

## РЕФЕРАТ

Отчет 30 стр., 2 рис., 5 табл., 29 источников.

### ПРИЛИВЫ, ГАРМОНИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ, БАРЕНЦЕВО МОРЕ, БАЗА ДАННЫХ, ОДНОРОДНЫЙ МАССИВ

Произведен суперрасширенный гармонический анализ с помощью метода наименьших квадратов временных ежедневных отредактированных рядов наблюдений за уровнем моря за период 19 лет с нодальным разрешением по частоте (0,0021 град/ч) в пунктах Лиинахамари (Печенга) и Полярное (Баренцево море). Получены амплитудные и фазовые оценки 452 составляющих волн на частотах разложения приливного потенциала по Картрайту [1].

Выполнен расчет теоретического статического прилива для пунктов Лиинахамари и Полярное.

Обнаружено явление аномального усиления суточного лунного прилива  $M_1$  от сферических гармоник 3-й степени потенциала в Лиинахамари и Полярном. Выявлено, что сателлиты в группе суточного эллиптического прилива  $J_1$  от сферических гармоник 3-й степени потенциала также существенно выше статических значений. По функциям отклика приливов в этих пунктах, расположенных в южной части Баренцева моря, выявлена узкая антирезонансная полоса в суточном диапазоне частот в интервале 13,7–14,5 град/ч (периоды 26,28–24,83 ч), свидетельствующая о диссипации энергии прилива. Произведена частичная идентификация и оценка составляющих волн прилива. Определены наблюдаемые соотношения амплитуд и фаз в кластерах основных суточных и полусуточных волн приливов от сферических гармоник второй и третьей степени потенциала.

Обнаружено явление аномального усиления лунного суточного прилива  $M_1$  с периодом в лунные сутки (24,8412 ч) от сферических гармоник 3-й степени потенциала в Лиинахамари и Полярном. На не случайность этого факта указывает близкое соответствие амплитуд и фаз прилива, выделенных из разных периодов наблюдений, в 2-х пунктах. Основной линией в рассматриваемой суточной группе по разложению потенциала является прилив  $NO_1$  (период 24,8332 ч) от сферических гармоник 2-й степени потенциала (2-го члена), и по теории его амплитуда в 3,4 раза (на широте пунктов) должна превышать величину прилива  $M_1$ . Но здесь его амплитуда в 2 раза меньше, чем у прилива  $M_1$ .

По функциям отклика приливов в пунктах Лиинахамари и Полярный, расположенных в южной части Баренцева моря, выявлена узкая антирезонансная полоса в суточном диапазоне частот в интервале 13,7–14,5 град/ч (периоды 26,28–24,83 ч), где отмечается минимум значений отношений наблюдаемых к статическим амплитуд волн и происходит скачок углов положений волн на  $180^\circ$ . Подобное поведение кривых функций отклика свидетельствует о

диссипации энергии прилива в таком интервале частот, поскольку в этой части моря узловых зон прилива не наблюдается.

**Объектом исследования являются** моря Российской Арктики

**Предмет исследования** приливы морей Российской Арктики. Гармонический анализ ежечасных наблюдений за уровнем на полярных станциях за весь период наблюдений (по возможности).

**Цель данной научно-исследовательской работы** состоит в создании принципиально новой модели предвычисления приливов с использованием полного разложения приливного потенциала по Картрайту [1] и современного описания сложных и мелководных составляющих волн морских приливов [2,3]. Разработка индивидуальных (для конкретного пункта) программ предвычисления приливов по нетрадиционной форме расчета приливов. В перспективе предлагаемая подобная форма предвычисления приливов должна дополнить (или заменить для основных портов) традиционные Таблицы Приливов.

**Метод исследования:** гармонический анализ приливов с помощью метода наименьших квадратов по новой версии ААНИИ; расширенный гармонический анализ приливов по новой версии СПО ГОИН; не стандартный гармонический анализ приливов для ежечасных рядов длительностью в нодальный цикл (19 лет) с выделением структуры потенциала.

**Область внедрения** может состоять из внедрения гармонических постоянных в оперативную практику для обеспечения безопасности плавания судов. Остаточные ряды (наблюдения минус предвычисления) необходимы для изучения непериодических колебаний уровня моря.

**Степень новизны полученных результатов.** В России гармонический анализ приливов с нодальным разрешением по частоте и выделением практически всех составляющих волн по разложению потенциала по Картрайту проводился только для Амдермы [4]. Производство таких анализов крайне затруднительно не по причине сложности алгоритма обработки, а вследствие повышенных требований к качеству наблюдений и большого объема работ, связанных с расшифровкой (идентификацией) полученных обширных результатов. Подобные анализы представляют новое направление в исследовании приливов и являются новым средством получения информации о приливах в Мировом океане. Впервые получены гармонические постоянные 452 составляющих волн приливов из 19 лет наблюдений за уровнем моря в Лиинахамари и Полярном. Явление аномального усиления лунного суточного прилива  $M_1$  в арктических морях России обнаружено впервые.

Трудно разрешимой проблемой в интерпретации результатов анализа является строгое разделение гравитационных вкладов и нелинейных взаимодействий. В морских приливах

практически любая основная или второстепенная и даже нодальная волны прилива имеют нелинейных двойников. В некоторых линиях присутствуют несколько таких двойников от нелинейных волн разного порядка взаимодействия. В мелководных приливах кластеры отдельных волн могут иметь десятки и сотни вариантов нелинейных взаимодействий [5]. Пока не удастся как-либо автоматизировать расшифровку тонкой структуры прилива и приходится рассматривать индивидуально каждую основную волну прилива и ее кластер.

Здесь основным инструментом служат функции отклика, отражающие зависимость адмиттансов амплитуд составляющих (значения отношений наблюдаемых значений к статическим) и углов положений от угловой скорости волн (частоты).

Есть и другой подход к раскрытию структуры составляющих волн. Смысл его состоит в проверке соответствия средних годовых значений нодальных параметров (редукционного множителя  $f$  и поправки фазы  $u$ ), рассчитываемых на период 8,8 г. или 19 лет для значений гармонических постоянных кластеров составляющих волн по наблюдениям и по вариантам возможных нелинейных двойников. Видно, что и этот подход довольно сложен и практически никогда не использовался.

Приводимые выше методы и подходы применяются как средство раскрытия физической природы формирования составляющих волн, то есть имеют сугубо теоретический интерес, и не касаются предвычисления приливов, которое производится по тем значениям констант, какие получены в результате расширенного гармонического анализа. Немаловажное преимущество здесь заключается в том, что строго гармоническое предвычисление прилива выполняется без расчета теоретической нодальной коррекции, что обеспечивает более точное описание реального прилива.

Результаты гармонического анализа наблюдений за уровнем моря в Лиинахамари и Полярном в группах приливов  $NO_1$  и  $J_1$  даны в таблице. Теоретический статический прилив ( $H$  стат.) с учетом широтных коэффициентов рассчитан в рамках разложения потенциала по Картрайту. В двух последних столбцах таблицы приведены значения отношений амплитуд составляющих волн наблюдаемых к статическим.

По данным таблицы видно, что достоверны константы составляющих волн с амплитудой более 0,06 см. (граница 90% доверительного интервала). Результатам анализа составляющих волн в Полярном следует доверять в большей степени, так как в этом пункте за исследуемый период наблюдения имели более высокое качество. Величина суммарного прилива в Полярном больше, чем в Лиинахамари, а приливная волна распространяется на восток. Поэтому значения основных волн и сателлитов по амплитудам выше в Полярном и несколько больше углы положений.

Важнейшим фактом из результатов таблицы является аномальное усиление лунного прилива  $M_1$  от сферических гармоник 3-й степени в 4,3–4,5 раза в сравнении с теоретическим приливом. Основной волной в этой суточной группе прилива по теории должна быть волна  $NO_1$  от сферических гармоник 2-й степени, но здесь амплитуда этой составляющей в 0,7 раза меньше статического значения. Интересным событием является существенное увеличение двух составляющих от 3-члена потенциала, лежащих вблизи частоты прилива  $M_1$ . Другие значимые линии в этой группе от 2-го члена потенциала приближенно соответствуют статическим значениям.

