

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-29-43>
УДК 551.46.062.1



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

К решению проблемы прогноза уровня моря у мыса Каменный в Обской губе

Г.Н. Войнов¹, Н.В. Головин¹, Н.В. Кубышкин^{2*}, М.Ю. Кулаков¹,
А.А. Скутин¹, К.Г. Смирнов¹, О.В. Хаймина³

¹ — ГИЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия

² — ООО «Арктик Шельф Консалтинг», Санкт-Петербург, Россия

³ — Российский государственный гидрометеорологический университет,
Санкт-Петербург, Россия

*kuba@arctic-shelf.com

Резюме

Проблема краткосрочного прогнозирования уровня моря в районе мыса Каменный Обской губы актуализировалась с началом функционирования Новопортовского терминала круглогодичной отгрузки нефти («Ворота Арктики»). Краткосрочный прогноз уровня необходим для танкеров, осуществляющих транспортную перевозку нефти, для прохождения относительно мелководного участка, расположенного к северу от терминала. Для оперативного контроля уровня непосредственно в районе мыса Каменный организованы круглогодичные ежедневные наблюдения с использованием буйковых уровнемеров со спутниковым каналом передачи данных. Результаты гармонического анализа наблюдений за уровнем в районе м. Каменный за 2016–2021 гг. показали как существенную сезонную изменчивость амплитуд и фаз волны M_2 в годовом цикле, так и их межгодовую изменчивость, обусловленную различными ледовыми условиями Обской губы (легкие, средние, тяжелые). С учетом этих результатов краткосрочный прогноз суммарного уровня строится путем сложения предвычисленного с учетом сезонной изменчивости прилива и расчетных значений неперiodических колебаний, получаемых в ходе гидродинамического моделирования с использованием трехмерной гидродинамической модели совместной циркуляции вод и льдов AARI-IOSM. Ежедневные наблюдения за уровнем в районе мыса Каменный и прогноз уровня для обеспечения мореплавания осуществляются с 2017 г. и продолжаются в настоящее время.

Ключевые слова: наблюдения за уровнем моря, Обская губа, прогноз уровня, сезонная изменчивость прилива.

Для цитирования: Войнов Г.Н., Головин Н.В., Кубышкин Н.В., Кулаков М.Ю., Скутин А.А., Смирнов К.Г., Хаймина О.В. К решению проблемы прогноза уровня моря у мыса Каменный в Обской губе // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 1. С. 29–43. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-29-43>.

Поступила 01.12.2022

После переработки 27.01.2023

Принята 31.01.2023

Approach to solving the problem of sea level forecasting off Cape Kamenny in the Ob' Bay

Gennadiy N. Voinov¹, Nikolay V. Golovin¹, Nickolay V. Kubyshkin^{2*},
Mikhail Yu. Kulakov¹, Andrey A. Skutin¹, Konstantin G. Smirnov¹,
Olga V. Khaimina³

¹ — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

² — “Arctic Shelf Consulting” LLC, St. Petersburg, Russia

³ — Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

*kuba@arctic-shelf.com

Summary

The problem of short-term sea level forecasting in the area of Cape Kamenny in the Ob' Bay has become important since the Novoportovskiy terminal (known as “Arctic Gate”) began operating for year-round oil shipment. The tankers loading the oil from the terminal have to pass through relatively shallow waters, located to the north, limiting the vessels draft. Thereby a short-term water level forecast is required relative to the lowest theoretical level for tankers loading at the terminal. The year-round hourly observations using buoy level gauges with a satellite channel of data transmission are organized for quick level monitoring directly in the area of Cape Kamenny. The results of the harmonic analysis of water level observations in the area of Cape Kamenny for 2016–2021 showed significant seasonal variability of amplitudes and phases of the wave M_2 in the annual cycle, as well as their interannual variability due to various ice conditions of the Ob' Bay (light, medium, heavy). Based on these results, the processing and analysis of observations data over the last month are performed by the end of each month. According to these results, the current values of harmonic constants, dependent on actual ice conditions are specified and calculation of the tide is carried out for the next month. The calculation of the forecast values of the total level is composed of calculated tide and short term (with a lead time of up to 5 days) forecast of non-periodic level fluctuations using the three-dimensional hydrodynamic model of joint water and ice circulation AARI-IOCM. At the final stage of the forecast preparation, the predicted level, usually calculated relative to the conditional long term average annual value, is bound to the lowest theoretical level (according to the current values of the level gauge) and transferred to the operator of the terminal and to the tanker. The hourly observations of water level in the area of Cape Kamenny and level forecasting have been carried out since 2017 and are still continuing.

