

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИЛИВОВ  
НА ОСНОВЕ НОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ  
ГАРМОНИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ В ФИНСКОМ ЗАЛИВЕ*****Г.Н. Войнов***

Санкт-Петербургское отделение Государственного океанографического института  
им. Н.Н. Зубова, [voinovgn@mail.ru](mailto:voinovgn@mail.ru)

Представлены новые котидальные карты приливных волн  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ . Изолинии амплитуд волн проведены впервые. Приведены также сведения и карты характера прилива, максимальных и наибольших возможных значений приливных колебаний уровня. Получен сезонный ход волны  $M_2$  для четырех станций. Установлено, что в среднем максимум амплитуды этой волны (повышение на 10 % от средней за год) наблюдается в июле — августе. Произведена оценка линейных трендов амплитуд и фаз волны  $M_2$  для четырех станций с многолетними наблюдениями.

*Ключевые слова:* котидальные карты, карта максимальных приливов, карта наибольших приливов, сезонный ход, многолетний ход, Финский залив.

**GENERAL CHARACTERISTICS OF TIDES AS THE BASE  
THE NEW OF HARMONIC CONSTANTS IN THE GULF OF FINLAND*****G.N. Voinov***

Zubov State Oceanographic Institute, St. Petersburg, Russia

The paper presents the results of research aimed to develop new maps of tidal waves  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ . For the first time, isolines of wave amplitudes have been obtained. Parameters and charts of tidal oscillations of the extremes, the highest (HAT) and the lowest (LAT) astronomical tide have been obtained. Seasonal wave routes have been obtained for four stations. The maximum wave amplitudes proved to occur in July and August. Linear trends in wave amplitudes and phases have been calculated for four stations.

*Keywords:* cotidal maps. Extreme tide. Highest (HAT) and lowest (LAT) tide. Seasonal variations. Trends the  $M_2$  tide. Gulf of Finland

**Введение**

Первая обработка данных наблюдений за уровнем в Балтийском море, выполненная с помощью гармонического анализа Р. Виттингом в начале XX века [19], показала, что приливы в море повсеместно невелики и, согласно принятой классификации [2], Балтийское море в целом, и в частности Финский залив, относятся к бесприливным морям (среднее значение прилива менее 10 см). Однако по мере накопления данных наблюдений и расширения сети береговых и островных станций периодически возникал научный интерес к изучению формирования и распространения приливов на акватории моря.

Наиболее достоверными в XX веке считались эмпирические котидажные карты приливов волн  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ , представленные Магаардом и Крауссом [17]. Эти карты были построены по результатам спектрального анализа наблюдений в 31 пункте, а также с использованием имеющихся сведений о приливах Виттинга [19] и Лисицыной [16]. Однако недостаток карт Магаарда и Краусса состоял в отсутствии карт изоамплитуд волн приливов. Точность полученной к тому времени информации об амплитудах основных волн была недостаточной для построения таких карт. Подробное изложение истории вопроса содержится в работах [4, 6].

В XXI веке изучение закономерностей формирования и распространения приливов стало проводиться с помощью численного моделирования [7, 15]. Итогом этих работ стало подтверждение сложившихся представлений о формировании суточных и полусуточных волн приливов и эмпирических построений распространения основных четырех волн приливов.

В связи с появлением новых сведений о гармонических постоянных приливов, основанных на гармоническом анализе многолетних наблюдений за уровнем моря [6, 7], появилась возможность построения новых эмпирических карт основных волн приливов в Финском заливе. Были выявлены неверные сведения о гармонических постоянных в некоторых пунктах Финского залива, что приводило к ошибочным результатам при расчете различных характеристик приливов в ряде работ [1, 9—14].

Наши новые данные, конечно, меняют детальную картину распределения на подобных картах. В особенности это относится к картам характера прилива, максимальных колебаний прилива и его наибольших возможных колебаний. Совместно с новой информацией о сезонных колебаниях, приведенной в работе Медведева [8], и данными, представленными в настоящей работе, появилась возможность выполнить расчет приливных колебаний уровня с учетом сезонных колебаний в любом пункте Финского залива и оценить распределение энергии в спектре в диапазоне сезонной, мезомасштабной и синоптической изменчивости колебаний уровня.

В последнее десятилетие начал реализовываться проект газопровода через акваторию Финского залива «Северный поток-2». В связи с этим возник запрос на полное освещение режима колебаний морского уровня на основе новых данных наблюдений и современных методов обработки и интерпретации этой информации. Целью данной работы является построение новых приливных карт основных волн  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  для исследования формирования и распространения полусуточных и суточных приливов в Финском заливе. Необходимы также новые карты максимальных и наибольших возможных приливных колебаний уровня с целью их точной оценки. Наконец, появилась возможность изучить сезонную и межгодовую изменчивость приливов.

### Котидажные карты основных волн прилива

**Волна  $M_2$ .** В работах [4, 6, 7, 13—14] обсуждались котидажные карты разных авторов. В последних обзорах по приливам [13, 14] приведена карта Магаарда и Краусса [17], но в ней нет изолиний амплитуд. Это связано с тем, что для детального проведения изоамплитуд информации было недостаточно.

Для установления точного местоположения центра амфидромической системы автор применял метод Штернека — Некрасова [18]. Он заключается в нахождении точки пересечения линий значений  $H \cos(g)$  и  $H \sin(g)$ , где  $H$  и  $g$  — гармонические постоянные всех пунктов. Подобное действие можно выполнить алгебраически, но здесь такое усложнение не требуется. Затем, после определения этой точки, котидальные линии (изофазы и изоамплитуды) могут быть легко построены с помощью графической линейной интерполяции. Новая карта автора приведена на рис. 1 а. Амфидромическая система имеет вращение линий изофаз в направлении против часовой стрелки. Это соответствует теоретическим представлениям как амфидромия Тейлора.

Координаты центра амфидромии составляют  $59^{\circ}52'$  с.ш. и  $25^{\circ}32'$  в.д. По Магаарду и Крауссу [17], центр приблизительно находится в точке с координатами  $59^{\circ}55'$  с.ш. и  $25^{\circ}40'$  в.д. Таким образом, центры амфидромии волны  $M_2$  почти совпадают. Тем не менее ход изолиний несколько различается. Нулевая изолиния у Магаарда идет к пункту Шепелево, а на новой карте автора — к мысу Кольгомпя у Копорской губы. Следующая изолиния  $30^{\circ}$  идет не к Приморску, а по оси залива мимо Кронштадта к Стрельне (см. рис. 1 а). Изолиния  $120^{\circ}$  на карте автора проходит почти у Хельсинки, а у Магаарда — у входа в залив.

Изолинии амплитуд проведены через 0,5 см. Видно, что в районе пункта Шепелево проходит изолиния 1,5 см. На большей части акватории Финского залива амплитуда волны составляет всего 0,5—1,0 см. В окрестности амфидромии амплитуда не превышает 0,5 см.