В группе суточного лунного эллиптического прилива  $J_1$  наблюдаются также интересные особенности. Амплитуда основной линии  $J_1$  не значительно отличается от статической, поскольку близка здесь к значениям соотношений для других суточных волн. К тому же этот прилив взаимодействует с нелинейным двойником  $MQ_1$ . Обращают внимание в данных таблицы два значимых сателлита от сферических гармоник 3-й степени, которые в 4,9–5,9 раза больше теоретических значений. Общей чертой для значимых составляющих (с амплитудой более 0,06 см) в группах приливов  $NO_1$  и  $J_1$  является приближенное соответствие теории основных линий и сателлитов от 2-го члена потенциала.

Только для информационного использования  
правообладатель: admspb@osamgrph.ru

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ .....  | 8  |
| ВВЕДЕНИЕ .....   | 9  |
| 1. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ .....   | 11 |
| 1.1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ .....  | 11 |
| 1.2. МЕТОД ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА МНОГОЛЕТНИХ ЕЖЕЧАСНЫХ И СРОЧНЫХ<br>НАБЛЮДЕНИЙ ЗА УРОВНЕМ МОРЯ.....      | 12 |
| 1.3. МЕТОД КАЛИБРОВКИ ПРИЛИВОВ.....  | 12 |
| 2. РЕЗУЛЬТАТЫ.....   | 16 |
| 2.1. АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И ИХ КАЛИБРОВКА.....   | 16 |
| 2.2. ОСОБЕННОСТИ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ПРИЛИВОВ В НЬЮ-АЛЕСУНДЕ И<br>БАРЕНЦБУРГЕ.....                        | 19 |
| 2.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНОК СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОСНОВНОЙ<br>ПОЛУСУТОЧНОЙ ВОЛНЫ M2 В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ.....  | 21 |
| 2.4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНОК СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОСНОВНОЙ СУТОЧНЫХ<br>ВОЛН K1 и O1 В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ. .... | 23 |
| 2.5. УТОЧНЕНИЕ КЛАССИФИКАЦИИ СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ<br>ПОЛУСУТОЧНЫХ И СУТОЧНЫХ ВОЛН ПРИЛИВА. ....       | 24 |
| 2.6. ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ВОЛН ПРИЛИВА В<br>БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ.....                 | 25 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....  | 26 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....  | 28 |

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие сокращения и обозначения:

АБС – автономная буйковая станция

БСВ – Балтийская система высот

СПО ФГБУ «ГОИН» – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова» Санкт-Петербургское отделение.

СЛО – Северный ледовитый океан

ААНИИ – Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт

Matlab – Matrix Laboratory

ЕСИМО - Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане

ВНИИГМИ-МЦД - Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных

С.К.О – средне квадратическое отклонение

МНК – метод наименьших квадратов

Только для информационного использования  
правообладатель: admspb@oceanography.ru

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в программах гармонического анализа приливов [6–13] и её версии в Matlab [11], а также в монографии [10] предложено включать в анализ прилива до 149 гармоник в спектре классов от долгопериодного до 1/12–суточного. Однако в целом в этих программах гармонического анализа приливов не полностью учитывается сезонная изменчивость приливов, которая проявляется во многих районах Мирового океана, но наиболее сильно выражена в арктических морях на мелководье (в шельфовой зоне). Без учета этой изменчивости невозможно адекватно наблюдениям описать в годовом цикле морские приливы в прибрежных районах и на акваториях многочисленных заливов и проливов на трассе Северного морского пути.

В 1994 г. в ААНИИ был разработан новый методический подход к обработке и анализу морских приливов [14]. В дальнейшем были опубликованы версии метода для анализа нерегулярных наблюдений, анализа аномальных мелководных приливов, анализа срочных наблюдений [2,3]. Расширенный гармонический анализ морских приливов производится по новой методике с включением волн, описывающих сезонную изменчивость основных и мелководных волн. Принципиальное отличие новой версии расширенного гармонического анализа морских приливов состоит в адекватном наблюдениям описании сезонной изменчивости приливных колебаний уровня моря для районов с сильно выраженным или аномальным ходом констант волн в годовом цикле. Однако во многих случаях использованной ранее методологии было недостаточно для полного восстановления сомнительных наблюдений. Поэтому был разработан способ калибровки приливов [15].

Как известно, политические и экономические процессы, происшедшие в нашей стране в 90-е годы XX века, негативно сказались на состоянии наблюдений на сети полярных станций. Ушли специалисты, морально устарели приборы или пришли в негодность. Следствием этого стало падение качества наблюдений за уровнем моря.

Выявился дополнительный симптом низкой квалификации наблюдателей: пренебрежение учета истинного времени измерений при развязке мареограмм. Поправки времени вообще перестали вводить при обработке лент мареографа. Это выявляется по результатам скользящего гармонического анализа по месяцам в виде аномального ухода фазы волны  $M_2$ . Эти результаты показывают, что при производстве срочных измерений их действительное время может отличаться от нормы на 30–40 мин до или после целого часа, а в ряде случаев и на большую величину. Также нередки необъяснимо резкие сдвиги нуля поста, что свидетельствует об ошибках нивелировок или их отсутствии [16].

Качество наблюдений заметно упало в 70-е гг, с которого в наблюдениях обнаружилось резкое увеличение систематической ошибки времени измерений, что однозначно свидетельствовало о нарушении обработки мареограмм. Поэтому без трансформации временных рядов с помощью способа калибровки [15] ими нельзя пользоваться в научных целях и при инженерных изысканиях.

Только для информационного использования  
правообладатель: [admspb@oceanography.ru](mailto:admspb@oceanography.ru)



## 1. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

### 1.1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве основы для обработки и анализа приливов в полярных районах использовалась база ЕСИМО (данные ВНИИГМИ-МЦД) с 1977 г., а до 1977 г. база СПО ГОИН и частично ААНИИ. База ЕСИМО имела пропуски отдельных лет или месяцев и была дополнена за годы до 1977 г. по материалам, хранящимся в фондах ААНИИ и ГОИН. В таблице (Таблица 1) представлены сведения о временных рядах, использованных в настоящей работе наблюдений за уровнем моря. В Баренцевом море были привлечены к обработке и анализу наблюдения на 17 станциях. На подавляющем большинстве станций ряды наблюдений были не менее 19 лет. Только на 2 станциях по условиям работы на этих станциях временные ряды составили 7 лет (Инди́га) и 4 (бухта Тихая) года.

Таблица 1 – Сведения об исходных временных рядах наблюдений за уровнем моря

| Пункт наблюдений             | Координаты      |                   | Период анализа, годы | Число лет анализа |
|------------------------------|-----------------|-------------------|----------------------|-------------------|
|                              | Широта северная | Долгота Восточная |                      |                   |
| Баренцево море               |                 |                   |                      |                   |
| Нью-Алесунд                  | 78° 56'         | 11° 57'           | 2000-2018            | 19                |
| Баренцбург                   | 78° 04'         | 14° 15'           | 1977-1997            | 21                |
| Лиинахамари                  | 69° 38'         | 31° 22'           | 1977-1996            | 20                |
| Мурманск                     | 68° 58'         | 33° 04'           | 1977-1997            | 21                |
| Кислогубская ПЭС             | 69° 24'         | 33° 06'           | 1977-1991            | 15                |
| Полярное                     | 69° 12'         | 33° 28'           | 1977-1996            | 20                |
| Териберка                    | 69° 12'         | 35° 06'           | 1978-1996            | 19                |
| Иоканьга                     | 68° 06'         | 39° 30'           | 1977-1993            | 17                |
| Инди́га                      | 67° 42'         | 48° 46'           | 1977-1989*           | 7                 |
| Бугрино                      | 68° 48'         | 49° 20'           | 1977-1996**          | 20                |
| Малые Кармакулы              | 72° 22'         | 52° 41'           | 1977-1996**          | 20                |
| Бухта Тихая                  | 80° 21'         | 52° 48'           | 1954-1957            | 4                 |
| Мыс Константиновский         | 68° 36'         | 55° 30'           | 1977-1990*           | 11                |
| О-в Варандей                 | 68° 48'         | 57° 58'           | 1978-1994*           | 11                |
| О-в Хейса (ГМО им. Кренкеля) | 80° 36'         | 58° 00'           | 1972-1991            | 20                |
| Мыс Белый Нос                | 69° 36'         | 60° 13'           | 1962-1980**          | 19                |
| Русская Гавань               | 76° 12'         | 62° 35'           | 1973-1991            | 19                |

Примечание \* – в ежечасных сериях наблюдений имеются пропуски; \*\* - привлечены срочные измерения уровня.