Keywords: forecasting of sea level, Ob' Bay, sea level observations, seasonal variability of the tide.

For Citation: Voinov G.N., Golovin N.V., Kubyshkin N.V., Kulakov M.Yu., Skutin A.A., Smirnov K.G., Khaimina O.V. Approach to solving the problem of sea level forecasting off Cape Kamenny in the Ob' Bay. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2023, 69 (1): 29–43. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-29-43>.

Received 01.12.2022

Revised 27.01.2023

Accepted 31.01.2023

ВВЕДЕНИЕ

Круглогодичная навигация из Мурманска к мысу Каменный Обской губы была начата с введением в эксплуатацию Новопортовского терминала отгрузки нефти (2015 г.), получившего название «Ворота Арктики» (рис. 1). При этом танкерам, вывозящим нефть Новопортовского месторождения, приходится проходить участок губы с глубинами 10–11 м, что ограничивает их загрузку. Этот участок расположен в 3–20 милях к северу от м. Каменный; из-за его наличия приходится следить, чтобы осадка груженого танкера позволяла осуществлять безопасный проход, при том,

Рис. 1. Новопортовский терминал круглогодичной отгрузки нефти. Фото Н.В. Головина



Fig. 1. Novoportovskiy terminal of the year-round oil loading. Photo by N.V. Golovin

что фактические глубины на данном участке могут меняться с изменением уровня воды. Согласно лоции [1], величина прилива в районе м. Каменный достигает 0,6 м (в сизигию), размах суммарных колебаний с учетом сгонно-нагонных явлений здесь может достигать до 2,2 м. Это требует регулярного обеспечения судоходства данными по уровню и прогнозными оценками изменения уровня на несколько часов вперед, за которые грузовой танкер дойдет от терминала до мелководного участка и преодолеет его.

Ближайшие к рассматриваемому району наблюдения за уровнем на сети Росгидромета выполняются в Новом Порту — в 100 км от Новопортовского терминала (рис. 2). При такой удаленности уровенного поста его данные не являются репрезентативными для терминала и участка с пониженными глубинами. К тому же наблюдения за уровнем в Новом Порту срочные (4 раза в сутки), что недостаточно для оперативного обеспечения мореплавания.

Еще одной особенностью краткосрочного прогнозирования уровня в районе м. Каменный является большая изменчивость прилива между летним и зимним периодами из-за влияния ледяного покрова в Обской губе на движение приливной волны.

Первые ежечасные круглогодичные наблюдения за уровнем с помощью СУМ на Каменном выполнялись в 1947–1949 гг. Северной

Рис. 2. Обская губа



Fig. 2. Ob' Bay

Портоизыскательской экспедицией Главсевморпути. Эти данные были обработаны выборочно гармоническим анализом по методу Дарвина А.В. Коптевой и опубликованы в [2, 3]. Также в работе [4] была представлена другая версия обработки гармоническим анализом по методу Дарвина полумесячных серий. Конечно, оценки констант прилива, полученные из полумесячных серий, были неустойчивыми и давали большой разброс, но все же была обнаружена очень большая изменчивость прилива между летним и зимним периодами. Это были первые качественные оценки влияния ледяного покрова в Обской губе на движение приливной волны.

Вследствие мелководности района у м. Каменный капитальные сооружения для измерения уровня не были построены, и наблюдения выполнялись до XXI в. по рейке футштока на свайном посту. Полная оценка качества этих наблюдений и методика обработки и анализа изложена в [5].

В XXI в. эпизодические наблюдения за уровнем у м. Каменный проводились в ходе морских экспедиций АМИГЭ и ААНИИ с помощью современных измерительных устройств, устанавливаемых автономно. С 2017 г., как сказано выше, в этом районе осуществляются круглогодичные ежечасные наблюдения.

Современное обобщение данных гидрологического режима Обской и Тазовской губ выполнено в монографии [6], где даны характеристики режима неперiodических и приливных колебаний уровня в Обской губе для периода середины и конца XX в. Особенности режима приливных и сгонно-нагонных колебаний уровня воды в районе м. Каменный по историческим и современным данным представлены в работе [5]. Но в этой работе не освещались наблюдения за уровнем за период 2016–2021 гг.