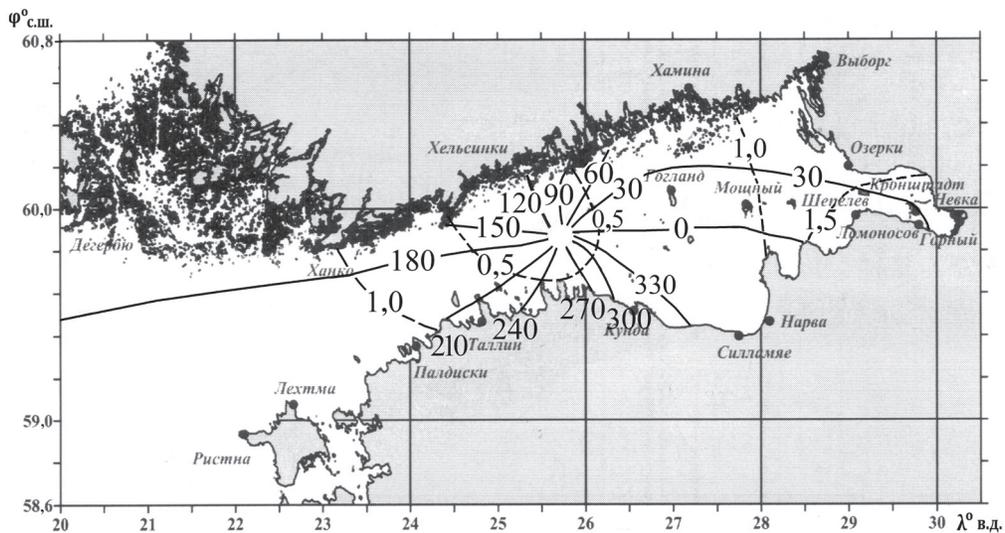
**Волна  $S_2$ .** Способ построения карты изофаз и изоамплитуд волны  $S_2$  был аналогичен описанному выше. Координаты центра амфидромии (см. рис. 1 б) составляют  $59^{\circ}50'$  с.ш. и  $25^{\circ}32'$  в.д. По Магаарду и Крауссу [17] центр приблизительно находится в точке с координатами  $60^{\circ}00'$  с.ш. и  $26^{\circ}00'$  в.д. Отсюда следует, что центры амфидромии волны  $S_2$  несколько различаются. Отметим, что на наших картах центры амфидромий волн  $M_2$  и  $S_2$  практически совпадают между собой. Амплитуда волны  $S_2$  в Финском заливе лежит в основном в пределах 0,3—0,5 см. Однако, несмотря на малость этих значений, идентичность хода изофаз и изоамплитуд между волнами  $M_2$  и  $S_2$  подтверждает достоверность представленной карты.

**Волна  $K_1$ .** Проверка на наличие амфидромии этой волны показала отрицательный результат. На рис. 2 а представлена котидальная карта волны  $K_1$ .

Распределение изофаз показывает классический случай стоячей волны в Финском заливе. Практически через весь залив проходит одна изолиния —  $0^{\circ}$ . Изменения фаз наблюдаются только на входе в залив. Амплитуда волны последовательно возрастает к вершине залива. В крайней восточной части она составляет почти 3 см. Карта изофаз для залива, представленная в работе [17], совпадает с новой картой автора практически во всем, кроме вида прохождения изолинии  $0^{\circ}$  в крайней восточной части. Это понятно: в распоряжении авторов указанной работы еще не было такой полной информации.

Наличие ряда изофаз на входе в залив свидетельствует о формировании узловой зоны. По Магаарду и Крауссу [17], а также в соответствии с предшествующим исследованием центр амфидромии волны  $K_1$  расположен у о-ва Борнхольм. По данным автора центр амфидромии может лежать к северу от этого острова, что может быть установлено в дальнейшем по дополнительным данным.

а)



б)

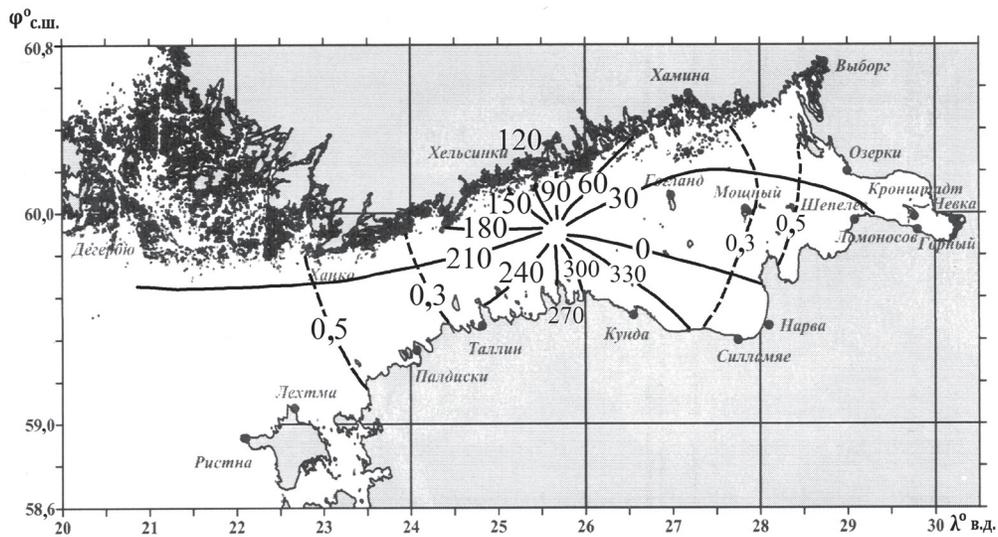
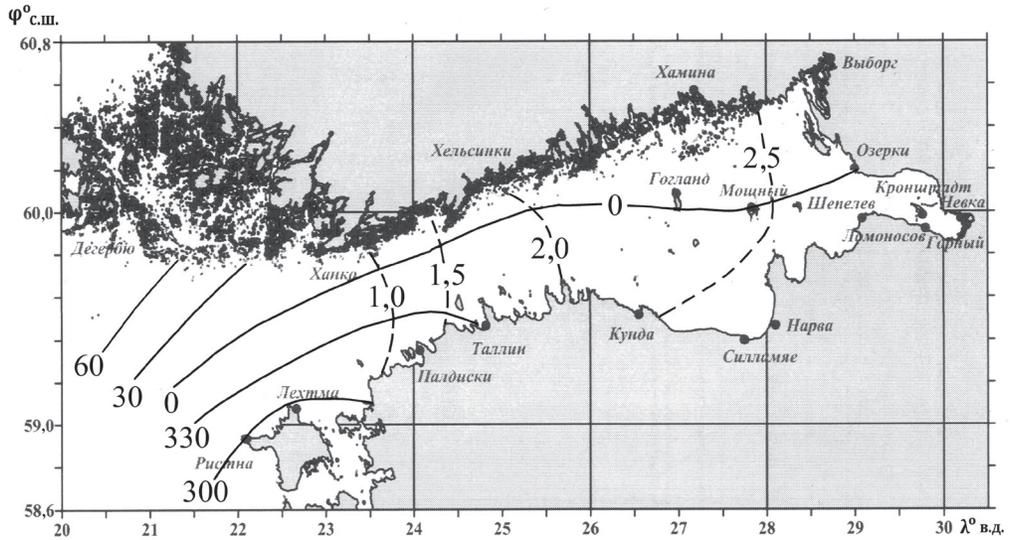


