

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

Научная статья

УДК 556
EDN: BFLTXP

Сезонная изменчивость приливов в Баренцевом и Карском морях

Г. Н. Войнов^{1, 2, ✉}, В. Н. Сухачев^{1, 3}

¹ Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова, Москва, Россия

² Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
✉ voinovgn@mail.ru

Поступила в редакцию 26.03.2024; одобрена после рецензирования 25.06.2024;
принята к публикации 29.01.2025.

Аннотация

Цель. Исследовать особенности сезонной изменчивости основных полусуточных и суточных волн прилива в годовом цикле в Баренцевом и Карском морях по многолетним данным наблюдений за уровнем на всех пунктах (станциях), оценить структуру сезонного хода прилива на примере волн M_2 и K_1 и физические механизмы его формирования – цель данного исследования. **Методы и результаты.** Работа выполнена по данным многолетних мареографических ежечасных наблюдений за уровнем и срочных (четыре раза в сутки) измерений уровня в основном из базы данных ЕСИМО с 1977 г. до конца наблюдений. Также использованы данные морских гидрометеорологических ежегодников с 1951 г. На основе гармонического анализа приливов с помощью метода наименьших квадратов ежечасных годовых и месячных временных рядов уровня моря оцениваются средние месячные значения амплитуд и фаз основных полусуточных и суточных волн прилива в 17 пунктах в Баренцевом море и 19 пунктах – в Карском. В целом размах сезонной изменчивости волны M_2 в Баренцевом море увеличивается с севера на юг и наиболее существенно – на юго-востоке моря. Согласно нашей классификации, классический тип 1 сезонного хода волны M_2 не является преобладающим и составляет 35%, а чаще наблюдается аномальный тип 3, который достигает 41% от 17 пунктов. На акватории Карского моря в июле – сентябре наблюдается в основном классический тип 1 сезонного хода волны M_2 с максимумом амплитуды и минимумом фазы, который проявляется в 74% случаев, зафиксированных от 19 пунктов. **Выводы.** В каждом пункте Баренцева и Карского морей наблюдается индивидуальный устойчивый во времени сезонный годовой ход основных полусуточных, суточных и мелководных волн прилива. Сезонный ход амплитуд и фаз волн приливов в основном существенно различается в пунктах по степени выраженности, форме кривых, времени наступления экстремальных значений и размаху колебаний. Причем сезонные изменения констант полусуточных и суточных волн различны. В Баренцевом море влияние дрейфующего ледяного покрова на сезонный ход основных полусуточных волн проявляется значительно слабее, чем в Карском. В сезонном ходе амплитуд и фаз суточной волны K_1 преобладает полугодовой период. Максимальные отклонения амплитуд от среднего годового значения (нормы) составляют в основном 10–20%, фаз – 6–16°.

Ключевые слова: Арктика, Баренцево море, Карское море, гармонический анализ приливов, сезонный ход волны M_2 , сезонный ход волны K_1 , амплитуда волны, фаза волны

© Войнов Г. Н., Сухачев В. Н., 2025

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме НИТР 4.6.14 Росгидромет.

Для цитирования: Войнов Г. Н., Сухачев В. Н. Сезонная изменчивость приливов в Баренцевом и Карском морях // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 2. С. 123–145. EDN BFJTXP.

Original article

Seasonal Variation of Tides in the Barents and Kara Seas

G. N. Voinov^{1, 2, ✉}, V. N. Sukhachev^{1, 3}

¹ N. N. Zubov State Oceanographic Institute, Moscow, Russia

² Arctic and Antarctic Research Institute, Saint-Petersburg, Russia

³ Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

✉ voinovgn@mail.ru

Abstract

Purpose. The paper aims at the studies of features of seasonal variation of the main semidiurnal and diurnal tides in the annual cycle in the Barents and Kara seas according to the long-term data of sea level observations at all points (stations). The structure of seasonal course of the tide is estimated on the example of the M_2 and K_1 tides and physical mechanisms of its formation.

Methods and Results. The work was carried out according to the data of long-term tide gauge hourly observations of the sea level and 6-hourly interval series of the sea level measurements mainly from the ESIMO database from 1977 to the end of observations. Marine hydrometeorological year-book data since 1951 were also used. On the basis of the harmonic analysis of tides with the least square method of hourly annual and monthly time series of sea level, the average monthly values of amplitudes and phases of the main semidiurnal and diurnal tides at 17 points in the Barents Sea and 19 points in the Kara Sea are estimated. In general, the range of seasonal variability of the M_2 tide in the Barents Sea increases from north to south and is most significant in the southeast of the sea. According to our classification, classic type 1 of the seasonal course of the M_2 tide is not predominant and is 35%, and anomalous type 3 is the most observed one, reaching 41% of 17 points. In the Kara Sea, classic type 1 of seasonal course of the M_2 tide is mainly observed with an amplitude maximum and phase minimum in July–September, manifesting itself in 74% of all cases in 19 points.

Conclusions. At each point of the Barents and Kara seas, individual time-stable seasonal annual course of main semidiurnal, diurnal and shallow tides is observed. The seasonal course of harmonic constants differs significantly among the points in terms of the degree of severity, shape of curves, time of occurrence of extreme values and magnitude of oscillation range. Moreover, seasonal variations of the constants of semidiurnal and diurnal tides are different. In the Barents Sea, the influence of drifting ice cover on the seasonal variations of main semidiurnal tides is much weaker than in the Kara Sea. The seasonal variations of amplitudes and phases of the daily K_1 tide are dominated by the semiannual period. The maximum deviations of amplitudes from the mean annual value (norm) are mainly 10–20%, and those of phases – 6–16°.

Keywords: Arctic, Barents Sea, Kara Sea, harmonic analysis of tides, seasonal course of the M_2 tide, seasonal course of the K_1 tide, amplitude, tide phase

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the state assignment on the RTW 4.6.14 Rosgidromet theme.

For citation: Voinov, G.N. and Sukhachev, V.N., 2025. Seasonal Variation of Tides in the Barents and Kara Seas. *Physical Oceanography*, 32(2), pp. 151-173.

Введение

Первые сведения о внутригодовой изменчивости прилива содержались в работе А. М. Бухтеева¹. В этой работе были приведены результаты анализа 12-месячных ежечасных серий приливов за 1906–1907 гг. в Екатерининской гавани (п. Полярное, Баренцево море) по методу Дарвина. Но ввиду отсутствия выраженной изменчивости в целом прилива в *годовом* цикле и присутствия сезонных изменений (небольших по величине) только в амплитуде волны M_2 А. М. Бухтеев не интерпретировал это явление как сезонную изменчивость.

Впервые в мировой практике анализа приливов данные об их сезонной изменчивости и *аналитическая модель* годового хода возмущения волны M_2 были представлены в работе Р. Х. Коркана [1]. Эта работа была новаторской и, может быть, поэтому долгое время оставалась невостребованной. Модель Р. Х. Коркана в предвычислении прилива стала применяться только в конце XX в. В результате реализации проекта освоения Северного Морского пути (СМП) и изучения приливов арктических морей России в 1930–40-е гг. были получены кратковременные (месячные и полумесячные) серии наблюдений за уровнем моря на ряде полярных станций. Результаты обработки приливов методом Дарвина в морях Карском и Лаптевых опубликованы в восьми выпусках материалов².

Уже обзор результатов первых выпусков этих материалов позволил В. Ю. Визе [2] сделать вывод, что сезонная изменчивость приливов арктических морей – повсеместное явление. На основании этих данных установлено, что зимой амплитуда прилива уменьшается, а полная вода наступает позже, чем в летнее время. Автор указанной работы предложил относить гармонические постоянные (константы) прилива, определенные когда-либо в конкретном пункте, к сезону или даже к конкретному месяцу года. В дальнейшем автор работы [3] объяснял внутригодовые колебания констант прилива влиянием не только колебаний ледовитости арктических морей, но и многолетних изменений ветрового режима.

¹ Бухтеев А. М. Наблюдения приливов на Мурмане и обработка этих наблюдений. Санкт-Петербург : Типография Морского Министерства, в Главном Адмиралтействе, 1910. 56 с. URL: <https://elib.rgo.ru/safe-view/123456789/227016/1/0L7Qui4yOTFfQnVodGVldiB-VLk0uIE5hYmx5dWRlbnml5YSBwcmlsaXZvdsKgbmEgTXVybfWFuZSBpIG8ucGRm> (дата обращения: 02.04.2025).

² Материалы к изучению приливов арктических морей СССР. Л. : Главсевморпуть, 1935. 51 с. (Труды Арктического института ; Т. 36, вып. 1) ; Гидрология. Материалы к изучению приливов арктических морей СССР. Л. : Главсевморпуть, 1936. 80 с. (Труды Арктического института ; Т. 52, вып. 2) ; Материалы по изучению приливов арктических морей СССР. Л. : Главсевморпуть, 1937. 95 с. (Труды Арктического института ; Т. 81, вып. 3) ; Материалы по изучению приливов арктических морей СССР. Л. : Изд-во Главсевморпути, 1938. 82 с. (Труды Арктического института ; Т. 119, вып. 4) ; Материалы по изучению приливов арктических морей СССР. М. ; Л. : Изд-во Главсевморпути, 1940. 199 с. (Труды Арктического института ; Т. 153, вып. 5-6) ; Материалы по изучению приливов арктических морей СССР. Л. : Главсевморпуть, 1952. 536 с. (Труды Арктического института ; Т. 42, вып. VII) ; Материалы по изучению приливов арктических морей СССР. Л. : Главсевморпуть, 1952. 295 с. (Труды Арктического института ; Т. 50, вып. 8).