## 1.2. МЕТОД ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА МНОГОЛЕТНИХ ЕЖЕЧАСНЫХ И СРОЧНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА УРОВНЕМ МОРЯ.

Выполнение научных исследований на исходном материале, ввиду низкого качества наблюдений почти на всех полярных станциях как в советское время, так и в настоящее [16–18], приводит к нереальным оценкам прилива [17,18]. В особенности плохие измерения получены при срочных наблюдениях за уровнем моря. Производство таких наблюдений в 21 веке является анахронизмом. Расширенный гармонический анализ морских приливов производится по новой методике с включением волн, описывающих сезонную изменчивость основных и мелководных волн. Принципиальное отличие новой версии расширенного гармонического анализа морских приливов состоит в адекватном наблюдениям описании сезонной изменчивости приливных колебаний уровня моря для районов с сильно выраженным или аномальным ходом констант волн в годовом цикле. Однако во многих случаях использованной ранее методологии было недостаточно для полного восстановления сомнительных наблюдений. Поэтому в необходимых случаях отдельные годовые серии трансформировались с помощью разработанного способа калибровки [15].

Сезонный ход амплитуды представлен в виде относительного изменения ( $dH$ ) её средней величины ( $H$ ) как  $dH = (H_M - H_T) / H_T$  (в процентах), где  $H_M$  – среднее векторное значение из всех серий за данный месяц, а  $H_T$  – среднее векторное за весь период. Сезонный ход фазы ( $dg$ ) дан в виде отклонения средней величины из всех серий за данный месяц от средней за весь период  $dg = (g_M - g_T)$ . Среднее квадратическое отклонение (с.к.о. или  $\sigma$ ) для амплитуды и фазы рассчитывались по формулам ошибок векторного среднего. Для этого средняя и индивидуальные месячные значения амплитуды и фазы преобразовывались в компоненты  $H \cos g$  и  $H \sin g$ . По ним рассчитывалась стандартная ошибка для амплитуды  $\sigma_H$ , и затем для фазы  $\sigma_g$ :

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

где  $\sigma_A$  – с.к.о. для компоненты  $H \cos g$ , а  $\sigma_B$  – с.к.о. для компоненты  $H \sin g$ ;

$$H = \{(H \cos g)^2 + (H \sin g)^2\}^{-1}; \quad tg(g) = \frac{H \sin g}{H \cos g} \quad (2)$$

## 1.3. МЕТОД КАЛИБРОВКИ ПРИЛИВОВ

Для выполнения экспериментов по калибровке прилива была предложена следующая последовательность обработки и гармонического анализа.

1. Создание модели прилива (список значимых составляющих основных и второстепенных волн в классах от долгопериодного по 1/6-ти суточный) на основе анализа годовых ежечасных серий с хорошим (эталонным) качеством наблюдений.

Модель прилива включает волны, адекватно наблюдениям, описывающим сезонный ход прилива. Технология приведена в [19,20]. Также производится расчет среднего сезонного хода основных волн прилива ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ).

2. Разделение годового ряда наблюдений на тренд (долгопериодные колебания) и короткопериодный прилив (квазиприливной компонент) с помощью прямого и обратного фильтра низких частот.
3. Расчет предвычисленной годовой серии на период наблюдений с подстройкой (по возможности) сезонного хода уровня (непериодические колебания) и сезонного хода прилива в данном году. Выделение из этой серии квазиприливного компонента с помощью обратного фильтра низких частот.
4. Гармонический анализ по МНК (без астрономической части) последовательно за каждые сутки квазиприливного компонента наблюдений и квазиприливного компонента предвычисленного ряда. Предварительный контроль значений амплитуд и фаз волны  $M_2$  для наблюдений по сравнению с таковыми для предвычислений как эталона для обнаружения сомнительных величин и соответствующих им участков наблюдений с браком.
5. Визуальный просмотр совмещенных синхронных рядов квазиприливных компонент предвычисления и наблюдений с акцентом на сутках с сомнительными результатами и замена их в случае принятия решения о браке на предвычисленные значения.
6. Гармонический анализ по МНК (без астрономической части) месячных серий исправленной годовой серии квазиприливного компонента наблюдений и квазиприливного компонента предвычисленного ряда.
7. Амплитудная калибровка значений квазиприливного компонента наблюдений с коэффициентом, определяемым по отношению значений амплитуд волны  $M_2$  между обоими рядами (пункт 6) по каждому месяцу отдельно.
8. Создание скорректированного ряда наблюдений как арифметической суммы тренда (пункт 2) и квазиприливного компонента после калибровки.
9. В заключение производится гармонический анализ годовой и месячных серий восстановленного ряда с обязательным контролем остаточного ряда.

Необходимые пояснения по пунктам. По пункту 2: фильтр низких частот (класса нерекурсивных фильтров) построен нами по технике взвешивания идеального фильтра окном Кайзера. Параметр окна Кайзера  $\alpha$  задавался равным 10, а число членов окна  $m(0)$  равно 240. При таком задании значений параметра и окна уровень 50% в переходной зоне частотной характеристики приходится на частоту 9,0 град/ч (период 1,66 сут). Фильтр эффективно подавляет приливные колебания – в полосе непропускания уровень пульсаций не выше – 100

дБ (0,0000068). Децибел =  $20\lg(H(f))$ . Фильтр практически не искажает колебания с периодом более 1,7 сут (уровень пропускания выше 80%). Частотная характеристика этого фильтра дана на рисунке (Рисунок 1) вместе с таковой для других известных в океанологии фильтров. По этим кривым, что известные фильтры Дудсона [21] и Гровза [22] имеют плохую частотную характеристику в переходной зоне и большие всплески в полосе непропускания. Фильтр Картрайта [23] имеет более приемлемую кривую в переходной зоне, но при этом пропускает до 4% на крайней частоте суточных приливов.

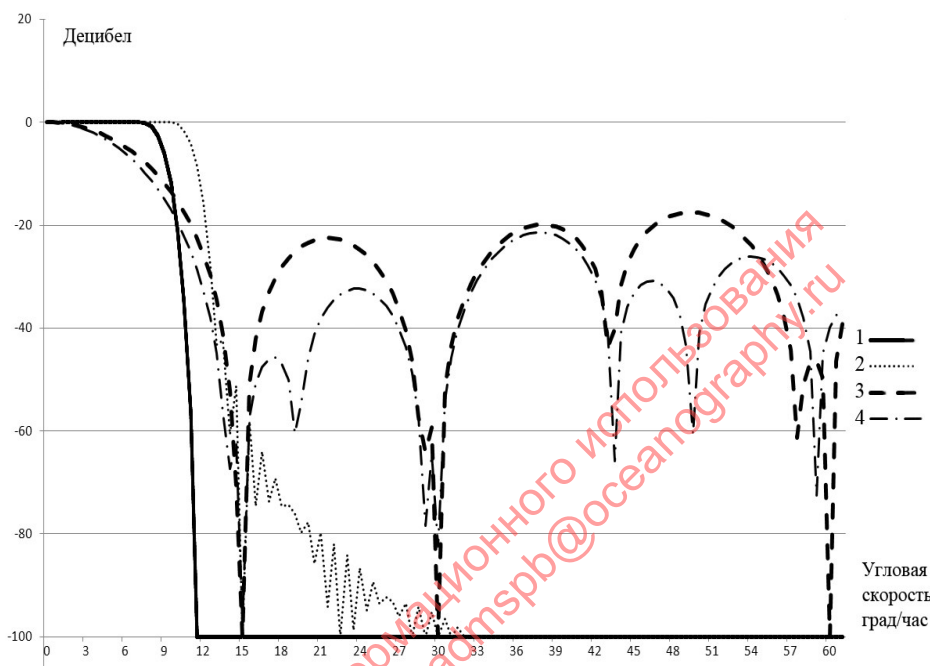


Рисунок 1 – Частотная характеристика фильтров низких частот. 1-фильтр низких частот в нашей работе; 2-фильтр низких частот по Картрайту с  $m(0)=168$ ; 3-фильтр низких частот Дудсона (39 весов); 4-фильтр низких частот Гровза (Д49).

При фильтрации ежечасных данных нашим фильтром происходит потеря по 240 значений ряда слева и справа (10 сут в начале и 10 сут в конце ряда). Для компенсации потери ряда мы дополняем перед фильтрацией временные ряды справа и слева предвычисленными значениями со склейкой рядов на границах.