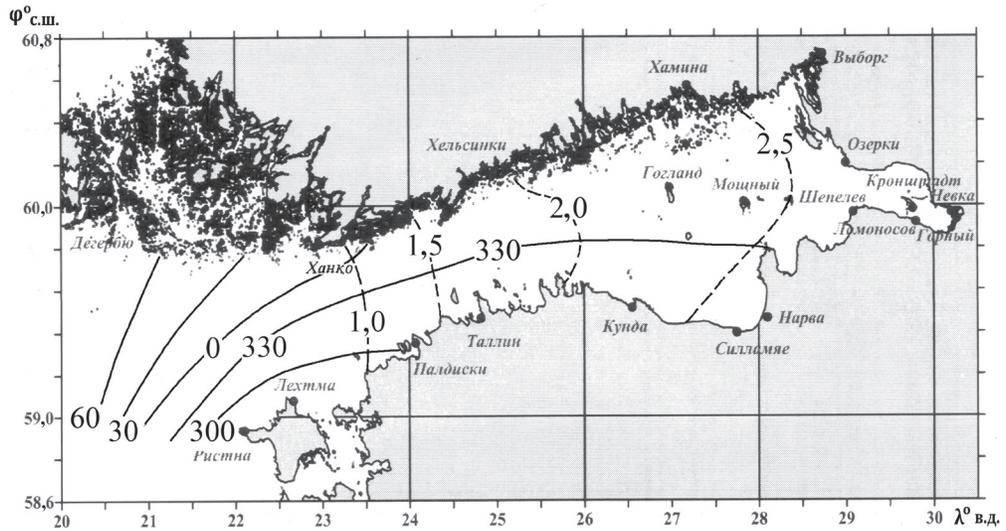
Рис. 1. Котидальные карты волны  $M_2$  (а) и волны  $S_2$  (б).

Сплошные кривые — изофазы (град.) по нулевому поясу,  
штриховые кривые — изоамплитуды (см).

а)



б)

Рис. 2. Котидальные карты волны  $K_1$  (а) и  $O_1$  (б).

Сплошные кривые — изофазы (град.) по нулевому поясу,  
штриховые кривые — изоамплитуды (см).

**Карта  $O_I$ .** На рис. 2 б представлена карта волны  $O_I$ .

Здесь мы видим также стоячую волну с одной изолинией  $330^\circ$ , проходящей через залив. По сравнению с картой, представленной в работе [17], есть существенные отличия. На этой карте изолиния  $0^\circ$  проходит через залив. На новой карте автора изолиния  $0^\circ$  появляется на выходе из залива у Ханко. Амплитуда волны  $O_I$  возрастает к вершине залива и тождественна по распределению волне  $K_I$ . Так же как и в случае волны  $K_I$ , в крайней восточной части залива амплитуда достигает почти 3 см. Характер распределения изофаз волны  $O_I$  на входе в залив сходен с наблюдаемым для волны  $K_I$ . Поэтому отмеченные выше условия формирования узловой зоны волны  $K_I$  справедливы и для волны  $O_I$ .

### Общая характеристика приливов

В табл. 1 приведены параметры  $Sg \approx 2 (H_{M2} + H_{S2})$  и  $Gc \approx 2 (H_{K1} + H_{O1})$ , являющиеся грубым приближением к величинам сизигийных и тропических приливов соответственно. Критерии Дуванина и Куртье определяют характер временной изменчивости приливов. Для этого используется также величина угла  $\Delta g = g_{M2} - (g_{K1} + g_{O1})$ . Этот параметр совместно с критерием Куртье или Дуванина

Таблица 1

Основные негармонические постоянные в различных пунктах Финского залива

Номер пункта	Пункт	$Sg$	$Gc$	$L = Sg + Gc$	Д/К*	$\Delta g$
1	Ристна	3,4	2,2	6,6	0,92/0,65	29
2	Лехтма	4,3	3,2	7,5	1,08/0,75	346
3	Палдиски	3,1	4,6	7,7	1,98/1,46	298
4	Таллинн	2,1	6,0	8,1	4,00/2,80	299
5	Кунда	2,2	9,3	11,5	5,76/4,32	28
6	Гогланд	2,4	8,7	11,1	4,70/3,58	40
7	Силламяе	3,2	11,2	14,4	4,69/3,53	32
8	Мощный	2,6	9,9	12,5	5,08/3,79	33
9	Нарва	2,6	10,1	12,7	4,34/3,84	34
10	Шепелево	4,4	11,6	16,0	3,54/2,63	38
11	Кронштадт	5,3	12,0	17,3	3,16/2,25	40
12	Ломоносов	6,0	11,5	17,5	2,78/1,90	46
13	Горный институт	5,8	12,4	18,2	3,07/2,12	40
14	Невская устьевая	5,9	11,0	16,9	2,77/1,85	45
15	Озерки	3,7	10,1	13,8	3,78/2,74	40
16	Приморск	3,9	10,0	13,9	3,45/2,54	43
17	Выборг	3,7	10,8	14,5	3,84/2,89	38
18	Хамина	3,1	10,1	13,2	4,40/3,14	41
19	Хельсинки	0,9	7,3	8,2	10,48/7,77	118
20	Ханко	3,6	3,2	6,8	1,25/0,89	150
21	Дегербю	2,5	1,6	4,1	0,86/0,64	6

\* Д — критерий Дуванина, К — критерий Куртье.

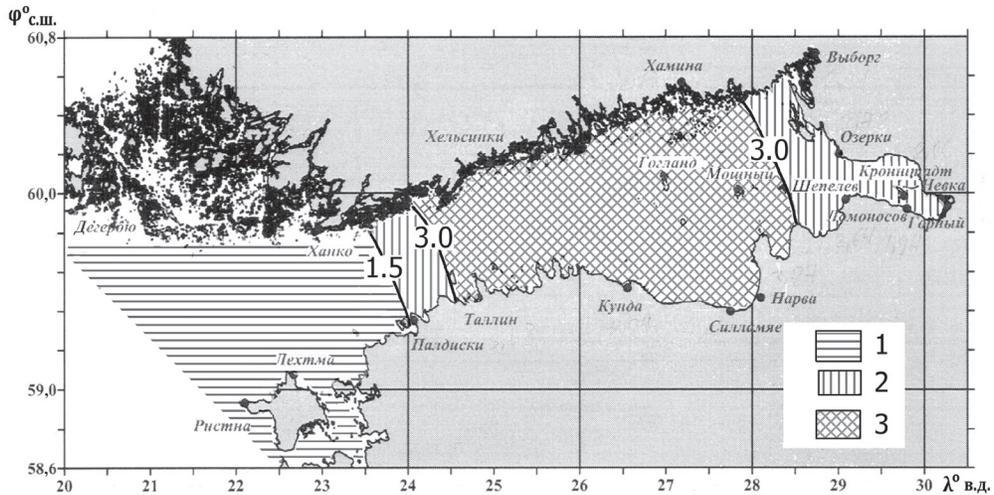


Рис. 3. Характер прилива по критерию Куртье.