С этих публикаций по мере получения новых наблюдений начались многочисленные исследования сезонной изменчивости приливов арктических морей России³ [4]. Для оценки влияния ледяного покрова на константы прилива в работе [4] предложено использовать коэффициенты гашения приливной волны на одном километре ее пути и соответствующего запаздывания в долях часа. Впоследствии в работе [5] было показано, что формулы, используемые для расчета этих коэффициентов, дают крайне большие ошибки расчета (до 100%). Поэтому полученные связи не являются значимыми и надежными.

Многие работы середины XX в. в ключевом вопросе о сезонной изменчивости прилива с позиции современной науки оказываются не полностью достоверными и даже ошибочными^{4,5} [6, 7]. Причины этого следующие.

1. Недостатки методологии анализа приливов того времени и ошибки применяемых методов анализа приливов.

2. Недостаточность непрерывных годовых серий наблюдений за приливами для получения устойчивых среднемесячных значений констант волн или их сезонного хода.

3. Недооценка прогрессивной модели Р. Х. Коркана [1] и применение негармонических характеристик (прикладной час и величина прилива) для оценки сезонного хода приливов.

4. Техническая причина – отсутствие мощных вычислительных средств до начала 1970-х гг.

Раскроем содержание основной первой причины (кроме вполне понятных остальных). Ранее широко использовались результаты обработки 15-суточных серий по методу Дарвина и по Адмиралтейскому методу (АМ) анализа приливов за сутки. В 1960-е гг. появилось много работ о недостатках метода Дарвина для 30 и 15 сут, особенно⁶ [8]. Константы волн, полученные из анализа полумесячных серий, имеют выраженную временную периодичность в зависимости от астрономических условий. В еще большей степени это касается результатов анализа суточных циклов наблюдений по АМ. Совместное использование результатов обработки месячных, полумесячных и особенно суточных серий для изучения сезонных изменений волн прилива недопустимо в принципе.

Серьезной методической ошибкой многих отечественных работ был прием арифметического осреднения результатов обработки (амплитуд и фаз волн), а не расчет векторного среднего. Различия результатов осреднений при больших величинах разброса амплитуд и фаз прилива могут быть большими.

³ *Коптева А. В.* Влияние ледяного покрова на скорость распределения приливной волны. Москва : Изд-во Главсевморпути, 1945. 7 с. (Доклады Юбилейной сессии / Арктический научно-исследовательский институт Главсевморпути при СНК СССР. XXV лет. 1920–1945).

⁴ *Дремлюг В. В.* Приливы Чукотского моря и моря Бофорта в связи с гидрометеорологическими условиями // Труды ВАМУ. 1950. Изд-во Главсевморпути. 60 с.

⁵ *Коптева А. В.* Приливные явления арктических морей (Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского). Ленинград, 1959. Книга 1, главы 1, 2. 193 с. // Госфонд ГНЦ РФ ААНИИ. Инв. № Р-5562 ; *Коптева А. В.* Приливные явления арктических морей (Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского). Ленинград, 1959. Книга 2, главы 3, 4. С. 194–317 // Госфонд ГНЦ РФ ААНИИ. Инв. № Р-5563 ; *Коптева А. В.* Приливные явления арктических морей (Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского). Ленинград, 1959. Книга 3, главы 5, 6, 7. С. 318–482 // Госфонд ГНЦ РФ ААНИИ. Инв. № Р-5564.

⁶ *Альтшулер В. М.* Практические вопросы анализа и расчета морских приливов. Ленинград : Гидрометеозиздат, 1966. 311 с.

Это, кстати, было показано в работе [9], хотя в дальнейшем не использовался прием векторного осреднения.

Нигде не оценивались ошибки расчета того или иного метода и точность полученных волн прилива. Контроль вычислений проводился не по остаточному ряду, а по предвычисленному. Поэтому брак в наблюдениях не распознавался.

При применении разнородных (по обработке) данных с приемом арифметического осреднения можно получить полностью недостоверную зависимость. Так произошло, например, в работе [6], где приведены ошибочные значения сезонных изменений амплитуд и фаз волны M_2 для о. Диксон, м. Челюскина, о. Котельного, б. Тикси. Тем не менее основные выводы этой работы остаются актуальными и в наше время.

При исследовании приливов Чукотского моря и моря Бофорта в работе⁴ основным методом гармонического анализа был АМ. Для определения сезонной изменчивости приливов в пунктах м. Шмидта, о. Врангеля и о. Ратманова осреднялись (арифметически) результаты анализов за несколько лет по отдельным месяцам года. Но точность АМ невысока и зависит от влияния непериодических колебаний уровня⁶. Поэтому полученные результаты кривых сезонного хода волны M_2 существенно отличаются от современных оценок [10, 11].

В монографической работе по приливам Северного Ледовитого океана (СЛО) [7] сезонная изменчивость волны M_2 исследовалась в Баренцевом, Белом и арктических (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское) морях. В каждом из этих морей рассмотрены 1–2 пункта с непрерывными ежечасными годовыми сериями. Для построения сезонного хода амплитуд и фаз волны M_2 широко использованы результаты обработки полумесячных серий. Именно поэтому даже с учетом результатов обработки трех годовых рядов (один взят из работы¹) сезонный ход констант волны M_2 в Екатерининской гавани остался неопределенным. Для губы Териберка приведены также сомнительные результаты.

Позднее в работе [8] также рассматривался п. Екатерининская гавань, но были взяты результаты обработки *месячных* серий, что позволило получить достоверный сезонный ход в амплитуде прилива, а в фазе он остался все же неопределенным.

В работе [7] была предпринята попытка классификации сезонной изменчивости прилива в арктических морях, но в качестве критериев использованы негармонические постоянные – прикладной час и средняя сизигийная величина прилива. Если прикладной час связан с фазой волны M_2 , то величина прилива определяется по значениям амплитуд всех основных волн. То есть применение таких критериев не имеет физического смысла для оценки сезонного хода волны M_2 и тем более для его типизации. По существу, это означало отказ от применения результатов гармонического анализа. Поэтому какого-либо прогресса в понимании механизмов сезонного хода волн прилива достигнуто не было.

К сожалению, в обширной работе⁵ по приливному явлению арктических морей были допущены уже отмеченные выше недостатки (пп. 1–3 выше). Как и в других работах, для оценки сезонного хода привлекались результаты обра-

ботки полумесячных серий. При оценке среднего сезонного годового хода амплитуд и фаз волны M_2 применялся прием арифметического осреднения. В итоге ни по одному из приводимых в работе восьми пунктов не было получено устойчивого внутригодового сезонного хода амплитуд и фаз волны M_2 . По существу, был выявлен только тренд в отдельные сезоны года.

Обзор работ по объяснению феномена сезонного хода прилива в XX в. содержится в публикациях [10, 11]. Следуя этому обзору, отметим, что в работах [12, 13] была дополнена аналитическая модель Р. Х. Коркана [1] и установлено, что годовые возмущения волн M_2 и S_2 подобны и вызываются возмущающими волнами, которые генерируются метеорологическими факторами и образуют годовую модуляцию в M_2 , а второстепенные волны MSK_2 и MKS_2 , возникающие за счет сил трения, вызывают полугодовую модуляцию. Для волны S_2 годовая изменчивость создается негравитационными компонентами волн T_2 и R_2 , которые связаны с метеорологическими причинами.

В теоретическом плане вопрос о влиянии ледяного покрова на приливные явления в арктических морях исследовался в работах [14, 15], в которых получены аналитические решения для частных случаев распространения волн Свердрупа и Пуанкаре в идеализированном канале на чистой воде и под ледяным покровом. В указанных работах авторы пришли к выводу о слабом влиянии дрейфующего льда на прилив и приливные течения.

Влияние ледяного покрова на приливную волну M_2 в Арктическом бассейне путем численных экспериментов изучено в работе [16]. В этой работе сделан вывод о слабом влиянии дрейфующего льда на распространение прилива.

В работе [17] по результатам моделирования приливной динамики в СЛЮ, покрытом дрейфующим льдом, сделан вывод о сильном влиянии припайного льда и слабом – дрейфующего льда на формирование приливов.

В начале XXI в. появились работы, где сезонные вариации волны прилива M_2 объяснялись не ледяным покровом, а иными факторами. В работе [18] в Северном море с помощью численных экспериментов с усвоением не только береговых наблюдений, но и альтиметрических измерений миссии *Topex-Poseidon* была установлена зависимость сезонного хода волны M_2 от метеорологических сил (до 60% сезонного хода).