При использовании фильтра низких частот и обратного фильтра низких частот справедливо тождество: наблюдения = тренд + квазиприливной компонент. Оно соблюдается с точностью задания исходного ряда.

По пункту 4: при гармоническом анализе за сутки (24 ч) выделяются 6 волн: по одной из основных классов прилива –  $A_0, K_1, M_2, M_3, M_4, M_6$ . (амплитуда волн более высоких классов в арктических морях пренебрежимо мала). Производится отдельно контроль значений амплитуд и фаз волны  $M_2$  (как ведущей в арктических морях) по наблюдениям. Значения амплитуд и фаз всех волн могут искажаться непериодическими колебаниями, но также есть и отскакивающие значения, которые отсутствуют в предвычислении. Кривые значений

амплитуд и фаз волны  $M_2$  имеют периодичность от волн  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_2$ , но она должна быть одинаковой у обоих рядов в идеальном случае отсутствия брака и случайных возмущений уровня, не мешая идентификации отклонений различной природы. Фиксируются сутки в году, в которых амплитуда или фаза имела аномальный характер.

Далее необходим уже визуальный просмотр (пункт 5) рядов квазиприливных компонент (наблюдения и предвычисления) для принятия решения о браке и его замене. Нарушения, вызванные плохой работой самописца, или фальсификация наблюдений хорошо идентифицируются, также как и случайные изменения за счёт неперiodических колебаний.

По пункту 5: значения амплитуд и фаз волны  $M_2$  (также и других волн) из суточных циклов имеют во времени периодическую изменчивость (в сизигийно-квадратурном периоде), вызванную влиянием второстепенных волн, которые не выделяются из этих циклов (если их учесть и получить гармонические постоянные, то периодичность исчезает). Для определения средних значений амплитуд (наблюдения и предвычисления), необходимых для калибровки прилива, следует выбрать период осреднения.

За наименьший оптимальный период анализа нами выбран календарный месяц. Этот период является минимальным для строгого разделения основных волн прилива. Также в пределах месяца можно приближенно считать неизменными константы основных волн прилива в условиях их сезонной изменчивости.

Гармонический анализ месячных серий в нашем способе выделяет 23 волны, разрешаемые по критерию Рэля. Хотя в дальнейшем используются результаты только для волны  $M_2$ , но список волн сделан полным для точного выделения этой волны (при анализе месячной серии группы волн и отдельные волны влияют друг на друга).

По пункту 7: с целью сохранения естественного сезонного хода амплитуды, который в конкретном году иногда отличается от предвычисляемого среднего, мы рекомендуем применять калибровку при значимом расхождении амплитуд в каждом месяце. Приближенно можно считать значимой разность амплитуд в каждом месяце, превышающую сезонную изменчивость амплитуды волны  $M_2$  между месяцами. Эта изменчивость сильно варьирует в различных акваториях и в среднем составляет от 5 до 15-20% величины амплитуды волны  $M_2$  в заданном месяце. При этом должны быть известны оценки среднего сезонного хода волны.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

### 2.1. АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И ИХ КАЛИБРОВКА

Калибровка измерений уровня моря проводилась на 10 мареографных постах Баренцева моря: Русская Гавань, Нью-Алесунд, Баренцбург, Лиинахамари, Кислогубская ГЭС, Индига, Бугрино, Малые Кармакулы, мыс Константиновский, о-в Варандей.

Для ст. Русская Гавань проводилась калибровка исходных данных за период 1969-1991 гг. Время измерений проводилось по 3 поясу. Анализ данных выявил 10,4% пропусков и 3,0% сомнительных значений, которые затем заменялись на предвычисленные значения. Пропуски >3 месяца были в 1970, 1971, 1972, 1991 гг. Годовые серии за 1970, 1978, 1986, 1987, 1991 гг. подвергались амплитудной калибровке, а за 1970-1976 гг. – фазовой калибровке. В 1969 г. выявлена ошибка времени в 1 час за период с 13 мая по 21 июля

Для ст. Нью-Алесунд проводилась калибровка исходных данных за период 196-2018 гг. В 1983 г. наблюдения не проводились. Анализ данных выявил 5,0% пропусков (без 1983 г.) и 1,7% сомнительных значений, которые затем были заменены на предвычисленные значения при приведении временных рядов к однородному виду. С 1993 по 2003 г. были обнаружены и исправлены выбросы 1-ого значения годового ряда в -50 см, которые искажали оценки гармонического анализа прилива для первого месяца года.

Для ст. Баренцбург проводилась калибровка исходных данных за период 1977-2012 гг. Анализ данных выявил 9,0% пропусков и 6,7% сомнительных наблюдений, которые были заменены на предвычисленные значения при приведении временных рядов к однородному виду. Было исправлено поясное время наблюдений за приливным уровнем: с 1977 по 1986 гг. время было по 2 поясу, с 1987 по 1992 гг. – по 3 поясу (московское декретное), а с 1993 до 2012 г. – по 0 поясу. Пропуски в наблюдениях >3 месяцев были в трех годовых сериях (1978, 1984 и 1994). С 1985 г. амплитуда волны  $M_2$ , в результате износа и неправильной замены СУМ, выросла на 11%. В целом, без предварительной трансформации таких наблюдений с помощью калибровки ими пользоваться не рекомендуется.

Для ст. Лиинахамари проводилась калибровка исходных данных за период 1977-2004 гг. Анализ данных выявил 11,8% пропусков. При этом около полугода не было наблюдений в 1980-1981, 1990, 1998 гг. и полностью не было измерений в 1999-2000 гг. Время наблюдений до 1993 г. было по 3 поясу (московское декретное), поэтому приведение измерений к 0 поясу осуществлялось по процедуре прямого и обратного преобразования Фурье. Выбросы в данных устранялись по остаточным годовым рядам с заданным критерием 10 см. Каждая годовая серия приводилась к Балтийской системе высот (БС) для формирования однородных рядов уровня. С 1989 г. по 2004 гг. было отмечено аномальное увеличение величины прилива и

амплитуды волны  $M_2$ , вызванное плохим состоянием СУМ, которое было скорректировано применением амплитудной и фазовой калибровок.

Для ст. Кислогубская ГЭС проводилась калибровка исходных данных за период 1977-1992 гг. Первичная обработка наблюдений показала, что за весь период с 1977 по 1992 гг. велись по 3 поясу, поэтому всё время было приведено к 0 поясу. Привязка измерений к БС началась с 1980 г.; поэтому в годы 1977-1979 вводилась поправка +277 см. Существенный пропуск был обнаружен в 1990 г. (около полугода), а затем восстановлен по предвычислению по средним оценкам гармонических постоянных за предыдущие годы. В 1992 г. с марта наблюдения были прекращены. Выбросы в данных устранялись по остаточным годовым рядам с заданным критерием 10 см.

Для ст. Индига проводилась калибровка исходных данных за период 1977-1989 гг. Особенностью этой станции является наличие больших пропусков данных: наблюдения велись, в основном, с января-февраля по май-июнь, а в некоторые годы (1980, 1983, 1989) и вовсе не велись. Согласно результатам гармонического анализа, качество измерений было не высоким, поэтому не использовались данные измерений за 1981 г. и 1990-1992 гг. В ходе обработки: время приводилось к 0 поясу, вводилась поправка +453 см к БС, заменялись сомнительные и пропущенные значения. Для надежного выделения волн, описывающих сезонный ход основных волн прилива, требуются годовые серии наблюдений, поэтому была применена реконструкция с помощью предвычисления по средним месячным наборам волн. До полных годовых серий дополнялись наиболее качественные наблюдения за годы: 1977, 1979, 1982, 1985, 1986, 1987, 1988.

Для ст. Бугрино проводилась калибровка исходных данных за период 1977-1996 (2012) гг. Было обнаружено, что измерения, как правило, выполнялись в сроки за 30 минут до целого часа. Время велось по 3 поясу до 1994 г. БС была введена с 1984 г., поэтому вводилась корректирующая поправка +249 см. В целом, за 1977-1983 гг. количество брака составило 26%, а за 1997-2012 гг. более 50%, поэтому период 1997-2012 гг. использовался только для расчета средних суточных значений при анализе долгопериодных приливов. Также на ст. Бугрино сильно выражены мелководные приливы, полное описание которых можно получить только по ежечасным наблюдениям. В противном случае, использование срочных наблюдений (4 срока в сутки) не позволит определить все составляющие приливов с периодом менее 12 часов, что создаст наложение частот в долгопериодной полосе спектра.