1 — зона смешанного прилива, в основном полусуточного ( $0,25 < K < 1,5$ ); 2 — зона смешанного прилива, в основном суточного ( $1,5 < K < 3,0$ ); 3 — зона суточного прилива ( $K > 3,0$ ).

позволяет классифицировать приливы и подразделить их на отдельные подтипы по временному ходу кривой за сутки [2].

Из рис. 3, построенного по данным, приведенным в табл. 1, видно, что на входе в Финский залив до линии, условно соединяющей Ханко и Палдиски, прилив имеет смешанный, в основном полусуточный характер (критерий Куртье меньше 1,5). Далее к востоку, почти до Таллина, идет зона смешанного, в основном суточного прилива. Затем на восток до района Копорской губы и по линии на север почти по меридиану  $28^\circ$  приливы имеют суточный характер. В крайней восточной части Финского залива приливы приобретают смешанный, в основном суточный характер (критерий Куртье меньше 3). Нельзя сказать, что эти выводы являются полностью новыми. Тем не менее зона смешанных, в основном полусуточных приливов выделяется автором впервые. Более детально по сравнению с прежними представлениями обозначена зона чисто суточных приливов.

Известно, что смешанные приливы чрезвычайно изменчивы во времени. Для оценки этой изменчивости Владимирский [2] предложил классифицировать их в зависимости от величины угла  $g_{M2} - (g_{K1} + g_{O1})$  и критерия Дуванина (Куртье). Наиболее часто встречающийся вид изменчивости в Финском заливе — это преобладание суточного вида хода кривой (одна полная и одна малая вода в сутки). В зоне смешанного, в основном суточного прилива на общем фоне суточного вида кривой иногда появляется незначительная полусуточная вариация в дни сизигии.

На входе Финского залива на акватории моря выделена зона смешанного прилива в основном полусуточного (см. рис. 3). Здесь наблюдается полусуточный вид кривой с двумя полными и двумя малыми водами в сутки, но проявляется сильно

выраженное неравенство полных вод. Большую часть акватории Финского залива от Таллина до Кронштадта приливная волна пробегает почти за три часа.

В работах, посвященных приливам Финского залива [1, 6, 9], можно обнаружить совершенно разные оценки возраста прилива (полусуточного, суточного и паралактического), а также максимальных приливных колебаний уровня. Это было замечено Альтшулером [1], который считал, что погрешности расчета амплитуды достигают 20—30 %. По расчетам Михайлова [9], ошибки фаз главных волн прилива в пунктах Балтийского моря достигают  $\pm 30^\circ$ . Как показано в работе [6], результаты, опубликованные ранее для отдельных пунктов, вообще могут быть неверными. Отсюда следуют большие расхождения в значениях многих расчетных характеристик приливов.

Автором были рассчитаны значения возраста приливов: полусуточного  $\tau(S_2; M_2)$ , суточного  $\tau(O_1; K_1)$  и паралактического  $\tau(N_2; M_2)$ . Они приведены в табл. 2. Их таблицы видно, что в среднем возраст полусуточного прилива для всего залива составляет 11,1 часа, а увеличение этого значения до суток происходит

Таблица 2

Возраст приливов (полусуточного  $\tau(S_2; M_2)$  суточного  $\tau(O_1; K_1)$ , паралактического  $\tau(N_2; M_2)$ ) и значения отношений  $H_{S_2}/H_{M_2}$  и  $H_{O_1}/H_{K_1}$  в пунктах Финского залива

Номер пункта	Пункт	Возраст приливов, ч			$H_{S_2}/H_{M_2}$	$H_{O_1}/H_{K_1}$
		$\tau(S_2; M_2)$	$\tau(O_1; K_1)$	$\tau(N_2; M_2)$		
1	Ристна	6	8	77,89	0,412	1,245
2	Лехтма	10	14	65,03	0,447	0,862
3	Палдиски	18	18	80,83	0,353	1,000
4	Таллин	9	16	89,24	0,427	1,158
5	Кунда	8	18	29,02	0,333	1,113
6	Гогланд	7	11	47,39	0,312	1,121
7	Силламяе	8	14	35,09	0,328	1,051
8	Мощный	12	17	37,29	0,340	1,098
9	Нарва	(0)	18	48,86	0,129	1,113
10	Шепелево	8	17	57,68	0,348	0,983
11	Кронштадт	11	16	56,58	0,405	1,024
12	Ломоносов	11	12	60,25	0,461	1,003
13	Горный институт	8	19	57,31	0,448	0,937
14	Невская устьевая	9	11	49,60	0,495	0,933
15	Озерки	9	7	54,37	0,381	1,061
16	Приморск	11	7	36,19	0,359	1,119
17	Выборг	4	23	58,23	0,326	0,946
18	Хамина	12	20	53,82	0,339	0,992
19	Хельсинки	31	22	41,88	0,343	1,017
20	Ханко	22	20	51,99	0,398	1,192
21	Дегербю	19	19	56,40	0,340	0,723
	Среднее	11,1	15,6	2 д 3 ч	0,368	1,033

в районе Ханко и Хельсинки, что вызвано влиянием близости амфидромии в полусуточных приливах. Возраст суточного прилива распределен более равномерно. В среднем он несущественно отличается от возраста полусуточного прилива и равен 15,6 часа. Возраст параллактического прилива более изменчив, но его среднюю оценку можно получить: он составляет 2 суток 3 часа. Конечно, возраст приливов не является основной характеристикой, но помогают понять временную изменчивость приливов.

Теперь можно уверенно утверждать, что сизигийный прилив в Финском заливе наступает в дни астрономической сизигии, а тропический суточный — в дни максимального склонения Луны, строго говоря, через 11 и 16 ч после этих астрономических моментов. Параллактические приливы будут наблюдаться через двое суток после прохождения Луной перигея. Заметим, что все средние значения, приведенные в табл. 2, являются в известной степени приближением к истинным оценкам этих характеристик, так как получены по данным береговых и островных станций.

В целом амплитуда волны  $S_2$  в Финском заливе во всех пунктах больше амплитуды волны  $N_2$ , и поэтому параллактическое неравенство будет несущественным по сравнению с фазовым неравенством. Из табл. 2 видно, что средние значения отношений  $H_{S_2}/H_{M_2}$  и  $H_{O_1}/H_{K_1}$  равны 0,368 и 1,033. Согласно статической теории, на широте  $60^\circ$  эти отношения должны составлять 0,465 и 0,711. Таким образом, наблюдаемые соотношения отклоняются от теоретических значений. Некоторое занижение первого соотношения более заметно в центре Финского залива, где наблюдаются амфидромии приливов  $M_2$  и  $S_2$ .