Совершенно иной, но весьма показательный подход к объяснению сезонной изменчивости волны M_2 был продемонстрирован в работе [19]. На двумерной модели показано, что сезонная стратификация водных масс в Желтом и Восточно-Китайском морях отвечает за сезонную изменчивость волны M_2 . Обширное изучение сезонной изменчивости волны M_2 в Мировом океане с помощью численного моделирования с усвоением данных альтиметрических измерений за 19 лет и многолетних измерений уровня в пунктах было выполнено в работе [20]. Арктический регион освещен частично вследствие ограничений по траекториям спутников. В последних работах не учитывалось влияние метеорологических сил и речного стока на приливы. Ясно, что широкое поле для будущих исследований остается открытым.

Результаты массовой обработки многолетних временных рядов наблюдений за уровнем моря в арктических морях для изучения сезонной изменчивости приливов представлены в работах [10, 11, 21, 22].

Особенности сезонной изменчивости основных волн приливов в морях Белом, Лаптевых и Чукотском (всего в шести пунктах) рассмотрены в работе [23], где отмечаются существенные различия вида кривых сезонного хода как между пунктами в одном море, так и между регионами. При предвычислении приливов в морях рекомендуется учитывать сезонную изменчивость.

Из указанных выше работ следует, что в СЛО на шельфе арктических морей наблюдается наиболее существенная по величине сезонная изменчивость приливов в годовом цикле, которая не связана с астрономическими причинами.

В связи с новым проектом освоения и развития СМП в XXI в. возник запрос на детальные исследования закономерностей распространения морских приливов в шельфовой зоне арктических морей.

Цель настоящего исследования – рассмотреть особенности сезонной изменчивости основных волн приливов на всех полярных станциях в Баренцевом и Карском морях, где проводились многолетние ежечасные или срочные (четыре срока в сутки) наблюдения за уровнем моря.

Данные и методы

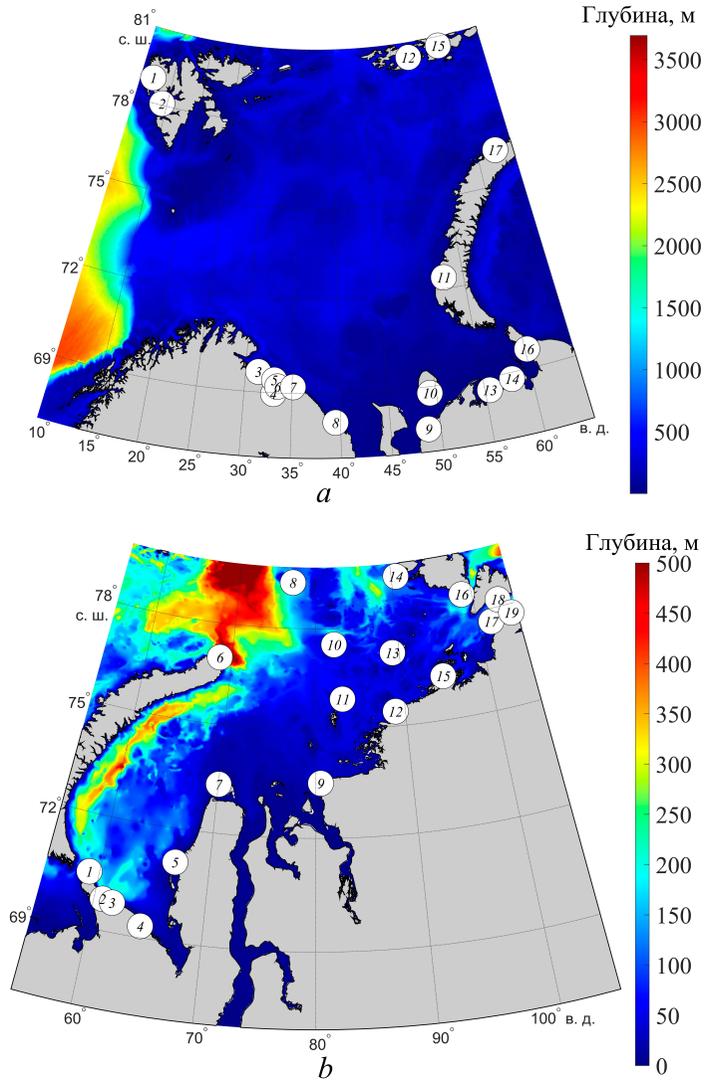
В качестве основы для обработки и анализа использовалась база данных ежечасных наблюдений по мареографу и срочных (четыре раза в сутки) футшточных измерений за уровнем моря с портала «Единой системы информации об обстановке в Мировом океане» (ЕСИМО) (ВНИИГМИ-МЦД) за период с 1977 г. до конца наблюдений. Наблюдения до 1977 г. в Баренцевом и Карском морях были выбраны по материалам, хранящимся в фондах ААНИИ (таблицы ТГМ-8 для ежечасных данных и ТГМ-1 для срочных измерений), а также по материалам². К изучению сезонной изменчивости полусуточных и суточных волн прилива привлечены материалы многолетних наблюдений за уровнем в 17 пунктах Баренцева моря и 19 пунктах Карского за различные периоды, в основном с 1962 (1977) по 1993 гг. (и позже) (рис. 1, таблица).

Самые продолжительные ряды ежечасных наблюдений за уровнем моря составляли более 50 лет (таблица). Но имелись пункты с непродолжительными ежечасными данными (б. Тихая – четыре года, устье р. Индига – семь лет). В основном длина рядов превышала период нодального цикла (19 лет).

В конце 1980-х – начале 1990-х гг. в СССР на смену ЭВМ пришли персональные компьютеры. Это позволило проводить обработку многолетних временных рядов наблюдений и применять гармонический анализ приливов с помощью метода наименьших квадратов (МНК).

В 1990-е гг. в ААНИИ был разработан *новый методический подход к обработке и анализу морских приливов*. Расширенный гармонический анализ морских приливов по МНК проводится по новой методике с включением волн, описывающих сезонную изменчивость основных полусуточных, суточных и мелководных волн [10, 11, 21]. Разработаны версии метода для анализов нерегулярных наблюдений, аномальных мелководных приливов, срочных наблюдений [10, 11, 24–28]. Принципиальное отличие новой версии расширенного гармонического анализа морских приливов по МНК от других версий

этого метода состоит в адекватном наблюдениям описании сезонной изменчивости приливных колебаний уровня моря для районов с сильно выраженным или аномальным ходом констант волн в годовом цикле.



Р и с. 1. Расположение пунктов (станций) наблюдений уровня Баренцева (*a*) и Карского (*b*) морей (названия пунктов см. в таблице)

F i g. 1. Location of sea level observation points (stations) in the Barents (*a*) and Kara (*b*) seas (see Table for names of points)

Исходные временные ряды наблюдений за уровнем Баренцева и Карского морей
Initial time series of sea level observations in the Barents Sea and the Kara Sea

Номер пункта / Point number	Название пункта / Point name	Северная широта, ° / Latitude, ° N	Восточная долгота, ° / Longitude, ° E	Период анализа / Analysis period	Количество лет анализа / Number of years analyzed
1	2	3	4	5	6
Баренцево море / Barents Sea					
1	Нью-Алесунд (западный Шпицберген) / New Alesund (West Svalbard)	78,93	11,95	1977–2018	42
2	Порт Баренцбург / Port of Barentsburg	78,07	14,25	1977–2012	36
3	Устье реки Печенга, Лиинахамари / Liinahamari (mouth of the Pechenga River)	69,63	31,37	1977–2004*	26
4	Порт Мурманск / Port of Murmansk	68,97	33,07	1977–2012	35
5	Залив Кислогубская ПЭС / Kislogubskaya PES Bay	69,40	33,10	1977–1992	16
6	Полярное (Екатерининская гавань) / Polyarnoe (Ekaterininskaya Gavan)	69,20	33,47	1958–2015	58
7	Губа Териберка / Teriberka Bay	69,20	35,10	1951–2015	65
8	Губа Иоканьга / Yokanga Bay	68,10	39,50	1977–1993	17
9	Устье реки Индига / Mouth of the Indiga River	67,70	48,77	1977–1989*	7
10	Бугрино (остров Колгуев) / Bugrino (Kolguev Island)	68,80	49,33	1977–1996**	20
11	Малые Кармакулы (полярная станция) / Malye Karmakuly (polar station)	72,37	52,68	1977–2012**	36
12	Бухта Тихая / Tikhaya Bay	80,35	52,80	1954–1957	4
13	Мыс Константиновский / Cape Konstantinovskiy	68,60	55,50	1977–1990*	11
14	Остров Варандей / Varandey Island	68,80	57,97	1978–1994*	11
15	Остров Хейса (ГМО им. Э. Т. Кренкеля) / Heiss Island (E. T. Krenkel observatory)	80,60	58,00	1972–1991	20
16	Мыс Белый Нос / Cape Belyy Nos	69,60	60,22	1962–1992**	31
17	Залив Русская Гавань / Russkaya Gavan Bay	76,20	62,58	1966–1991	26