Для ст. Малые Кармакулы проводилась калибровка исходных данных за период 1977-2012 гг. Также использовались кратковременные ежечасные серии в 1939 и в 1940 гг., которые оказались очень полезными при привязке по времени срочных измерений и корректировки сезонного хода основных волн, так как были выполнены в лето и зимой. Анализ данных

выявил около 6% пропусков и 23% сомнительных значений, которые подлежали замене предвычисленными. Из анализа были исключены годы с низким качеством наблюдений: 1977, 1981-1982, 1989-1994, 2009-2012. Для предвычислений были сформированы две модели констант прилива: на основе средних годовых за весь период наблюдений и средних месячных констант на весь годовой цикл.

Для ст. мыс Константиновский проводилась калибровка исходных данных за период 1977-1990 гг. Это были кратковременные серии с многочисленными пропусками и уходами от 0 поста. За 1983-1985 годы наблюдения отсутствовали. Приводка к БС составила за период 1977-1982 гг. +275 см, а в 1980 г около +167 см. Произведен перевод из 3 пояса в 0 пояс для каждой месячной серии. Выполнена амплитудная и фазовая калибровка отдельных месяцев в 1980, 1981, 1986, 1987, 1989 гг. Для предвычислений была сформирована модель прилива по гармоническим постоянным на каждый месяц года. Далее по 11 годам (1977-1982, 1986-1990) производилась реконструкция наблюдений до полных годовых серий. Был рассчитан сезонный ход суточных, полусуточных и мелководных волн по результатам гармонического анализа месячных серий за 11 лет.

Для ст. о-в Варандей проводилась калибровка исходных данных: ежечасных измерений за период 1978-1994 гг., срочных измерений за период 1988-2012 гг. Последние (срочные) измерения проводились с июня по октябрь (сентябрь) и содержали большое количество пропусков – их качество было не высоким, поэтому они использовались только при расчете долгопериодных приливов. Ежечасные данные с 1978 по 1983 гг. приводились к БСВ с поправкой +377 см. Их гармонический анализ проводился по той же схеме, как и на ст. м. Константиновский. При этом были полностью забракованы 1981, 1985, 1991 и 1994 гг.

Для откалиброванных годовых серий ежечасных измерений уровня был проведён повторный расширенный гармонический анализ приливов с целью оценки сезонного хода гармоник основных волн. При этом оценка среднего квадратичного отклонения и 90% доверительный интервал в каждом классе прилива рассчитывались по Фурье преобразованию остаточного ряда за весь период наблюдений, чтобы избежать искусственного улучшения за счет периодов предвычислений. В конечном итоге, в зависимости от станции, значимыми признавались гармоники (от 52 до 103) от суточного до 1/8-суточного или 1/12-суточного классов приливов.

Также на станциях был выполнен гармонический анализ долгопериодных приливов по ряду средних суточных значений, полученных с помощью специального нерекурсивного фильтра. По итогам анализа были получены характеристики долгопериодных значимых гармоник (от 7 до 10) с амплитудами выше 90% доверительного интервала (например, M<sub>n</sub> S<sub>a</sub>, S<sub>sa</sub>, S<sub>ta</sub>, S<sub>qa</sub>, M<sub>sm</sub>, M<sub>m</sub>, M<sub>sf</sub>, M<sub>f</sub>, M<sub>tm</sub>).



## 2.2. ОСОБЕННОСТИ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ПРИЛИВОВ В НЬЮ-АЛЕСУНДЕ И БАРЕНЦБУРГЕ.

В настоящее время при гармоническом анализе приливов используется известное разложение приливного потенциала в виде суммы простых гармонических волн (членов) по Картрайту [1]. Однако в некоторых районах Мирового океана выявлены аномальные амплитуды суточных приливов 3-ей степени, что выявляет так называемую тонкую структуру прилива. О необычно больших амплитудах лунного прилива  $M_1$  с периодом в одни средние лунные сутки в морях Западной Европы впервые сообщил Картрайт [24]. Это явление обнаружил также Эймин [25] при изучении приливов вдоль западного побережья Англии, но длина используемых им рядов уровня не превышала 9 лет. Как известно, для выделения приливов 3-ей степени, имеющих малую амплитуду в потенциале, требуются временные ряды с длиной не менее 19 лет. Такая работа была проделана и для Баренцева моря на примере станций Нью-Алесунд и Баренцбург.

В таблице (Таблица 2) приведены наибольшие члены (линии) в группе (кластере) суточного прилива  $M_1$ , возникающих от сферических гармоник второй и третьей степени потенциала, и называемых как приливы второй и третьей степени по [1], которые будут рассматриваться нами далее. В таблице (Таблица 2) в 2 случаях не разделяются линии приливов 2-й и 3-й степени, так как их угловые скорости почти совпадают. В этих случаях приведены угловые скорости и аргументы большей по амплитуде линии, а коэффициенты  $C_n^1$  (амплитуды по потенциалу Картрайта или теоретический статический прилив) даны для обеих гармоник. Теоретический статический прилив  $H_{ст} = C_n^m W_n^m$  определялся с учетом широтных коэффициентов для приливов второй и третьей степени  $W_n^m$  [1].

Таблица 2 – Значения угловых скоростей, аргументов и амплитуд (коэффициентов)  $C_n^1$  (абсолютная величина) линий (членов) в кластере суточного прилива  $M_1$ .

| № линии | Угловая скорость, Град/ч | Числа Картрайта и постоянная |        |   |   |    |    |    |                 | Коеф. $C_n^1 \times 10^5$ |
|---------|--------------------------|------------------------------|--------|---|---|----|----|----|-----------------|---------------------------|
|         |                          | N                            | $\tau$ | s | H | P  | N' | p1 | $\theta$ , град |                           |
| 1.      | 14.487410                | 2                            | 1      | 0 | 0 | -1 | 0  | 0  | 90              | 1072                      |
| 2.      | 14.489846                | 3                            | 1      | 0 | 0 | 0  | -1 | 0  | 0               | 139                       |
| 3.      | 14.492052                | 3                            | 1      | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 180             | 939                       |
| 4.      | 14.496694                | 2                            | 1      | 0 | 0 | 1  | 0  | 0  | 90              | 2984                      |

Примечание.  $n$  – степень прилива (2-второй и 3-третьей степени). Под числами Картрайта (Дудсона) подразумеваются шесть независимых переменных:  $\tau$  – средние лунные сутки,  $s$  – средняя долгота Луны,  $h$  – средняя долгота Солнца,  $p$  – средняя долгота перигея Луны,  $N'$  – отрицательная долгота восходящего узла Луны,  $N, p_1$  – средняя долгота перигея Солнца,  $\theta$  – постоянная для приведения гармоник (линий) к функции  $\cos$ .

Выборочные результаты тонкого гармонического анализа наблюдений за уровнем моря в 2 пунктах Баренцева моря для линий в кластере суточного прилива  $M_1$ , приведенных в таблице (Таблица 2), были даны в следующей таблице (Таблица 3):

Таблица 3 – Значения амплитуд  $H$  (см) и углов положений  $g$  (град) по времени  $0$  пояса и величина отношения  $R$  в кластере суточного прилива  $M_1$ .

| Пункт       | Линия 1,<br>$n=2$ |       |      | Линия 2,<br>$n=3$ |       |      | Линия 3,<br>$M_1 n=3$ |      |      | Линия 4,<br>$NO_1 n=2$ |       |      |
|-------------|-------------------|-------|------|-------------------|-------|------|-----------------------|------|------|------------------------|-------|------|
|             | $H$               | $g$   | $R$  | $H$               | $g$   | $R$  | $H$                   | $g$  | $R$  | $H$                    | $g$   | $R$  |
| Нью-Алесунд | 0.1280            | 192.5 | 1.93 | 0.0593            | 42.8  | 6.89 | 0.4089                | 39.6 | 7.04 | 0.1846                 | 217.4 | 0.62 |
| Баренцбург  | 0.1319            | 171.7 | 1.79 | 0.0714            | 355.4 | 7.47 | 0.4218                | 19.5 | 6.54 | 0.2049                 | 202.4 | 0.69 |

Результаты анализа показали (см. Таблица 3), что в основном в пунктах приливы 3-й степени ( $n=3$ ) имеют амплитуды гораздо больше, чем следует по теории в разложении потенциала. Наибольший интерес представляет явление аномального усиления лунного суточного прилива  $M_1$  (имеющего наибольший коэффициент в потенциале среди суточных приливов третьей степени) в пунктах, с превышением амплитуд в 6.5–7.0 раза в сравнении с теоретическим приливом. В то же время приливы второй степени ( $n=2$ ) приближенно соответствуют статическим значениям.