Более высокие значения соотношения амплитуд суточных волн по сравнению с теоретическим формально следуют из того, что в 13 пунктах амплитуда прилива  $O_1$  больше амплитуды прилива  $K_1$  (см. табл. 2). В отношении прилива  $O_1$  можно отметить, что он ближе к резонансу, чем суточный прилив  $K_1$ . В связи с приближенным равенством амплитуд двух суточных волн (отношение их амплитуд в среднем близко к единице) тропическое неравенство будет резко выражено и равноденственные приливы будут небольшими. Поскольку преобладает суточный характер прилива, то максимальные приливные колебания уровня следует ожидать в июне и декабре.

### Максимальные приливные колебания уровня моря

К вопросу о максимальных приливных колебаниях уровня обращались довольно часто, и в частности в работах [1, 11, 13—14]. Однако согласия между авторами не наблюдается. Прежде всего, не было до конца понятно, как рассчитывать максимальные приливные колебания уровня. Для упрощения расчетов, но не строго, можно определять их как удвоенную сумму амплитуд четырех основных волн прилива. В теории приливных колебаний вряд ли возможен вариант с совпадением фаз колебаний всех волн, а именно так должно быть при равенстве значений максимальных амплитуд удвоенной сумме их амплитуд. На самом деле амплитуды и фазы модулируются нодальными параметрами. Предпочтительнее

использовать метод, предложенный Дуваниным [14], который состоит в расчете прилива на сутки путем сложения сизигийного прилива с тропическим с учетом их возраста и выборки экстремумов.

Более строгий способ расчета был предложен Владимирским [2] для восьми основных волн прилива. Впоследствии он был расширен Пересыпкиным [14] для учета большего числа значимых волн. В настоящее время вопрос о громоздкости вычислений больше не стоит, и экстремальные уровни выбираются прямо по расчету предвычисленного прилива на 19 лет с заданной дискретностью.

Для расчета необходимым условием является задание статистически значимых волн прилива. Поэтому оценки гармонических постоянных должны быть получены из анализа многолетних рядов наблюдений. Оценка значимости выделенных амплитуд волн прилива проводилась по оценке уровня шума и СКО остаточных рядов в приливной (данные наблюдений минус предвычисленные значения) полосе частот [6]. Поскольку при анализе прилива выделяются также волны, не являющиеся в сущности приливными, — годовая, полугодовая, третьгодовая и четвертьгодовая, то они, согласно принятой в мировой практике процедуре [18], также включаются в предвычисление прилива. Их включение можно рассматривать как способ учета сезонного хода уровня.

Приливы в Финском заливе, несмотря на их малость, все же имеют сезонный ход констант основных волн (давно известный для арктических морей [3]). Поэтому в предвычисление включались описывающие их второстепенные волны (только те, которые были статистически значимы). Наконец, включались значимые волны мелководных приливов. В основном число волн в пунктах составляло 28—38 (см. вариант 2 в табл. 3), и это зависело от уровня шума при разрешении гармоник в разных классах прилива, который определялся в основном длиной ряда.

В табл. 3 приведены результаты выборки экстремумов приливных колебаний уровня моря во всех пунктах за период 2015—2033 гг. с дискретностью 10 мин. При расчете нодальных параметров (редукционного множителя  $f$  и поправки фазы  $u$ ) включались волны от второй степени (члена) потенциала. Волны потенциала третьей степени не включались, так как по последним данным [3] они расходятся с теоретическими значениями. Подобный прием расчета приближенно соответствует формулам Дудсона для расчета нодальных значений волн. В процессе предвычисления нодальные параметры пересчитывались на каждый месяц года.

Для того чтобы можно было провести сравнение с ранее предложенными картами максимальных приливных колебаний уровня, были рассчитаны экстремальные значения без учета долгопериодных приливов (см. вариант 2 в табл. 3). При расчете средний уровень моря задавался равным нулю.

Сравнение с данными, приведенными в [10], показало, что значения максимумов и минимумов существенно расходятся с данными автора, приведенными в табл. 3. В Таллине по данным работы [10] минимум составил  $-10$  см, по данным автора  $-18$  см. В Ленинграде (Горный институт) по данным работы [10] экстремумы равны  $53$  и  $-38$  см, а по данным табл. 3 они составили  $23$  и  $-23$  см.

На рис. 4 представлена карта максимальных приливных колебаний в Финском заливе (без учета долгопериодных приливов — вариант 2).

Таблица 3

Экстремальные (наибольшие и наименьшие) значения уровня моря (см)  
за период 2015—2033 гг. в пунктах Финского залива по всем волнам (вариант 1)  
и без учета долгопериодных приливов (вариант 2)

Номер пункта	Пункт	Вариант 1				Вариант 2			
		Число волн	ВТУ*	НТУ**	Размах	Число волн	Мак	Мин	Размах
1	Ристна	44	19	-20	39	39	3,6	-2,7	6
2	Лехтма	36	13	-18	31	33	4,5	-3,3	8
3	Палдиски	41	19	-19	38	38	5,1	-4,4	10
4	Таллинн	40	25	-18	43	35	6,1	-5,7	12
5	Кунда	24	31	-21	52	18	8,6	-7,0	16
6	Гогланд	41	28	-26	54	38	8,8	-7,2	16
7	Силламяе	29	18	-16	34	27	10,7	-9,1	20
8	Мощный	30	33	-26	59	28	10,7	-8,0	19
9	Нарва	34	26	-19	45	32	9,2	-7,1	16
10	Шепелево	36	22	-16	38	33	11,7	-8,6	20
11	Кронштадт	38	25	-25	50	32	12,2	-9,4	22
12	Ломоносов	41	33	-30	63	39	13,1	-10,3	23
13	Горный институт	42	23	-23	46	36	12,0	-10,0	22
14	Невская устьевая	41	33	-31	64	35	12,7	-9,4	22
15	Озерки	35	33	-29	62	30	11,9	-8,8	21
16	Приморск	37	34	-30	64	30	12,0	-9,2	21
17	Выборг	37	27	-23	50	31	10,1	-7,8	18
18	Хамина	43	26	-23	49	37	10,1	-8,0	18
19	Хельсинки	42	21	-20	41	37	6,1	-6,5	13
20	Ханко	36	18	-20	38	30	3,6	-4,9	8
21	Дегербу	34	12	-17	29	28	2,7	-1,9	5

\* Высота наивысшего возможного уровня.

\*\* Высота наинизшего возможного уровня.