Продолжение таблицы
Continuation of table

1	2	3	4	5	6
Карское море / Kara Sea					
1	Мыс Болванский Нос (ГМО им. Е. К. Федорова) / Cape Bolvanskiy Nos (named after E. K. Fedorov)	70,45	59,08	1962–1993	32
2	Югорский Шар (полярная станция) / Yugorskiy Shar (polar station)	69,82	60,77	1962–1989	28
3	Порт Амдерма / Port of Amderma	69,77	61,68	1962–1991	30
4	Устье реки Усть-Кара / Mouth of Ust-Kara River	69,30	64,50	1962–1999*	38
5	Мыс Харасавэй / Cape Kharasavey	71,10	66,75	1962–1979*	18
6	Мыс Желания / Cape Zhelaniya	76,95	68,57	1962–1983	22
7	Остров Белый (им. М. Е. Попова) / Belyu Island (named after M. E. Popov)	73,33	70,03	1945–1982*	10
8	Остров Визе / Wiese Island	79,48	76,98	1963–1980*	18
9	Остров Диксон / Dikson Island	73,50	80,50	1962–1992	31
10	Остров Уединения / Uyedineniya Island	77,50	82,20	1967–1990*	24
11	Острова Известий ЦИК / Izvestiy TSIK Islands	75,87	83,03	1962–2015	54
12	Мыс Стерлегова / Cape Sterlegova	75,42	88,90	1963–1990*	28
13	Остров Исаченко / Isachenko Island	77,15	89,20	1962–1990*	29
14	Остров Голомянный / Golomyannuy Island	79,55	90,62	1963–2006	44
15	Остров Правды / Pravdy Island	76,27	94,77	1962–1992	31
16	Острова Краснофлотские / Krasnoflotskie Islands	78,63	98,73	1968–1987	20
17	Острова Гейберга / Heiberg Islands	77,60	101,63	1967–1994	28
18	Бухта Солнечная / Solnechnaya Bay	78,22	103,07	1962–1991	30
19	Мыс Челюскина (ГМО им. Е. К. Федорова) / Cape Chelyuskina (E. K. Fedorov observatory)	77,72	104,28	1962–1996	35

* В ежечасных сериях наблюдений имеются пропуски / There are gaps in the hourly series of observations.

** Привлечены срочные измерения уровня, а также все кратковременные ежечасные наблюдения / The 6-hourly interval series of sea level measurements are considered as well as all short-term hourly observations.

В работе [21] впервые в мировой практике анализа приливов обнаружена сезонная изменчивость основных мелководных волн. Были выделены и описаны сложные комбинационные волны, ответственные за сезонную изменчивость основных мелководных волн M_4 , MS_4 , MN_4 , M_6 , $2MS_6$, $2SM_6$. С учетом этих новых мелководных волн расширенный гармонический анализ прилива по версии ААНИИ позволяет выделить из ежечасной годовой серии 225 волн прилива.

Первая в мировой практике классификация типов сезонной изменчивости приливов основных полусуточных (M_2 , S_2 , N_2) и суточных (K_1 и O_1) волн дана в работе [11] на основании результатов анализа месячных серий за многолетний период в 19 пунктах арктических морей.

Здесь нет возможности индивидуального описания особенностей гармонического анализа приливов в каждом пункте. В зависимости от длины рядов, их дискретности, качества наблюдений применялись различные версии МНК в несколько приближений. Для всех пунктов проводились анализы по МНК как в целом за весь период наблюдений, так и для годовых и месячных серий. Но в конечном виде для каждого пункта создавалась модель прилива с волнами, описывающими сезонный ход прилива. Также параллельно создавалась адекватная модель прилива в виде 12 файлов с гармоническими постоянными волн, выделяемых из месячных серий (32 волны в каждом месяце). При этом для месячных серий результаты по волнам K_1 , S_2 , N_2 во втором приближении исправлялись во избежание влияния второстепенных волн π_1 , ψ_1 , ϕ_1 , P_1 , K_2 , T_2 , R_2 , ν_2 по теоретическим соотношениям. При изучении внутrigодовой изменчивости прилива для волн M_2 , S_2 , N_2 , K_1 и O_1 , M_4 , MS_4 , M_6 были рассчитаны средние векторные значения амплитуд и углов положений (фаз) гармоник для каждого месяца года.

Сезонный ход амплитуды представлен в виде относительного изменения (dH) ее средней величины (H) как $dH = (H_m - H_r)/H_r$ (в процентах), где H_m – среднее векторное значение из всех серий за данный месяц; 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 (СКО, или σ) для амплитуды и фазы рассчитывалось 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 [9].

Для выполнения поставленной задачи необходимы многолетние *однородные* ежечасные ряды, приведенные к одному временному поясу и единому нулю поста.

Как правило, в научных публикациях почти никогда не раскрываются причины пропусков в наблюдениях за уровнем в арктических морях и плохого качества данных. Это считается темой за рамками научной статьи. Осветим здесь этот аспект более детально.

Как известно, наблюдения за уровнем на Крайнем Севере выполняются в очень суровых климатических условиях с *риском для жизни*. Из 19 пунктов в Карском море лишь пять имели капитальные мареографические установки:

порт Амдерма, о. Диксон, м. Желания, о. Хейса, о-ва Известий ЦИК. В остальных пунктах наблюдения велись в летний период по временным установкам, а в зимний – в балках на береговом припайном льду, иногда подверженном разрушению. Поэтому пропуски в наблюдениях были вызваны невозможностью создания временных установок в периоды разрушения припая весной или их разрушения летом под действием штормов и дрейфующего льда и в переходный зимний период до становления устойчивого припая.

Пропуски создают неудобства при расчетах вследствие разрывов во временных рядах, но не являются препятствием для ведения гармонического анализа приливов по МНК [24]. На самом деле качество наблюдений за уровнем зависит не столько от пропусков, сколько от ситуаций, связанных с нарушением требований Наставления метеорологическим станциям и постам, плохой работой приборов и недобросовестностью наблюдателей [25–28].

Согласно работам [25–28], наблюдения высокого качества проводились в конце 1950-х – начале 1980-х гг. По мере старения приборной базы и ухудшения условий работы наблюдателей, а также вследствие снижения их квалификации, отсутствия регулярного инспекторского контроля качество наблюдений за уровнем моря также снижалось.

В 1990-е гг. в связи с распадом Советского Союза, закрытием ряда станций на СМП из-за недостатка в финансировании произошло резкое ухудшение качества наблюдений. Это объективная причина плохого качества наблюдений, но была и субъективная – формирование той базы данных, которую мы получили в ЕСИМО. Она заключалась в неверной обработке мареограмм, которые развязываются по срочным измерениям уровня моря. Эти срочные измерения уровня по правилам наставлений и требованиям методических отделов НИИ должны производиться строго в целые часы. На практике вследствие недостаточного количества наблюдателей это правило не может соблюдаться, так как один и тот же наблюдатель не в состоянии одновременно находиться на метеорологической площадке и на уровне поста. Поэтому наблюдатели записывали не истинное время измерений, а требуемое (т. е. равное целому часу). Соответственно мареограммы не обрабатывались по истинному времени, в них вносились ошибки (в пределах ± 30 мин и более). В итоге временные ряды теряли однородность [25–28].

Для приведения временных рядов уровня моря к однородным была разработана новая методология, представленная обобщенно как *способ калибровки приливов* [28]. Она позволяет выявить сомнительные наблюдения и брак различного происхождения во временных рядах уровня и, следовательно, получить объективную оценку качества данных наблюдений.

В целом состояние сети полярных станций и, в частности, производства наблюдений за уровнем моря практически не изменилось по сравнению с уровнем начала 1990-х гг., детально описанным в научно-публицистической работе [29].

Лучшее качество наблюдений за уровнем моря достигалось в середине XX в., а в его конце неуклонно снижалось. Однако именно в середине этого периода измерения уровня моря выполнялись в разных системах времени и с разной высотной привязкой. До апреля 1961 г. применялось местное солнечное время, затем до 1969 г. – время попеременно по второму или третьему

поясу, далее по 1990 г. – в основном по третьему поясу (московское декретное) и с 1991 г. – время нулевого пояса (всемирное Гринвичское время). Балтийская система высот введена в 1991 г.

Перевод данных измерений в целые часы при наблюдениях в местном времени проводился нами с помощью прямого и обратного преобразования Фурье [25].

Результаты и их анализ

Известно, что сезонный ход основных волн прилива имеет устойчивый квазипериодический вид в каждом пункте арктических морей и в морях Мирового океана и практически вид кривых амплитуды и фазы основных волн (условно генотип) не меняется со временем [1, 10, 11]. Результаты исследования сезонной изменчивости, полученные в пунктах с самыми продолжительными временными рядами, подтверждают этот вывод. Поэтому в настоящей работе приведены оценки средних месячных значений амплитуд и фаз волн прилива M_2 и K_1 в Баренцевом и Карском морях за период 19–38 лет с начала наблюдений в каждом пункте.

