближении для отделения от них основной волны. Здесь, по-видимому, следует провести эксперименты.

Достоверность приливных характеристик, полученных по исправленным временным рядам, подтверждается результатами анализа тонкой структуры приливов за период 24 года (1962–1985 гг.). Во-первых, наблюдается соответствие соотношений амплитуд основных и второстепенных волн второй степени потенциала между на-

блюдениями и приливным потенциалом. Эти соотношения близки к таковым, полученным для ст. Югорский Шар, расположенной поблизости. Во-вторых, совпадают особенности аномального увеличения амплитуды лунного суточного прилива M_1 (прилив третьей степени) на ст. Болванский Нос и ст. Югорский Шар.

Оценка различий между исходными и исправленными рядами, выполненная с помощью статистических критериев, показала несущественное различие величин средних рядов в годовых сериях. Но в значениях дисперсий обоих рядов отмечается существенное различие. Это связано с принципами обработки по способу калибровки прилива (Войнов, 2015). На уровне месячных серий различия могут быть более существенные, что зависит от количества исправленных данных (включая пропуски) в этих сериях.

Таким образом, нами установлены новые черты приливных колебаний в юго-западной части Карского моря, которые дополняют общую картину формирования приливов. Значения гармонических постоянных прилива, предложенные в работе, могут быть использованы для предвычисления приливных колебаний с описанием сезонного хода основных волн прилива и расчета характеристик прилива в научных и практических целях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Войнов Г.Н.* Приливные явления в Карском море. СПб.: Изд-во Русского географического общества, 1999. 109 с.
- Войнов Г.Н.* О новой интерпретации сезонной изменчивости приливов арктических морей России // Метеорология и гидрология. 2003. № 9. С. 59–70.
- 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 потенциала в Баренцевом и Карском морях // Доклады академии наук. 2011. Т. 438. № 2. С. 271–274.
- Войнов Г.Н.* О качестве многолетних наблюдений за уровнем на стационарной сети в прибрежной зоне морей северо-запада и арктических морей России // Тр. ГОИН. 2013. Вып. 214. С. 223–236.
- 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.
- Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 814 с.
- Коптева А.В., Бутенко А.К., Иванова З.К.* Материалы по изучению приливов арктических морей СССР // Тр. АНИИ. 1952. Т. 42. Вып. VII. Карское море. 536 с.
- Voinov G.N.* Structure of the tide in Amderma according to the results of a harmonic analysis of sea level observations for a 19-year period from 1962 to 1980 // Proc. of the Russian-Norwegian workshop 95. St.-Pb. Russia. 28.02–02.03 1995. Oslo, 1997. P. 176–178.

G.N. VOINOV, A.K. NAUMOV

THE TIDES IN THE SOUTH-WESTERN KARA SEA. TIDES CALIBRATION METHOD EFFECTS

The estimates of the tides harmonic constants are given over the period from 1962 to 1993. They were received using a least square method according to AARI. Quality estimation of the sea level observations was performed. The annual series with bad observations were transformed by

means of tides calibration. The Estimation of the tides fine structure – harmonics of the second and third degree of the potential according to analysis over the period from 1962–1985 was received. The statistical estimations of the sea level in the separate typical years were calculated using initial and corrected series.

Keywords: harmonic constants of the tides at the st. named after E.K. Fedorov, seasonal variation of the M_2 , S_2 , N_2 , K_1 , O_1 tide, estimation of the harmonics of the second and third degree of the potential in daily and semidiurnal groups, statistical estimations of the observed and corrected level fluctuations, Kara Sea.