В работе Альтшулера [1] приведена карта максимальных приливных колебаний уровня Балтийского моря. Он опирался на константы Магаарда и Краусса [17] и частично на собственные результаты обработки методом Дарвина данных наблюдений, выполненных в августе (в работе год обработки не указан и пункты не названы). Расчет производился по методике Дуванина, которая учитывает только основные восемь волн прилива или даже четыре главные волны (в работе информация на этот счет отсутствует). Согласно карте Альтшулера, приведенной также в [13], в Финском заливе величина максимальных колебаний (размах) возрастает от 5 см на входе до 20 см в вершине залива. Эти данные хорошо согласуются с расчетами автора по варианту 2 на качественном уровне (см. табл. 3). В количественном отношении есть существенные расхождения. Так, по линии Хельсинки — Таллин проходит изолиния 12—13 см (см. рис. 4), а не 6 см, как на карте Альтшулера. И далее к востоку возрастание размаха колебаний происходит быстрее.

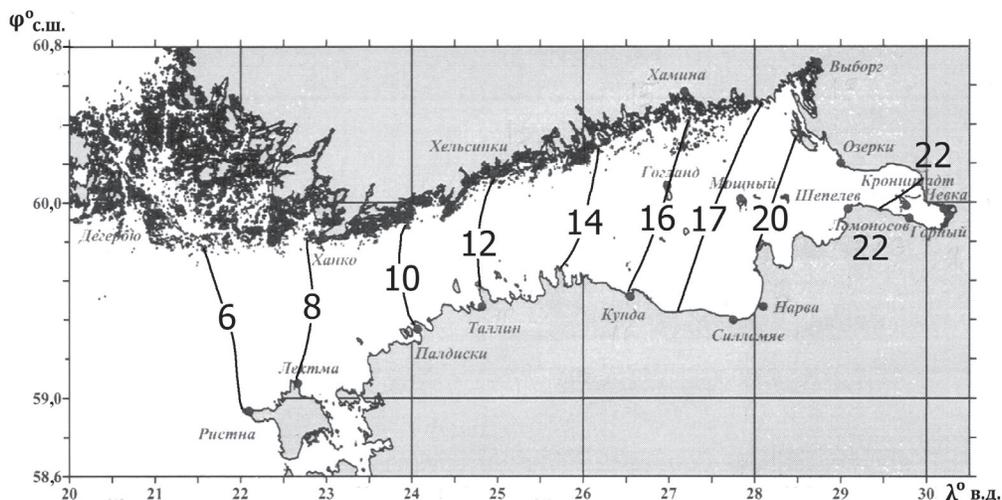


Рис. 4. Максимальные приливные колебания уровня моря (см)  
(без учета долгопериодных приливов — вариант 2).

Приведенная в Справочном издании [14] карта максимальных приливных колебаний уровня построена на основе удвоенной суммы амплитуд четырех волн прилива и в целом гораздо хуже карты Альшулера. Например, по данным табл. 1 для Гогланда удвоенная сумма амплитуд четырех волн равна 11 см. Величина (размах) максимальных колебаний по варианту 2 в Гогланде будет в действительности 16 см, а с учетом всех волн приливов достигнет 54 см (см. табл. 3).

Наконец, на рис. 5 представлена карта автора наибольших возможных один раз в 19 лет приливных колебаний уровня с учетом долгопериодных приливов, в которые включены волны, отражающие сезонные колебания (вариант 1, табл. 3).

В настоящей работе автор не рассматривает подробно вопрос о долгопериодных колебаниях и приливах в Финском заливе. Тем не менее остановимся на некоторых ключевых вопросах. Прежде всего, отметим, что обработка и анализ среднемесячных данных об уровне моря недостаточны для решения проблемы долгопериодных приливов. Во-первых, среднемесячные данные не эквидистантны, что приводит к ошибкам расчета констант гармоник. Во-вторых, по этим данным нельзя получить сведения о приливах с периодом месяц и менее. Поэтому в настоящей работе автор опирался в основном на среднесуточные данные, полученные с помощью применения фильтра нижних частот к ежечасным реализациям. К сожалению, на многих станциях в базе данных ГОИН длительность таких серий еще недостаточна для достоверного выделения всего спектра долгопериодных приливов.

В частности, нодальный прилив  $Mn$  по результатам анализа показал существенное расхождение с теоретической статической величиной (на широте  $60^\circ$  должен быть равен 1,1 см с фазой  $360^\circ$ ). Уровень шума вблизи периода этого прилива настолько высок, что даже при анализе среднемесячных данных для

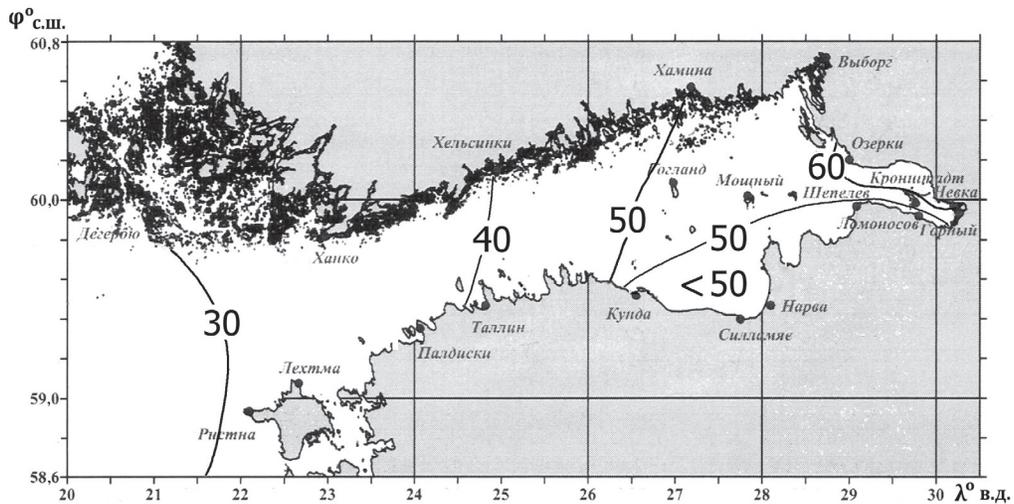


Рис. 5. Максимальные возможные приливные колебания уровня (см) (с учетом долгопериодных приливов — вариант 1).

Кронштадта за 76 лет за период 1936—2011 гг. (база данных ГОИН) амплитуда прилива оказалась ниже 95 %-ного доверительного интервала. Поэтому этот прилив на всех станциях не был включен в список долгопериодных волн (что приближенно может занижить оценку размаха на 2—3 см). Из группы приливов *Mm*, *Msf*, *Mf*, *Mtm*, *Msw* достоверные оценки были получены только для лунного месячного прилива *Mm* (среднее векторное значение для 16 станций равно 0,48 см, фаза составила 284°) и девятисуточного прилива *Mtm*, который имеет средние по данным для 11 станций значение 0,35 см и фазу 203°.

Что касается так называемых метеорологических приливов [18], формирующих сезонные колебания уровня моря, то здесь были получены достоверные результаты (выше 95 %-ного доверительного интервала) для гармоник *Sa*, *Ssa*, *Sqa*. При этом средние для Финского залива значения этих волн равны для гармоники *Sa* 13,8 см и фаза 294°, для гармоники *Ssa* 4,25 см и фаза 204° и для гармоники *Sqa* 1,86 см и фаза 223°. Третьгодовая гармоника *Sta* на большинстве станций по амплитуде была ниже доверительного интервала. Годовая гармоника в Финском заливе по этим значениям имеет максимум в октябре, а минимум в апреле. Влияние полугодовой и третьгодовой гармоники приводит к смещению максимума на декабрь.