Для компактного представления результаты оценок сезонного хода волн прилива были сгруппированы по нескольким географическим районам в каждом море. На рис. 2 дан сезонный ход амплитуды и фазы волны M_2 в трех районах Баренцева моря. Видно, что во всех шести пунктах Мурманского прибрежного района (от Лиинахамари до Иоканьги) (рис. 2, а) сезонный ход амплитуды имеет тождественный вид кривых. Наблюдается годовая периодичность с максимумом амплитуды в августе (с увеличением средней годовой нормы на 3–4 %) и минимумом фазы в марте (с уменьшением всего на 1–2° от указанной нормы). Согласно классификации из работы [11], в этом районе наблюдается аномальный тип 3 сезонного хода.

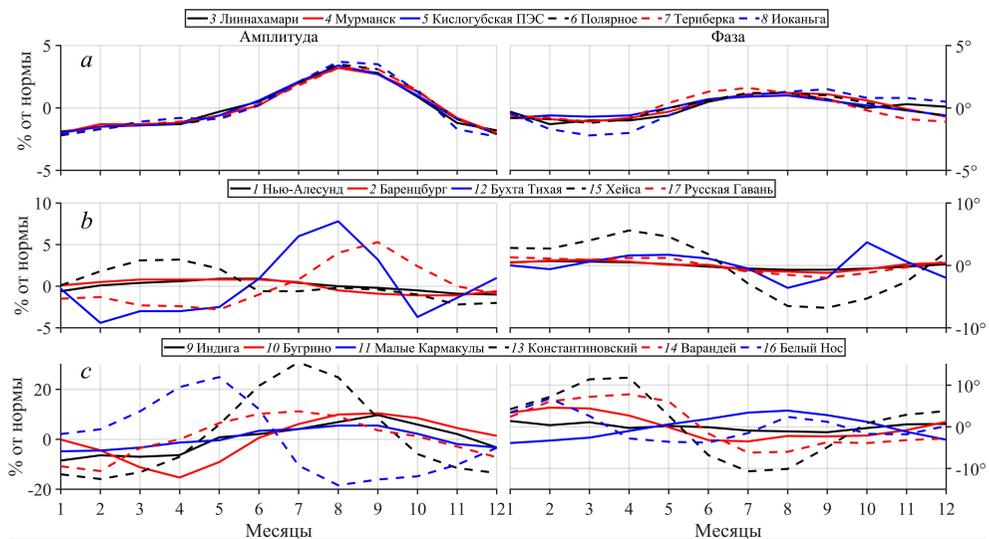


Рис. 2. Сезонный ход волны M_2 в Баренцевом море
Fig. 2. Seasonal variation of the M_2 tide in the Barents Sea

На севере Баренцева моря (рис. 2, *b*) на о. Шпицберген (пп. Нью-Алесунд и Баренцбург) размах сезонного хода выражен слабо. В годовом цикле увеличение амплитуды в июне составляет всего 0,8–0,9% от нормы, а уменьшение фазы в сентябре – около 1°. Здесь сезонный ход протекает по аномальному типу 2. Выделяется аномальный сезонный ход прилива по типу 2 в п. Русская Гавань (север Новой Земли), где максимум амплитуды виден в апреле и достигает 3%, а минимум фазы наблюдается в сентябре и составляет около 7° ниже нормы. В б. Тихой и на о. Хейса (рис. 2, *b*) сезонный ход близок к классическому типу 1, т. е. амплитуда растет в августе – сентябре, а фаза достигает минимума также в летний период.

В юго-восточной части Баренцева моря (рис. 2, *c*) проявляются наибольшие различия типа кривых сезонного хода и самые экстремальные значения амплитуд и фаз. В Канино-Печорском районе расположены пп. Индига, Константиновский и Варандей (рис. 1). Наиболее резко выраженный сезонный ход волны M_2 отмечается в п. Константиновский (Печорская губа), где максимум амплитуды до 31% от нормы и минимум фазы до 11° ниже нормы наблюдаются в июле.

В Печорской губе в пп. Варандей и Константиновский вид кривых сезонного хода амплитуд и фаз тождественен, но размах колебаний в первом меньше. В обоих пунктах наблюдается классический тип 1 сезонного хода, который также отмечается в п. Бугрино (о. Колгуев), где увеличение амплитуды волны M_2 в сентябре достигает 10% от нормы, а уменьшение фазы составляет в летний период не более 4°.

На Новой Земле в п. Малые Кармакулы сезонный ход амплитуды волны M_2 в годовом цикле достигает максимума в августе и составляет почти 6% от нормы. Кривая изменчивости фазы имеет аномальный вид и максимум в июле, составляющий около 5° от нормы. В итоге этот сезонный ход можно отнести к аномальному типу 3.

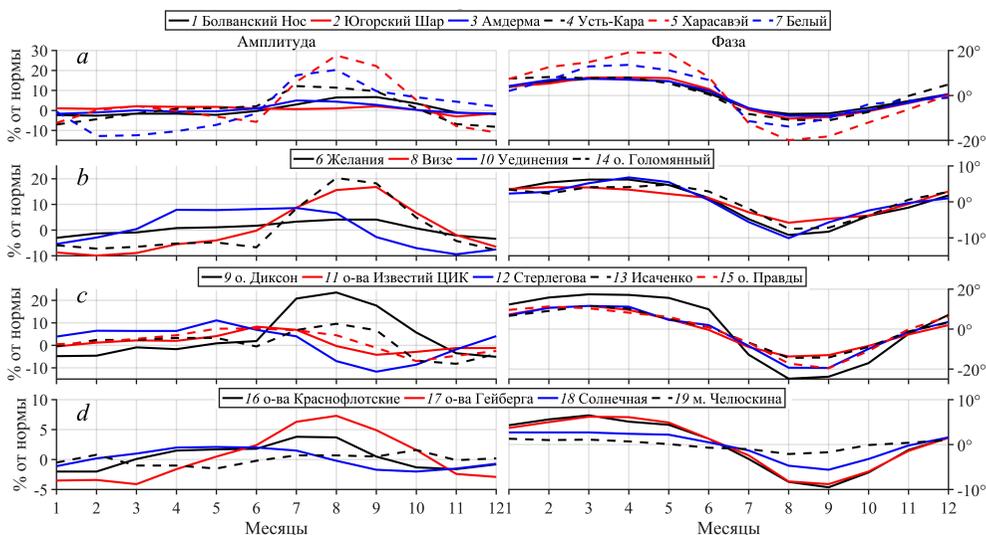
Наконец, в п. Белый Нос (к югу от пролива Югорский Шар) в сезонном ходе максимум амплитуды наступает в мае (около 25% выше нормы), а в сезонном ходе фазы присутствует полугодовая периодичность с минимумом в июне на 4° ниже нормы. Поэтому здесь проявляется тип 4 сезонного хода.

В целом размах сезонной изменчивости прилива в Баренцевом море увеличивается с севера на юг и наиболее существенно проявляется на юго-востоке моря.

Заметим, что средний сезонный ход полусуточных волн M_2 , S_2 и N_2 имеет сходные черты, но прослеживаются различия в типе кривых, которые связаны с различиями пространственного распространения этих волн прилива. Как правило, преобладает годовая периодичность в ходе амплитуд и фаз.

Классический тип 1 сезонного хода волны M_2 не является преобладающим и составляет 35%, а больше всего наблюдается аномальный тип 3, который достигает 41% от 17 пунктов. Этот факт может служить косвенным свидетельством того, что влияние дрейфующего ледяного покрова – не основной фактор в формировании сезонной изменчивости прилива в Баренцевом море. Исключением можно считать пункты, расположенные в Печорской губе, где в зимний период устанавливается припайный лед.

На рис. 3 приведены кривые сезонного хода амплитуд и фаз волны M_2 в Карском море, сгруппированные по четырем районам. В нашем распоряжении имелись результаты сезонного хода прилива в Обской губе и Енисейском заливе, но они в настоящей работе не используются, так как представляют самостоятельный интерес. Есть и другая причина, которую мы рассмотрим ниже.



Р и с. 3. Сезонный ход волны M_2 в Карском море
F i g. 3. Seasonal variation of the M_2 tide in the Kara Sea

Априори следует ожидать близкого по характеру изменения кривых сезонного хода волны M_2 в пунктах юго-западной части Карского моря, расположенных в одном районе, однородном по гидрометеорологическим условиям. Действительно, сезонный ход фазы во всех пунктах показывает хорошую согласованность в годовом цикле (рис. 3, *a*). Однако в сезонном ходе амплитуд волн M_2 наблюдаются значимые различия между пунктами. В ходе кривых волны M_2 очень слабо выражен годовой ход в Югорском Шаре и наиболее ярко – в Харасавэе с максимумом в августе, превышающим норму на 28%.

В северной части моря (м. Желания, о-ва Визе, Уединения, Голомянный) сезонный ход кривых амплитуды и фазы имеет классический тип 1 (рис. 3, *b*). Наиболее выражен ход в п. Голомянный с максимумом амплитуды до 17% в сентябре и минимумом фазы в 10° ниже нормы в августе.