Как известно, иногда аномальные линии в приливном спектре могут возникать вследствие нелинейных взаимодействий в виде сумм или разностей угловых скоростей (частот). Например, прилив второй степени  $NO_1$  может иметь двойника от взаимодействия  $N_2$  и  $O_1$ , но эмпирические функции отклика (кривые отношения амплитуд волн, наблюдаемых к статическим) не подтверждают присутствия этого двойника. Также на частоте прилива третьей степени  $M_1$  может возникать двойник от разности волн  $M_2$  и  $M_1$ . Оценка такого двойника  $MM_1$  была произведена по коэффициенту взаимодействия и фазовому соотношению волны  $MP_1$ , представляющую в основном мелководный прилив [26]. Оказалось, что амплитуда двойника прилива  $MM_1$  не должна превышать 0,07 см.

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

Приведенные нами данные позволяют утверждать о неприменимости классической нодальной коррекции к приливу  $M_1$  при анализе и предвычислении этих приливов. Ранее этот вопрос обсуждался в работах [24–26] где пришли к аналогичному выводу.

### 2.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНОК СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОСНОВНОЙ ПОЛУСУТОЧНОЙ ВОЛНЫ M<sub>2</sub> В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ.

В 2003 г. в работе Войнова Г.Н. [5] была предложена впервые в мировой практике классификация сезонной изменчивости приливов арктических морей - Баренцева, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского. Были привлечены материалы, как правило, ежечасных наблюдений за уровнем моря в 17 пунктах за период в основном 1977-1990 гг.

В последнее десятилетие в рамках тем ЦНТП было выполнено более полное исследование сезонной изменчивости приливов Баренцева моря на более полном периоде наблюдений за уровнем моря.

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

Как видно из данных рисунка (Рисунок 2) на станциях Мурманского прибрежного района (Лиинахамари, Мурманск, Кислогубская ГЭС, Полярное, Териберка, Иоканьга) наблюдается аномальный 3 тип сезонного хода с максимумом амплитуды в августе с увеличением от средней (нормы) на 3-4% и минимумом фазы в марте с уменьшением всего на 1-2 градуса от средней годовой величины.

На севере Баренцева моря на о-ве Шпицберген (Нью-Алесунд, Баренцбург) размах сезонного хода выражен слабо, и он протекает по аномальному 2 типу. Выделяется аномальный сезонный ход прилива на ст. Русская Гавань (север Новой Земли), где максимум амплитуды виден в апреле и достигает 3%, а минимум фазы наблюдается в сентябре. Ранее предпринимались попытки определения здесь сезонного хода волны M<sub>2</sub> (Каганский, 1965), но вследствие крайне малого ряда устойчивые оценки не были получены. В бухте Тихой и на о-ве Хейса сезонный ход близок к классическому типу.

В южной и юго-восточной части Баренцева моря проявляются наибольшие различия типа кривых сезонного хода. Наиболее резко выраженный аномальный сезонный ход волны M<sub>2</sub> отмечается в Печорском заливе (м. Константиновский) и на юге Новой Земли (м. Белый Нос). Здесь максимум амплитуды до 31% от нормы происходит в июле (Печорский залив), а минимум фазы до 11 град виден также в июле.

На юге моря на ст. Варандэй наблюдается промежуточный между 3 и 1 типами сезонный ход соответственно амплитуды и фазы. Классический 1 тип сезонного хода отмечается только на ст. Бугрино и Индига. Здесь увеличение амплитуды волны M<sub>2</sub> в Бугрино в сентябре достигает 10% от нормы (средней годовой величины), а уменьшение фазы составляет в летний период не более 4 град.

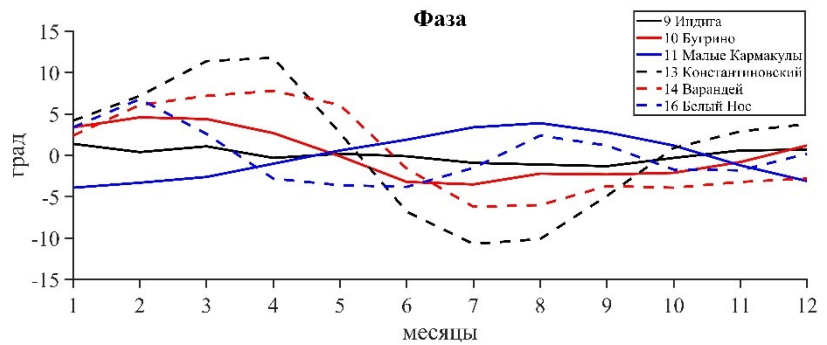
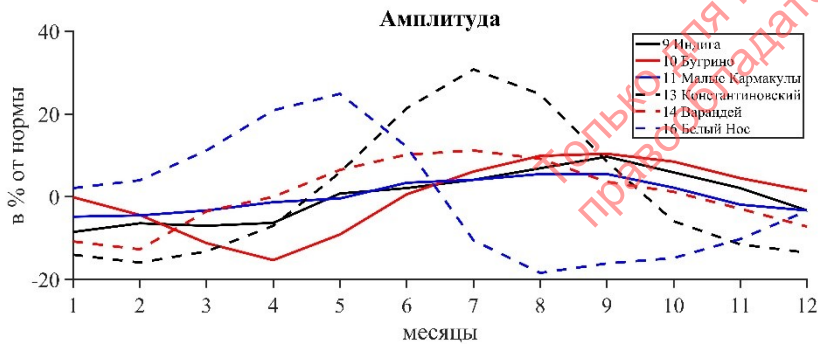
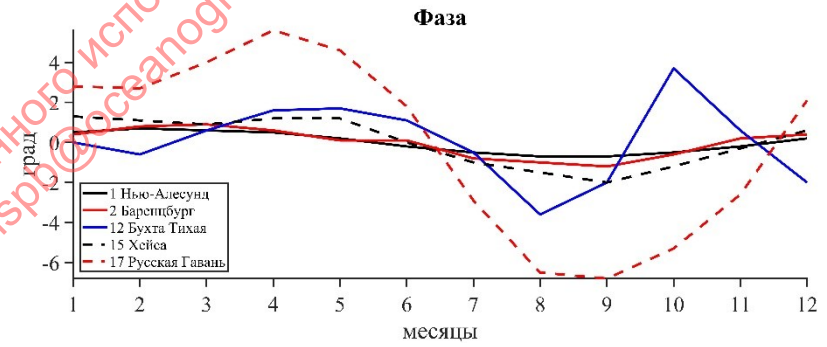
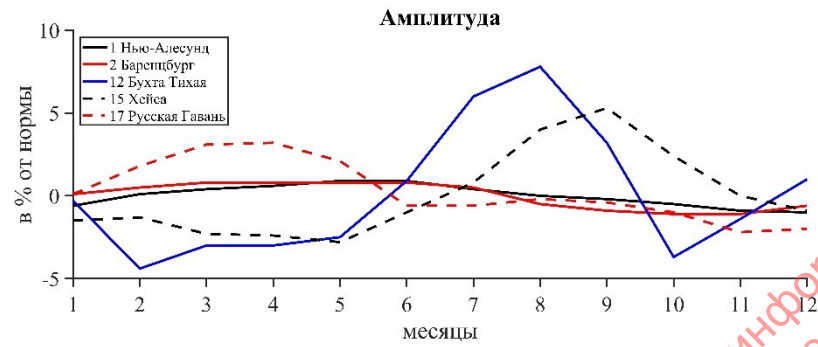
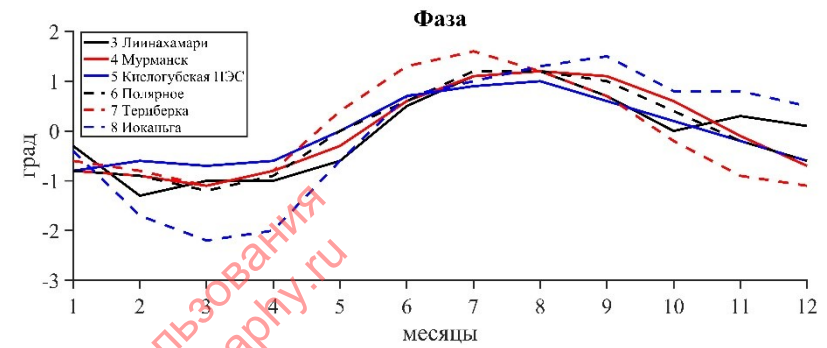
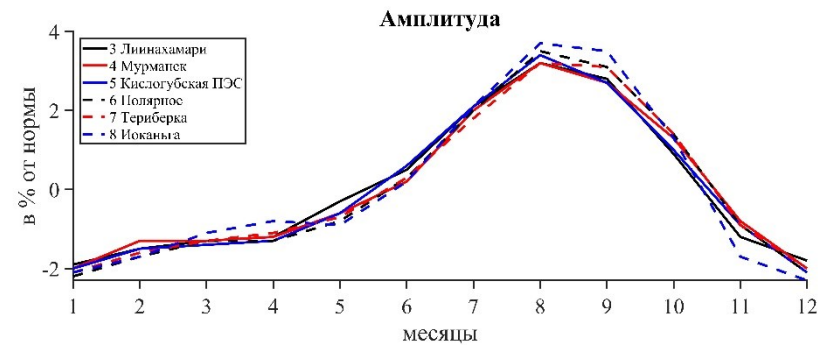