Приведенные выше значения констант «сезонных» гармоник следует относить к периоду конца XX и начала XXI веков, так как в зависимости от периода осреднения их константы изменяются, что вызвано изменчивостью гидрометеорологического режима. По-видимому, оптимальным периодом обработки этих гармоник следует считать период 30 лет, принятый как основной для расчета климатических характеристик. Увеличение периода обработки до 40 лет и более, как рекомендуется в работе [8], будет приводить к уменьшению амплитуды гармоник,

так как годовая гармоника и ее обертоны не являются строго детерминированным сигналом, а относятся к квазистационарным процессам. В отношении приливов  $Mn$ ,  $Mm$ ,  $Msf$ ,  $Mf$ ,  $Mtm$ ,  $Msw$ , которые представляют строго детерминированный сигнал, увеличение периода обработки позволяет получить более устойчивые оценки.

Значения экстремальных уровней, полученные с учетом долгопериодных приливов, сравнивать не с чем. Имеется одна работа, где приведены экстремальные уровни для Таллина и Ленинграда [10]. В работе [6] отмечалось неверное определение констант прилива для Ленинграда и Таллина этими авторами. На расчет экстремальных уровней совершенно не влияет время углов положений волн: местное, поясное или специальные углы, но ошибки амплитуд, безусловно, влияют. Если же указанные авторы ошиблись только с переводом времени, то на результат это не повлияет.

Из рис. 5 видно, что размах наибольших возможных приливных колебаний в Финском заливе резко возрастает к востоку, достигая 60 см. Этот рост обусловлен в основном увеличением величины годовой волны. Представленные на рис. 4 и 5 данные свидетельствуют о необходимости учета приливных колебаний уровня в научных целях и для производства статистических расчетов при инженерных изысканиях.

### Сезонный ход амплитуды и фазы волны $M_2$ в Финском заливе

В работе [5] приводились предварительные данные о сезонной изменчивости прилива  $M_2$  на нескольких станциях в Финском заливе. Было показано, что разброс средних за месяц констант этой волны настолько большой, что для получения значимой зависимости требуются ряды значений за 30 лет и более. Вследствие близости амфидромии волны  $M_2$  к северной части Финского залива амплитуды этого прилива столь малы, что устойчивого годового хода констант здесь получить не удастся. Небольшое увеличение амплитуды волны  $M_2$  происходит в крайней восточной части залива, и поэтому здесь в средних значениях, полученных из средних за месяц оценок, сезонный ход проявляется. Тем не менее в целом вид и характер сезонного хода представляет только теоретический интерес.

На рис. 6 представлен сезонный ход амплитуды и фазы волны  $M_2$  в Финском заливе. Из рисунка видны общие черты годового хода амплитуды и фазы волны  $M_2$  для всех станций. Максимум амплитуды наблюдается в июле — августе (повышение на 10 % от среднего), а увеличение фазы происходит до мая — июня. Небольшое повышение амплитуды в октябре носит случайный характер и связано с ростом величины разброса в этот месяц; наиболее заметно оно в Шепелево, где ряд обработки самый короткий. Минимум амплитуды отмечается в феврале, а минимум фазы — в октябре — ноябре. Подобный вид сезонного хода констант волны  $M_2$  отличается от классического типа, наблюдаемого на акватории арктических морей [3]. Физический механизм, вызывающий сезонный ход волны  $M_2$  в Финском заливе, может быть комплексным и связан с изменчивостью не только гидрологических процессов, но также и атмосферных.

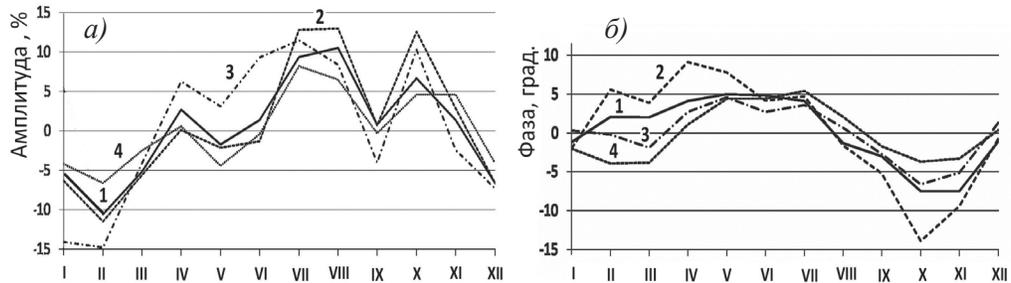


Рис. 6. Сезонный ход амплитуды (а) и фазы (б) волны  $M_2$  в Финском заливе.

1 — Кронштадт (34 года), 2 — Горный институт (34 года),  
3 — Выборг (31 года), 4 — Шепелево (19 лет).

### Многолетняя изменчивость амплитуд и фаз волны $M_2$

Предварительно была рассмотрена многолетняя изменчивость всех основных волн прилива в пунктах с длительными рядами их констант. Однако здесь представлена многолетняя изменчивость самых надежных результатов для волны  $M_2$ . Разброс средних годовых оценок суточных волн  $K_1$  и  $O_1$  в два раза больше, чем у волны  $M_2$ . На рис. 7 представлен многолетний ход средних годовых оценок амплитуды и фазы волны  $M_2$  в Кронштадте (35 лет), Горном институте (35 лет), Выборге (31 год) и Шепелево (19 лет).

Оценка линейных трендов годовых оценок амплитуды и фазы волны  $M_2$  в этих пунктах показала следующее. В пунктах Кронштадт, Горный институт, Шепелево отсутствует значимый тренд в амплитуде (рис. 7 а). При этом наблюдается

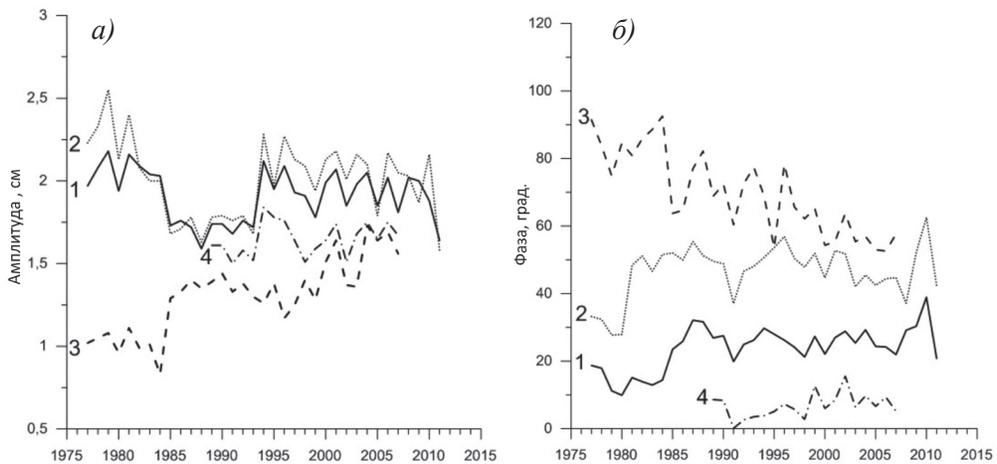


Рис. 7. Временной ход годовых оценок амплитуды (а) и фазы (б) волны  $M_2$ .