В центральной части моря (о-ва Диксон, Известий ЦИК, Исаченко, Правды, м. Стерлегова) происходит увеличение годового размаха сезонного хода волны M_2 как в амплитуде, так и в фазе. Наиболее выраженный сезонный ход наблюдается на Диксоне, где в августе амплитуда волны увеличивается на 24%, а фаза уменьшается на 25° от нормы (рис. 3, *c*). Отметим аномальный годовой ход амплитуды в п. Стерлегова, где она достигает максимума в мае с отклонением от нормы на 11%. Но при этом сезонный ход фазы имеет классический вид и ее уменьшение (на 19° ниже нормы) происходит в сентябре. В пп. Известий ЦИК и Правды сезонный ход амплитуды также идет по аномальному типу 2.

Наконец, в юго-восточной части моря и в проливе Вилькицкого в основном наблюдается уменьшение размаха сезонных колебаний амплитуд и фаз волны M_2 (рис. 3, *d*). Увеличение амплитуды в п. Гейберга не превышает 7 % от средней годовой нормы, а в проливе Вилькицкого в п. Челюскина сезонный ход вообще имеет неопределенный характер (значения не выше пределов СКО). Однако ход кривых фазы волны M_2 демонстрирует классический вид во всех пунктах: уменьшение значений фазы в целом наблюдается в сентябре, оно слабо заметно в летний период в п. Солнечная и практически отсутствует в п. Челюскина (значение не превышает СКО).

В целом в Карском море увеличение амплитуд полусуточной волны M_2 в летний период (июль – сентябрь) составляет в основном 7–12 % от нормы, а их уменьшение в зимний период (март – апрель) достигает 8–11 % относительно нормы.

В сезонном ходе фаз полусуточных волн M_2 , S_2 , N_2 наблюдаются общие черты: везде присутствует годовая периодичность, при этом в ходе кривых фаз максимумы (март – апрель) и минимумы (август – сентябрь) практически совпадают.

В целом на акватории Карского моря согласно классификации, предложенной в работе [11], наблюдается в основном классический тип 1 сезонного хода волны прилива M_2 с максимумом амплитуды и минимумом фазы в июле – сентябре, который проявляется в 74 % случаев. На аномальный тип 2 приходится 21 % случаев, в одном из которых (п. Челюскина) не обнаруживается статистически достоверно сезонный ход волны M_2 .

Указывает ли такой результат на подтверждение распространенной гипотезы о преобладающем влиянии ледяного покрова на феномен сезонной изменчивости прилива в арктических морях? Не совсем так. Дрейфующий и припайный лед по-разному влияют на распространение приливной волны [10, 30, 31]. Особенно сильное влияние припая на приливную волну происходит на мелководье, а на критических глубинах 12–15 м и менее кардинально усиливается гашение и запаздывание в зимний период [30]. С этим фактором связано увеличение размаха сезонного хода в п. Харасавэй и в центральной части моря.

В сезонном ходе волны суточного прилива K_1 преобладает полугодовая периодичность (рис. 4), однако может наблюдаться сочетание годовой изменчивости в амплитуде и полугодовой или годовой – в фазе. В ряде пунктов прослеживается период в 3–4 мес. При этом во всех случаях моменты наступления экстремальных значений амплитуд и фаз не совпадают во времени.

Наиболее согласованный между пунктами вид изменчивости наблюдается в пунктах Мурманского прибрежного района (рис. 4, *a*). Здесь присутствует полугодовой период в ходе амплитуд и фаз, но существует сдвиг во времени между их максимумами. Амплитуда волны K_1 достигает 13–19 см, ее сезонный ход ярко выражен с первым максимумом в марте и вторым, главным максимумом до 12–16 % от нормы, в сентябре. Минимальные значения в ходе фазы наблюдаются в феврале, а резко выраженный второй минимум (6–7° от нормы) – в августе.

В других районах Баренцева моря прослеживается различный вид хода кривых амплитуд и фаз волны K_1 . Максимальные отклонения амплитуд от нормы составляют в основном 10–20 %, фаз – 6–16°.

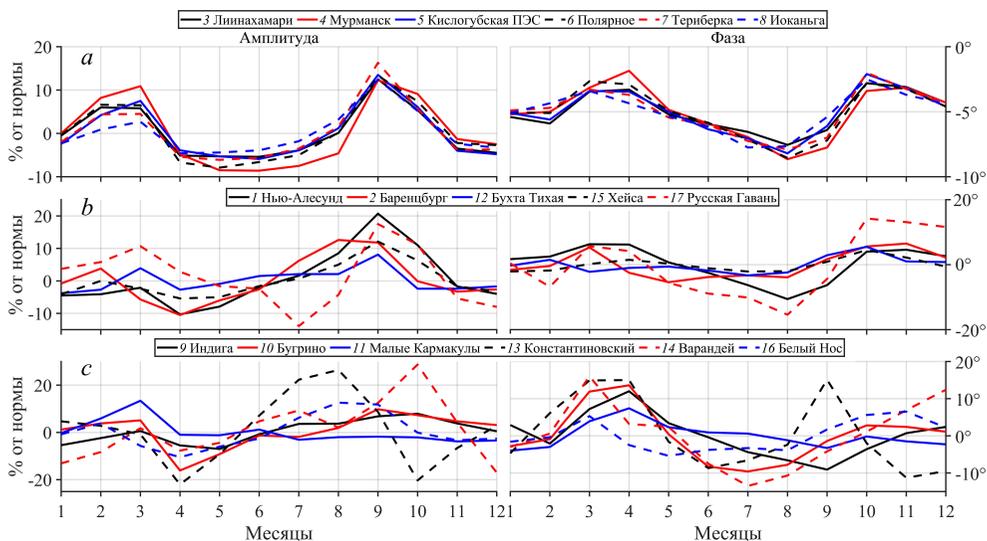


Рис. 4. Сезонный ход волны K_1 в Баренцевом море
Fig. 4. Seasonal variation of the K_1 tide in the Barents Sea

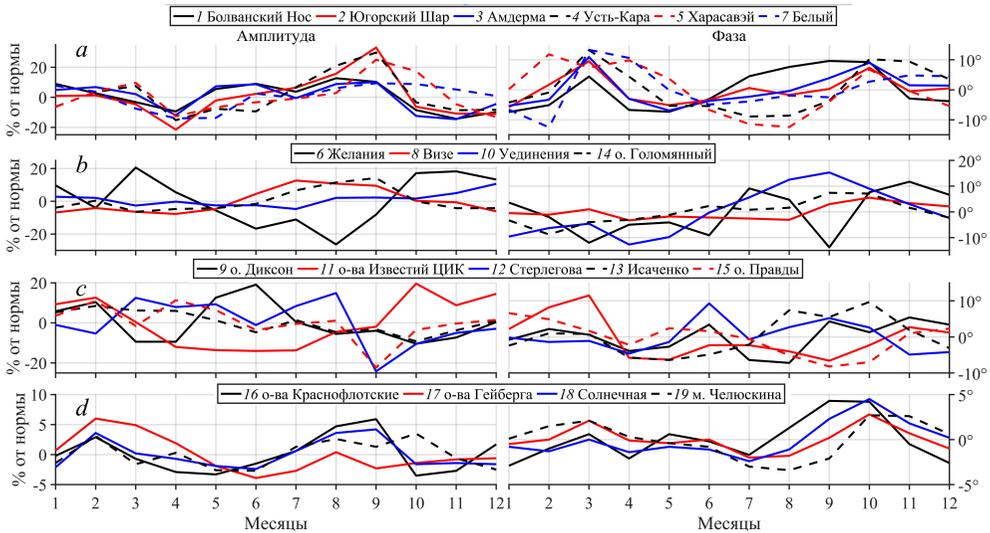
В целом в кривых сезонного хода амплитуд и фаз суточной волны K_1 плохо выражен годовой ход или вследствие присутствия более коротких периодов вид кривых становится неопределенным. Согласно классификации из работы [11], в Баренцевом море доминирует тип 1 сезонного хода волны K_1 , который составляет 76%. Отметим также, что одинаковый тип сезонного хода констант волн K_1 и O_1 наблюдается только в трех пунктах.

Как следует из оценки сезонной изменчивости волны M_2 в Баренцевом море, нет соответствия вида и характера хода кривых суточной волны K_1 с полусуточным приливом. Предварительный анализ данных не выявляет какой-либо зависимости сезонной изменчивости суточных волн от влияния ледяного покрова [10].

Вид кривых на рис. 5 указывает на сезонную изменчивость амплитуд и фаз волны K_1 в годовом цикле в Карском море, демонстрирующую большое разнообразие. Здесь уместно напомнить, что далеко не все экстремумы имеют значимые оценки (выше доверительных интервалов на основе СКО). В целом преобладает полугодовая периодичность в ходе кривых амплитуд и фаз, которая составляет 68%. При этом не совпадает время наступления экстремумов в амплитуде и фазе в отдельных пунктах.

Наиболее выражен сезонный ход волны K_1 в амплитуде и фазе в юго-западной части моря и южной центральной части. Причем первый максимум в амплитуде в юго-западной части несколько размыт во времени, наблюдается в январе – марте и составляет 7–10% от нормы, а второй, главный максимум, прослеживается в сентябре и достигает 30–33% от нормы. Однако в фазе минимумы проявляются не так четко и иногда присутствует период в 3–4 мес. В южной центральной части в амплитуде первый максимум наблюдается

в феврале – марте и составляет 10–13% от нормы, а второй, главный максимум, неустойчив во времени, встречается в июне – октябре и достигает 15–20% от нормы.