Рисунок 2 – Сезонный ход волны M2 в Баренцевом море

#### 2.4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНОК СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОСНОВНОЙ СУТОЧНЫХ ВОЛН $K_1$ И $O_1$ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ.

В сезонном ходе суточных волн  $K_1$  и  $O_1$  преобладает полугодовая периодичность (см. Таблица 5). Однако может наблюдаться сочетание годовой изменчивости в амплитуде и полугодовой или годовой в фазе. На ряде пунктов прослеживается период в 3-4 месяца. При этом во всех случаях моменты наступления экстремальных значений амплитуд и фаз не совпадают во времени. Значения максимальных отклонений амплитуд от нормы лежат в основном в диапазоне 10-20%, а фаз – 6-16 град.

Наиболее согласованный между станциями вид изменчивости наблюдается на станциях Мурманского берега. Здесь присутствует полугодовой период в ходе амплитуд (с первыми максимумами в марте или феврале и вторыми максимумами в сентябре). В ходе фаз первый максимум или не выражен или виден в феврале, а второй максимум отмечается в августе. То есть, существует сдвиг во времени между максимумами амплитуд и фаз.

В других районах Баренцева моря наблюдается различный вид хода кривых амплитуд и фаз волны  $K_1$ . Причины этого феномена будут осуждаться ниже.

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. Отметим также, что одинаковый тип сезонного хода констант волн  $K_1$  и  $O_1$  наблюдается только на 6 пунктах (32%). 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.

Позволяет ли такой результат говорить о разной физической природе формирования сезонного хода полусуточных и суточных волн прилива. Однозначно и полностью ответить на этот вопрос в настоящее время затруднительно.

## 2.5. УТОЧНЕНИЕ КЛАССИФИКАЦИИ СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПОЛУСУТОЧНЫХ И СУТОЧНЫХ ВОЛН ПРИЛИВА.

В таблицах (Таблица 4, Таблица 5) приведена уточненная параметризация всего разнообразия сезонного хода основных полусуточных  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$  и суточных волн  $K_1$  и  $O_1$ . Видно из таблиц, что в полусуточных волнах преобладает классический вид сезонного хода с максимумом амплитуды и минимумом фазы в июле-сентябре. Однако в 29% случаев у волны  $M_2$  встречается аномальный вид сезонного хода волны.

Таблица 4 - Распределение типов сезонного хода волн  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_1$  и  $O_1$ , по новым сведениям, в Баренцевом море (17 станций) и Карском море (18 станций). В скобках указано число случаев в % общего числа пунктов.

| Тип сезонного хода | Волна $M_2$ (число случаев) | Волна $S_2$ (число случаев) | Волна $N_2$ (число случаев) |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1                  | 17 (49)                     | 17 (59)                     | 14 (40)                     |
| 2                  | 10 (29)                     | 1 (3)                       | 8 (23)                      |
| 3                  | 8 (23)                      | 11 (38)                     | 7 (20)                      |
| 4                  | 0                           | 0                           | 3 (8)                       |
| 5                  | 0                           | 0                           | 3 (8)                       |

Таблица 5 - Распределение типов сезонного хода волн  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_1$  и  $O_1$ , по новым сведениям, в Баренцевом море (17 станций) и Карском море (18 станций). В скобках указано число случаев в % общего числа пунктов.

| Тип сезонного хода | Волна $K_1$ (Число случаев) | Волна $O_1$ (Число случаев) |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1                  | 18 (51)                     | 15 (43)                     |
| 2                  | 7 (20)                      | 6 (17)                      |
| 3                  | 10 (29)                     | 14 (40)                     |
| 4                  | 0                           | 0                           |

## 2.6. ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ВОЛН ПРИЛИВА В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ.

Для объяснения возможных причин наблюдаемой сезонной изменчивости приливов в морях Северного ледовитого океана был проведён краткий обзор соответствующей научной литературы. Было установлено, выраженная сезонная изменчивость приливов не была связана с астрономическими причинами.

Ранее автор установил, что влияние дрейфующего ледяного покрова 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 90-е годы.

В начале XXI века появились работы, объясняющие сезонные вариации волны прилива  $M_2$  иными факторами. Например, в работе [27] производилось численное моделирование приливов в Северном море, которое установило зависимость сезонного хода волны  $M_2$  от метеорологических сил (рассчитываемых по полям реанализа). В другой работе [28] сезонная вариация волны  $M_2$  была идентифицирована как влияние мелководья со значительным воздействием метеорологических сил. Было установлено, что 60% сезонного хода на 12-ти береговых постах на юго-востоке Северного моря зависело от влияния метеорологических сил и только 40% изменений объяснялось нелинейным взаимодействием волн прилива.

Совершенно иной подход к объяснению сезонной изменчивости волны  $M_2$  был продемонстрирован в работе [29]. На двумерной модели было показано, что сезонная стратификация водных масс в Желтом и Восточно-Китайском морях отвечает за сезонную изменчивость волны  $M_2$ . Основные черты бароклинных приливных эффектов были изучены с помощью двумерной модели с изменяющейся стратификацией, определяемой в свою очередь толщиной верхнего слоя воды и разностью плотности между двумя слоями. Было показано, что бароклинные эффекты, возникающие из-за крупномасштабных горизонтальных градиентов уклона на разделе двух слоёв различной плотности связаны с распространением поверхностного баротропного прилива. В результате сезонная стратификация водных масс имеет существенное влияние на приливы, включая изменение степени трения сдвига, вариации диссипации трения и вариаций потока баротропной энергии. Отметим, что в последнее время произошел качественный поворот в численном моделировании и самые продвинутые из них учитывают сезонную изменчивость приливов в СЛО.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании была успешно протестирована новая модель гармонического анализа по МНК (версия ААНИИ-ГОИН), которая основана на выделения сложных нелинейных волн в годовых и многолетних наблюдениях, способных полностью описывать любую форму (тип) сезонной изменчивости прилива.

Для 9 станций Баренцева моря была проведена калибровка исходных данных по методике, разработанной автором. Способ калибровки приливов показал высокую эффективность при трансформации участков наблюдений с недостаточно высоким качеством. Без применения этого способа результаты обработки и анализа приливов имели бы не устойчивый и не достоверный характер вследствие присутствия в наблюдениях большого числа пропусков (от 5,0 до 11,8%), брака и сомнительных интервалов измерений (от 1,7 до 26%). Анализ показал, что наблюдения за уровнем за период с 1977 по 2012 в Баренцевом море не могут быть использованы при изучении приливов без специальной трансформации временных рядов.

По результатам гармонического анализа ежечасных годовых серий для станций Баренцева моря были получены оценки средних за год амплитуд и фаз приливных волн в диапазоне спектра от долгопериодных колебаний (от 7 до 11 волн) до 1/12-суточного класса (от 52 до 103 волн).