1 — Кронштадт, 2 — Горный институт, 3 — Выборг, 4 — Шепелево.

несущественное уменьшение амплитуды волны  $M_2$ : от  $-0,002$  см/год в Кронштадте до  $-0,04$  см/год на станции Горный институт, и его можно считать пренебрежимо малым. В Шепелево происходит несущественное увеличение амплитуды, равное  $0,0047$  см/год. Таким образом, однозначности результатов в оценке тренда амплитуды волны  $M_2$  для этих трех пунктов не получено.

В Выборге линейный тренд амплитуды волны  $M_2$  имеет значимый характер и составляет  $+0,019$  см/год. За период 19 лет увеличение амплитуды достигнет примерно  $0,37$  см, что находится на границе 95 %-ного доверительного интервала. В отношении линейного тренда фазы волны  $M_2$  получены более определенные результаты. В пунктах Кронштадт, Горный институт, Шепелево и Выборг наблюдается значимый линейный тренд. В первых трех пунктах происходит увеличение фазы волны  $M_2$  со скоростью  $+0,37^\circ$  в год в пункте Кронштадт и  $+0,23^\circ$  в год на станциях Горный институт и Шепелево. На станции Выборг за период 1977—2007 гг. отмечается уменьшение фазы со скоростью  $-0,955^\circ$  в год. При сохранении такой скорости изменение фазы волны  $M_2$  за 19 лет после 2007 г. составит  $18^\circ$ , что, возможно, потребует пересчета гармонических постоянных за очередной 19-летний цикл.

### Заключение

Большинство исследователей приливов Финского залива в XX веке опирались на недостаточно достоверные сведения о гармонических постоянных приливов [6]. При построении котидальных карт основных волн приливов, карт характера, максимальных значений и наибольших возможных значений прилива автор использовал новую, существенно более точную базу данных о гармонических постоянных для 21 пункта, что позволило получить более достоверные сведения о различных характеристиках приливов.

Вопрос о том, следует ли учитывать приливы в Финском заливе при инженерных изысканиях, уже не является дискуссионным, так как, по мнению автора, учет приливов на основе новых сведений позволяет получить наиболее достоверные статистические оценки в широком диапазоне колебаний уровня.

С помощью приведенных в работе карт основных волн приливов и общих сведений о долгопериодных приливах появилась возможность рассчитать приливные колебания уровня в любой части акватории Финского залива. Такие временные ряды могут представлять самостоятельный интерес, а также могут быть использованы для получения остаточных рядов (данные наблюдений минус результаты предвычислений).

По мнению автора работы, сезонная изменчивость приливов Финского залива представляет только теоретический интерес и нет необходимости в ее учете в практических целях вследствие малости самого эффекта.

Не получен однозначный ответ на очень важный вопрос о вековом ходе гармонических постоянных основных волн приливов. Можно сделать предположение о влиянии местных факторов на тренд амплитуды и фазы волны  $M_2$  в Выборге.

Как будет изменяться небольшой тренд фазы в пунктах Кронштадт, Горный институт, Шепелево, неясно. Ответ на этот вопрос может быть получен с помощью численного моделирования и определения конкретных гидрологических или атмосферных факторов, вызывающих тренд констант прилива.

В заключение хотелось бы выразить глубокую благодарность поколениям наблюдателей на постах российского побережья и островов Финского залива. Как показали результаты обработки данных этих наблюдений, все они имеют самое высокое качество в сравнении с данными, полученными для других окраинных морей России.

### Список литературы

1. *Альциулер В.М.* Максимальные приливные колебания Балтийского моря // Труды ГОИН. 1980. Вып. 152. С. 110—112.
2. *Владимирский Н.П., Стахевич В.С.* Руководство по обработке и предсказанию приливов. Л.: изд-во Гидрогр. управл. ВМФ СССР, 1941. 347 с.
3. *Войнов Г.Н.* Приливные явления в Карском море. СПб: изд-во Русского географического общества, 1999. 109 с.
4. *Войнов Г.Н.* Приливы Финского залива / В сб.: Материалы Первой научн. конф. СПбГУ «Год Финского залива — 2014». СПб. 2012. С. 57—62.
5. *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.
6. *Войнов Г.Н.* Новые сведения о приливах в Финском заливе Балтийского моря // Ученые записки РГГМУ. 2018. Т. 53. С. 83—96.
7. *Медведев И.П., Рабинович А.Б., Куликов Е.А.* Приливные колебания в Балтийском море // Океанология. 2013. Т. 53, № 5. С. 596—609.
8. *Медведев И.П.* Сезонные колебания уровня Балтийского моря // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 42—54.
9. *Михайлов Ю.Д.* Оценка приливных колебаний уровня в Таллине и Кронштадте // Труды ГОИН. 1962. Вып. 69. С. 87—91.
10. *Перескоков А.И., Сидченко А.Н.* Приливные колебания уровня у восточного побережья Балтийского моря // Изв. ВГО. 1981. Т. 113, вып. 3. С. 264—268.
11. *Помыткин Б.А.* Приливо-отливные колебания уровня в Финском заливе // Сборник работ Ленингр. ГМО. 1977. Вып. 9. С. 154—160.
12. *Рундо А.М.* Приливо-отливные явления в Ботническом и Финском заливах // Бюлл. Российского гидрологического института. 1921. № 9. С. 8—10.
13. Справочник. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 1. Балтийское море. Вып. 1. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 175 с.
14. Справочное издание. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 3. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб: Гидрометеоздат, 1992. 450 с.
15. *Feistel R., Nausch G., and Wasmund N.* State and evolution of the Baltic Sea. 1952—2002. A detailed 50-year survey of meteorology and climate, physics, chemistry, biology and marine environment. Hoboken: Willey-Interscience, 2008. 703 p.
16. *Lisitzin E.* Die gezeiten des Finnischen meerbusens // Fennia. 1944. B. 68. No. 2. 19 s.
17. *Magaard L. and Krauss W.* Spektren der Wasserstandsschwankungen der Ostsee im Jahre 1958 // Kieler Meeresforsch. 1966, B. 22, h. 2. S. 155—162.
18. *Pugh D.T.* Tides, surges and mean sea-level. A handbook for engineers and scientists. New York: J. Willey. 1987. 472 p.
19. *Witting R.* Tidvattnen Ostersjon och Finska Viken // Fennia. 1911. V. 29. No. 2. 84 p.