Р и с. 5. Сезонный ход волны K_1 в Карском море
Fig. 5. Seasonal variation of the K_1 tide in the Kara Sea

В юго-западной и северной частях Карского моря наблюдаются большие амплитуды, в среднем до 10–15% от нормы, и фазы – до 5–10°. В юго-восточной части моря экстремумы в сезонном ходе амплитуды не превышают в среднем 5–10% от нормы, а фазы составляют около 3–6°. Минимальные значения отмечаются в проливе Вилькицкого.

Основной вывод из результатов оценки сезонной изменчивости суточной волны K_1 совпадает со сделанным выше для Баренцева моря. Сезонный ход полусуточной волны M_2 и суточной волны K_1 различен. Полученные результаты позволяют уверенно говорить о разной физической природе формирования сезонного хода полусуточных и суточных волн прилива [10].

Между кривыми сезонного хода амплитуд и фаз суточных волн K_1 и O_1 не наблюдается соответствия, как и между кривыми полусуточных волн.

В работе [10] была рассмотрена простая аналитическая модель, объясняющая причины возникновения сезонного хода суточных волн K_1 и O_1 . Как показано в этой работе, в гармоническом анализе месячных серий 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 . Вклад второстепенной волны S_1 может достигать 6–8% амплитуды основной волны K_1 . Если провести разделение волн K_1 и P_1 по реальным соотношениям из годовых серий, т. е. выполнить *демодуляцию*, то сезонный ход может приобрести неявный вид. Здесь следует иметь в виду, что подобный прием использовался в [10] для приведения гармонических постоянных волны K_1 , полученных из месячных серий, к средним годовым значениям.

Может возникнуть естественный вопрос о степени различия «истинных» и представленных в нашей работе сведений о сезонной изменчивости волны K_1 . Мы выполнили нижеследующую оценку. Амплитуда волны K_1 в Баренцевом море значительно больше, чем в Карском. По результатам наших анализов многолетних серий наблюдений в Баренцевом и Карском морях можно сказать следующее: средняя амплитуда волны K_1 для 17 пунктов Баренцева моря составляет около 12 см, для 19 пунктов Карского моря – около 3,5 см; среднее отношение амплитуд волн P_1 к K_1 в Баренцевом и Карском морях равно 0,296 и 0,334 соответственно (теоретическое отношение равно 0,331); разность фаз указанных волн из наблюдений в среднем равна $-4,2$ и $-5,1^\circ$ соответственно (по теории она равна нулю).

О влиянии радиационной волны S_1 . Ее средняя амплитуда для 17 пунктов в Баренцевом море и 19 пунктов в Карском составляет по результатам наблюдений 0,66 и 0,16 см соответственно. Эта волна не входит в стандартное разделение. Ее влияние на сезонный ход не затрагивает его структуру (волна может повлиять только на годовую периодичность), но может незначительно ослабить или увеличить величину амплитуды годового периода [10].

Понятно, что результаты стандартного разделения в большинстве пунктов будут несущественно отличаться от специального разделения по соотношениям из наблюдений. Поэтому нет практического смысла в использовании нестандартного разделения. В целом представленные в нашей работе результаты сезонной изменчивости волны K_1 удовлетворительно описывают его структуру и вид кривых.

Сезонный ход волны O_1 в Баренцевом и Карском морях имеет в основном полугодовую периодичность в амплитуде и фазе, составляющую 58% от нормы для пунктов в двух морях. Различие в виде кривых сезонного хода суточных волн K_1 и O_1 может объясняться влиянием некоторых второстепенных волн на результаты месячных анализов волны O_1 . В группе волны O_1 также присутствуют такие второстепенные сложные волны со значимой амплитудой, как MP_1 и MS_1 , которые не отделяются в стандартных анализах месячных серий, но могут вызывать полугодовые периодичности в обычных результатах анализа. В Баренцевом и Карском морях, по нашим результатам, средняя амплитуда волны O_1 равна 2,4 и 2,9 см соответственно. Поэтому в практических целях учет сезонной изменчивости волны O_1 нецелесообразен.

Однако не все так однозначно. В районах, где в зимний период образуется припайный лед в условиях мелководья, например в Печорской губе, Обской губе и Енисейском заливе [10], сезонный ход суточных волн проявляется как аномальное природное явление.

Несмотря на то, что феномен сезонной изменчивости прилива в Мировом океане установлен в 1934 г. [1], а в арктических морях известен с 1936 г. [2], предвычисление прилива в отечественных и зарубежных таблицах прилива производится старым классическим способом без учета сезонного хода полусуточных и суточных волн прилива в годовом цикле. В последнее десятилетие произошел качественный поворот в численном моделировании и некоторые модели прилива в XXI в. учитывают сезонную изменчивость полусуточных приливов в СЛО [32].

Заключение

В настоящем исследовании по результатам анализа в 36 пунктах в Баренцевом и Карском морях были рассмотрены особенности сезонного хода полусуточных волн прилива на примере волны M_2 и суточных волн на примере волны K_1 . В целом размах сезонной изменчивости волн прилива в Баренцевом море увеличивается с севера на юг, наиболее существенен он на юго-востоке моря.

Во всех шести пунктах Мурманского прибрежного района (от Лиинахамари до Иоканьги) сезонный ход амплитуды прилива M_2 имеет тождественный вид кривых. Наблюдается годовая периодичность с максимумом амплитуды в августе с увеличением от средней годовой нормы на 3–4 % и минимумом фазы в марте с уменьшением всего на 1–2° от нормы. Согласно новой классификации сезонного хода полусуточных и суточных волн прилива, в этом районе наблюдается аномальный тип 3 сезонного хода.

На севере Баренцева моря на о. Шпицберген (пп. Нью-Алесунд и Баренцбург) размах сезонного хода выражен слабо. В годовом цикле увеличение амплитуды в июне составляет всего 0,8–0,9 % от нормы, а уменьшение фазы в сентябре – около 1°. Здесь сезонный ход протекает по аномальному типу 2.

В юго-восточной части Баренцева моря в Канино-Печорском районе проявляются наибольшие различия типа кривых сезонного хода волны M_2 и самые экстремальные значения амплитуд и фаз. Наиболее резко выраженный аномальный сезонный ход волны M_2 отмечается в Печорской губе. В п. Константиновский в июле наблюдаются максимум амплитуды до 31 % от нормы и минимум фазы до 11° ниже нормы.

Классический тип 1 сезонного хода волны M_2 не является преобладающим и составляет 35 % от нормы, чаще всего наблюдается аномальный тип 3, который достигает 41 % от нормы в 17 пунктах. Этот факт может служить косвенным свидетельством того, что влияние ледяного покрова не является преобладающим фактором в формировании сезонной изменчивости прилива в Баренцевом море. Исключением можно считать пункты, расположенные в Печорской губе, где в зимний период устанавливается припайный лед.

В Карском море увеличение амплитуд полусуточной волны M_2 в летний период (июль – сентябрь) составляет в основном 7–12 % от нормы, а уменьшение их в зимний период (март – апрель) достигает 8–11 %.

В центральной части моря от о. Диксон до о. Правды, где в зимний период устанавливается припайный лед, происходит увеличение годового размаха сезонного хода волны M_2 как в амплитуде, так и в фазе. Наиболее выраженный сезонный ход наблюдается на о. Диксон в августе, где его амплитуда увеличивается на 24 % от нормы, а фаза уменьшается на 25°. Однако в пунктах Известий ЦИК, Стерлегова и Правды сезонный ход амплитуды волны идет по аномальному типу 2.

На акватории Карского моря, согласно предложенной классификации, наблюдается в основном классический тип 1 сезонного хода волны M_2 с максимумом амплитуды и минимумом фазы в июле – сентябре, который составляет 74 % от нормы в 19 пунктах. На аномальный тип 2 приходится 21 % случаев, в одном из которых – в п. Челюскина – не обнаруживается статистически достоверно сезонный ход волны прилива M_2 .

В сезонном ходе фаз полусуточных волн M_2 , S_2 , N_2 наблюдаются общие черты: везде присутствует годовая периодичность, при этом в ходе кривых фазы максимумы (март – апрель) и минимумы (август – сентябрь) практически совпадают.

Была подтверждена выдвинутая ранее гипотеза о различном поведении в годовом цикле полусуточных и суточных волн прилива. Исключением являются акватории (Обская губа, Енисейский залив и т. д.), где в зимний период устанавливается припайный лед в условиях мелководья.

В целом в сезонном ходе волны K_1 в Баренцевом и Карском морях преобладает полугодовой период, который наблюдается в 76% случаев в пунктах в Баренцевом море и в 68% случаев – в Карском. На Мурманском побережье, где амплитуда волны K_1 достигает 13–19 см, ее сезонный ход имеет ярко выраженный вид с первым максимумом в марте и вторым, главным максимумом (до 12–16% от нормы), в сентябре. Минимальные значения в ходе фазы наблюдаются в феврале и с резко выраженным вторым минимумом – в августе (6–7° от нормы).