На станциях Нью-Алесунд и Баренцбург была поставлена задача исследования тонкой структуры морских приливов (всех членов или линий потенциала) в суточном диапазоне по длительным наблюдениям уровня с продолжительностью близкой к нодальному циклу (18,61 г.). Результаты выделения приливов с малыми величинами подтверждают достоверность применяемой нами методики. Обратим внимание на соответствие между двумя пунктами амплитуд и фаз всех линий приливов. Суточные приливы третьей степени потенциала по величине малы и составляют в Нью-Алесунде и Баренцбурге всего 0,4 см. Они представляют не практический, а теоретический интерес. Приведенные нами данные позволяют утверждать о неприменимости классической нодальной коррекции к приливу  $M_1$  при анализе и предвычислении этих приливов.

По последовательным периодам более 19 лет на 17 станциях Баренцева моря была рассчитана средняя сезонная изменчивость для основных полусуточных ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ) и суточных ( $K_1$ ,  $O_1$ ) волн прилива.

Результаты для полусуточной волны  $M_2$  показывают, что сезонный ход этой волн имеет преимущественно годовую периодичность. Общий размах её сезонной изменчивости закономерно возрастает с севера (около 1-4% от нормы) на юг, достигая наибольших значений



на юго-востоке моря (до 31% от нормы). В целом, для полусуточной волн преобладает классический (тип 1) вид сезонного хода приливной волны с максимумом амплитуды и минимумом фазы в июле-сентябре. Исключение составляют районы с аномальным сезонным ходом прилива, к которым относятся: мурманское побережье (3 тип – минимум фазы в марте), побережья о-вов Шпицберген и Новая Земля (2 тип), а также на юге моря (между 3 и 1 типом).

Результаты для суточных волн  $K_1$  и  $O_1$  показывают, что для этих волн преобладает полугодовая периодичность, хотя иногда отмечается сочетание годовой изменчивости в амплитуде и полугодовой/годовой в фазе. Во всех случаях наблюдений моменты наступления экстремальных значений амплитуд и фаз не совпадают во времени. Размах сезонных отклонений амплитуд от нормы лежит в диапазоне около 10-20%, а фаз – 6-16°. В целом, у данных волн преобладает классический вид (тип 1) сезонного хода: 51% всех наблюдений для  $K_1$ , 43% - для  $O_1$ . Наибольшая согласованность между станциями отмечается у мурманского побережья. В других районах характерны существенные различия хода кривых амплитуд и фаз  $K_1$ . По сравнению с оценками волны  $M_2$  в Баренцевом море, нет соответствия вида и характера хода кривых суточной волны  $K_1$  с полусуточным приливом, что поднимает вопрос о разной физической природе формирования их сезонного хода. Однако, полностью ответить на этот вопрос в настоящее время затруднительно.

На основании анализа современной научной литературы были рассмотрены возможные гипотезы физического механизма сезонной изменчивости характеристик приливной волны в морях арктического бассейна. В соответствии с данными статьями, потенциальными причинами сезонных колебаний прилива могут быть метеорологические силы, нелинейные взаимодействия волн на мелководье, а также стратификация водных масс. Последний фактор характерен для акваторий со значительной сезонной стратификацией вод, что характерно для морей Северного ледовитого океана, в котором воды сильно стратифицированы в летний период и становятся более однородными или хорошо перемешанными в зимний период. Тем не менее, для подтверждения или опровержения высказанных гипотез требуются дальнейшие исследования, включающие проведение отдельных численных экспериментов в этом географическом районе

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Cartwright D.E., Tayler R.J. New Computations of the Tide-generating Potential // *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. 1971. Vol. 23, № 1.
2. 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. Vol. 4. P. 55–68.
3. Войнов Г.Н. Гармонический анализ морских приливов с описанием сезонной изменчивости основных суточных, полусуточных и мелководных волн // *Труды Государственного океанографического института*. 2011. Vol. 213. P. 169–178.
4. Voinov G.N. Structure of the tide in Amderma according to the results of a harmonic analysis of sea level observations for a 19-year period from 1962 to 1980: Proc. of the Russian-Norwegian workshop 95. Oslo, 1997. 176–178 p.
5. Voinov G.N. New interpretation of seasonal variability of tides of the russian Arctic seas // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2003. № 9.
6. Bell C., Vassie J.M., Woodworth P.L. TASK-tidal analysis software Kit-200. Proudman Oceanogr. Lab. PSMSL: 1999 ver. Proudman Oceanogr. Lab. PSMSL, 1996. P. 19.
7. Doodson A.T. The Analysis of Tidal Observations // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*. The Royal Society, 1928. Vol. 227. P. 223–279.
8. Foreman M.G. Manual for tidal heights analysis and prediction // *Tech. Rep. Pac. Mar. Sci.* 1981.
9. Godin G. The analysis of tides. Liverpool: Liverpool University press, 1972. 264 p.
10. Parker B.B. Tidal analysis and prediction. NOAA Special publication NOS CO-OPS 3. U.S. Department of Commerce, 2007. 378 p.
11. Pawlowicz R., Beardsley B., Lentz S. Classical tidal harmic analysis including error estimates in MATLAB and T\_Tide // *Comput Geosci*. 2002. Vol. 28.
12. Rossiter J.R., Lennon G.W. An Intensive Analysis of Shallow Water Tides // *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. 1968. Vol. 16, № 3.
13. Zetler B.D., Cummings R.A. A harmonic method for predicting shallow-water tides // *J Mar Res*. 1967. Vol. 25, № 1. P. 103–114.
14. Войнов Г.Н. Приливные явления в Карском море // *Изд-во Русского географического общества*. 1999. Vol. 109. P. 103–114.

15. Войнов Г.Н. Способ приведения ежечасных наблюдений за уровнем моря к однородным рядам с помощью калибровки приливов // проблемы Арктики и Антарктики. 2015. Vol. 2, № 104. P. 68–80.
16. Войнов Г.Н. О качестве многолетних наблюдений за уровнем на стационарной сети в прибрежной зоне морей северо-запада и арктических морей России // Труды Государственного океанографического института. 2013. Vol. 2014. P. 223–236.
17. Войнов Г.Н. Практика гармонического анализа приливов многолетних временных рядов (на примере полярной станции о. Голомянный, Карское море) // проблемы Арктики и Антарктики. 2016. Vol. 2, № 108. P. 16–33.
18. Войнов Г.Н., Наумов А.К. Приливы в юго-западной части Карского моря. Результаты применения способа калибровки приливов // проблемы Арктики и Антарктики. 2017. Vol. 4, № 114. P. 98–115.
19. Войнов Г.Н. Гармонический анализ морских приливов с описанием сезонной изменчивости основных суточных, полусуточных и мелководных волн // Труды ГОИНа. 2011. Vol. 213. P. 169–178.
20. Войнов Г.Н. Приливные явления в Карском море // Проблемы Арктики и Антарктики. СПб.: Изд-во Русского географического общества., 1999. P. 103–114.
21. Doodson A.T. The analysis of tidal observations // Phil. Trans. R. Soc. London, 1928. P. 223–279.
22. Parker B.B. Tidal analysis and prediction. NOAA Special publication NOS CO-OPS 3. U.S., 2007. 378 p.
23. Cartwright D.E., Tayler R.J. New computations of the tide-generating potential // Geophys. J. R. Astr. Soc. . 1971. Vol. 23, № 1. P. 45–74.
24. Cartwright D.E., Lisitzin, E. 1974. Sea-level changes. Elsevier Oceanogr. Ser. 8. Elsevier Sci. Publ. Co., Amsterdam, Oxford, New York, vi + 286 p. \$28.90. // Limnol Oceanogr. 1975. Vol. 20, № 4.
25. Amin M. On analysis and prediction of tides on the west coast of Great Britain // Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. 1982. Vol. 68, № 1.
26. Voinov G.N. Harmonic tidal analysis for the nodal 18.61-year period with Amderma settlement taken as an example // Russian Meteorology and Hydrology. 2006. № 1.
27. Flather R.A., Davies A.M. Note on a preliminary scheme for storm surge prediction using numerical models // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 1976. Vol. 102, № 431.
28. Huess V., Andersen O.B. Seasonal variation in the main tidal constituent from Altimetry // Geophys Res Lett. 2001. Vol. 28, № 4.

29. Kang S.K. et al. Two-layer tidal modeling of the Yellow and East China Seas with application to seasonal variability of the M<sub>2</sub> tide // J Geophys Res Oceans. 2002. Vol. 107, № C3.

Только для информационного использования  
правообладатель: admspb@oceanography.ru