В Карском море наиболее выражен сезонный ход волны K_1 в амплитуде и фазе в юго-западной и южной центральной частях. Причем первый максимум в амплитуде в юго-западной части, несколько размытый во времени, наблюдается в январе – марте и составляет 7–10% от нормы, а второй, главный максимум, прослеживается в сентябре и достигает 30–33% от нормы. Однако в фазе минимумы проявляются не так четко, иногда присутствует период в 3–4 мес. В южной центральной части в амплитуде первый максимум наблюдается в феврале – марте (10–13% от нормы), а второй, главный максимум, неустойчивый во времени, проявляется в июне – октябре (15–20% от нормы).

В целом явление полугодовой периодичности в сезонном ходе волны K_1 не подтверждает его корреляции с влиянием как дрейфующего льда, так и стратификации вод. Возможно, что основным фактором здесь выступают особенности ветрового (бризовые ветры) и радиационного режимов в годовом цикле.

В работах отечественных и зарубежных исследователей установлено, что дрейфующий ледяной покров не оказывает существенного влияния на распространение приливной волны. Этот вывод был основан на всех имеющихся материалах наблюдений за течениями на АБС в арктических морях по 1979 г. и на материалах вековых наблюдений за приливами на полярных станциях в Баренцевом и Карском морях по 1990-е гг.

Исходя из результатов численного моделирования, авторы считают, что основной причиной сезонной изменчивости полусуточных волн приливов является влияние сезонных изменений стратификации на континентальном шельфе, а следующей причиной – сезонное изменение дрейфующего ледяного покрова в СЛО.

Представленные в настоящем исследовании новые результаты сезонной изменчивости полусуточных и суточных волн прилива в Баренцевом и Карском морях, полученные с применением новой методологии в обработке и гармоническом анализе многолетних рядов наблюдений за уровнем моря, позволяют существенно поднять уровень обеспечения безопасности судоходства и решить ряд хозяйственных задач на Северном морском пути.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Corkan R. H.* An annual perturbation in the range of tide // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character.* 1934. Vol. 144, iss. 853. P. 537–559. <https://doi.org/10.1098/rspa.1934.0067>
2. *Визе В. Ю.* Предисловие // *Гидрология. Материалы к изучению приливов арктических морей СССР.* Ленинград : Главсевморпуть, 1936. С. 5–7. (Труды Арктического института ; Т. 52, вып. 2 / И. В. Максимов).
3. *Визе В. Ю.* Потепление Арктики и приливо-отливы // *Проблемы Арктики.* 1939. Вып. 5. С. 37–42.
4. *Максимов И. В.* О зависимости элементов прилива от ледяного покрова моря // *Ученые записки ВАМУ им. адм. С. О. Макарова.* 1953. Вып. 4. С. 115–129.
5. *Дворкин Е. Н., Мандель С. З.* О влиянии ледяного покрова на изменчивость констант приливов // *Труды ААНИИ.* 1989. Т. 414. С. 76–85.
6. *Максимов И. В.* Сезонные колебания основных элементов прилива в морях Советской Арктики // *Труды Арктического института.* 1949. Т. 13. С. 5–19.
7. *Диесперова Р. А.* Приливы Северного Ледовитого океана // *Труды ГОИН.* Москва : Гидрометеиздат, 1954. Вып. 19. С. 3–75.
8. *Каганский А. С.* Некоторые особенности изменчивости гармонических постоянных приливных колебаний уровня // *Труды ГОИН.* Москва : Гидрометеиздат, 1965. Вып. 85. С. 84–90.
9. *Максимов И. В.* Основные приемы производства и камеральной обработки наблюдений над течениями в море. Москва ; Ленинград : Изд-во Главсевморпути, 1941. 332 с. (Труды Арктического института ; т. 155).
10. *Войнов Г. Н.* Приливные явления в Карском море. Санкт-Петербург : РГО, 1999. 109 с.
11. *Войнов Г. Н.* О новой интерпретации сезонной изменчивости приливов арктических морей России // *Метеорология и гидрология.* 2003. № 9. С. 59–70. EDN PVFRXD.
12. *Amin M.* On perturbations of harmonic constants in the Thames Estuary // *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society.* 1983. Vol. 73, iss. 3. P. 587–603. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1983.tb03334.x>
13. *Amin M.* Temporal variations of tides on the west coast of Great Britain // *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society.* 1985. Vol. 82, iss. 2. P. 279–299. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1985.tb05138.x>
14. *Кулаков М. Ю., Легеньков А. П.* Волны Пуанкаре под ледяным покровом и на чистой воде // *Труды ААНИИ.* 1985. Т. 389. С. 59–70.
15. *Легеньков А. П.* Отражение волн Свердрупа от кромки льда // *Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1965. Т. 1, № 3. С. 327–334.
16. *Kowalik Z.* A study of the M₂ tide in the ice-covered Arctic Ocean // *Modeling, Identification and Control.* 1981. Vol. 2, no. 4. P. 201–223.
17. *Каган Б. А., Софьина Е. В.* Сезонная изменчивость приливной волны M₂ в Северном Ледовитом океане // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика.* 2009. Т. 2, № 4. С. 31–37. EDN KYGTFK.
18. *Huess V., Andersen O. B.* Seasonal variation in the main tidal constituent from altimetry // *Geophysical Research Letters.* 2001. Vol. 28, iss. 4. P. 567–570. <https://doi.org/10.1029/2000gl011921>
19. Two-layer tidal modelling of the Yellow and East China Seas with application to seasonal variability of the M₂ tide / S. K. Kang [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans.* 2002. Vol. 107, iss. C3. P. 6–1–6–18. <https://doi.org/10.1029/2001JC000838>
20. Seasonal variation of the M₂ tide / M. Müller [et al.] // *Ocean Dynamics.* 2014. Vol. 64. P. 159–177. <https://doi.org/10.1007/s10236-013-0679-0>

21. *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. EDN KUNPYN.
22. *Май Р. И.* Линейные и нелинейные приливные явления в морях Европейской Арктики // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2008. № 3 (80). С. 115–125. EDN KUBBJX.
23. *Куликов М. Е., Медведев И. П., Кондрин А. Т.* Особенности сезонной изменчивости приливных колебаний уровня в морях российской Арктики // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 6. С. 60–74. EDN IAZVFJ.
24. *Войнов Г. Н.* О гармоническом анализе приливов по нерегулярным многолетним наблюдениям за уровнем моря и течениями // *Океанология*. 2004. Т. 44. № 2. С. 172–178. EDN OWJSWT.
25. *Войнов Г. Н.* Гармонический анализ морских приливов по срочным наблюдениям за уровнем моря // *Метеорология и гидрология*. 2009. № 7. С. 79–91. EDN KVKYCH.
26. *Войнов Г. Н.* Методика контроля и редакции многолетних временных рядов уровня моря // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2011. № 4 (90). С. 51–61. EDN OYZPTR.
27. *Войнов Г. Н.* О качестве многолетних наблюдений за уровнем моря на стационарной сети в прибрежной зоне морей северо-запада и арктических морей России // *Труды Государственного океанографического института*. 2013. № 214. С. 223–236. EDN RUQHHR.
28. *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. EDN OSIFV.
29. *Комчатов В. Ф., Лучков В. П.* Вековая морская береговая гидрометеорологическая сеть – основа изучения гидрологического режима шельфовой зоны морей РФ и обеспечения гидрометеорологической безопасности // *Труды Государственного океанографического института*. 2011. Вып. 213. С. 5–14. EDN PKRUYZ.
30. *Войнов Г. Н.* Приливные течения арктических морей // *Труды Арктического и Антарктического научно-исследовательского института*. 1988. Т. 128. 238 с.
31. *Войнов Г. Н., Наумов А. К.* Приливы в юго-западной части Карского моря. Результаты применения способа калибровки приливов // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2017. № 4 (114). С. 98–115. EDN ZXPBCD.
32. FES2014 global ocean tides atlas: design and performance / F. H. Lyard [et al.] // *Ocean Science*. 2021. Vol. 17, iss. 3. P. 615–649. <https://doi.org/10.5194/os-17-615-2021>

Об авторах:

Войнов Геннадий Николаевич, заведующий лабораторией, Санкт-Петербургское отделение Государственного океанографического института им. Н. Н. Зубова (199397, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38); главный научный сотрудник, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (199397, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-1657-049x**, **Scopus Author ID: 6602249564**, **ResearcherID: E-6141-2016**, **SPIN-код: 2049-5342**, voinovgn@mail.ru

Сухачев Владимир Николаевич, научный сотрудник, Санкт-Петербургское отделение Государственного океанографического института им. Н. Н. Зубова (199397, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38); научный сотрудник, Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет (Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 10 линия В. О., д. 33–35), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-4821-4342**, **Scopus Author ID: 55969236600**, **ResearcherID: N-7470-2015**, **SPIN-код: 4963-7802**, syhachev@mail.ru