Целью данной статьи является демонстрация подхода к прогнозированию колебаний уровня моря у м. Каменный с учетом сезонной изменчивости прилива в сочетании с измерениями в реальном времени и гидродинамическим прогнозом неперiodических колебаний уровня. Для представления особенностей развития приливных колебаний уровня в годовом цикле у м. Каменный и демонстрации важности их учета данные ежечасных наблюдений за 2016–2021 гг. были обработаны гармоническим анализом по методу наименьших квадратов (МНК) по версии ААНИИ [5]. Результаты анализа месячных серий обрабатывались по авторским программам также с целью получения оценок сезонного хода основных волн прилива.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения наблюдений за уровнем моря непосредственно в районе м. Каменный в феврале 2017 г. был развернут ведомственный буйковый уровеньный пост, на котором выполняются ежечасные измерения. Обслуживание поста осуществляется гидрологами ООО «Арктик Шельф Консалтинг», находящимися на береговой базе компании, обеспечивающей функционирование Новопортовского терминала (на момент написания данной статьи оператором является ООО «Онега Шиппинг Лтд»). Ежечасные данные по уровню оперативно передаются компании-оператору (относительно наинизшего теоретического уровня — НТУ) и ежесуточно в Северное УГМС в Архангельск (в БСВ-77 — Балтийской системе высот 1977 г.), в зоне ответственности которого находится ведомственный пост.

Буйковый вариант измерений выбран из-за сложности организации стационарного поста в районе м. Каменный, где из-за плавного увеличения глубин датчик уровня необходимо выносить достаточно далеко от береговой линии (не менее 1 км), чтобы избежать его вмержания в лед в зимнее время, а наличие периодов дрейфа льда при

формировании и разрушении ледяного покрова не позволяет использовать для передачи данных на берег надежную кабельную линию без ее защиты от воздействия льда.

В качестве основного измерителя уровня выбраны буйковые уровнемеры WLG-30 производства ООО «Марлин-Юг», расположенного в г. Севастополе. Данные уровнемеры представляют собой легкие заякоренные буи с размещенным в районе якоря измерительным блоком с датчиком гидростатического давления [7]. Измерительный блок кабелем соединен с буйком, внутри которого находятся датчик атмосферного давления, модем спутниковой связи и другие элементы измерительной системы (блок питания, датчик температуры и пр.). Изначально передача данных осуществлялась по спутниковому каналу ARGOS, но в последние годы производитель перешел на канал Iridium. Данные с уровнемера поступают в течение 5 минут на специализированный геопортал, созданный в ААНИИ для сбора, обработки и анализа гидрометеорологической и ледовой информации в режиме реального времени. Уровнемеры в ледовый сезон устанавливаются на припайном льду с фиксацией буйка на поверхности льда, в безледный период функционируют в основном режиме, при котором заякоренный буй плавает на поверхности воды. В переходные сезоны первичного ледообразования, формирования ледяного покрова, а также весеннего таяния и разрушения льда буйковые уровнемеры приходится переустанавливать во избежание их утраты при дрейфе льда. Уровнемеры переносятся с основных рабочих точек, расположенных на глубинах около 10 м, ближе к берегу: на первичный припай осенью, в прибрежные закраины весной. В случае невозможности безопасного использования в наиболее критичные периоды применяются дополнительные приборы (радиоуровнемеры), а также проводятся визуальные наблюдения с переносной гидрологической рейкой. Необходимость периодической переустановки приборов приводит к тому, что для буйковых наблюдений в районе м. Каменный не существует постоянного нуля поста. Привязка данных к БСВ-77 выполняется при каждой переустановке приборов нивелированием относительно береговых реперов.

Прогнозные оценки уровня требуются танкеру, стоящему под погрузкой для определения его осадки в грузу, при которой он безопасно пройдет мелководный участок. При отсутствии регламента обеспечения гидрометеорологической информацией Новопортовского терминала (официально он является районом порта Сабетта, расположенного более чем в 300 километрах от м. Каменный) заблаговременность прогнозных оценок уровня определялась из соображений разумной достаточности для отходящих от терминала танкеров. Практика быстро показала, что первоначально планируемая заблаговременность 4–6 часов, требуемая для прохода мелководного участка, недостаточна, поскольку не учитывает время на принятие решения по количеству принимаемой танкером нефти, от которого зависит осадка судна. В результате определился следующий порядок предоставления информации: дважды в сутки в установленные сроки гидрологи передают оператору терминала мареограмму с ходом уровня за суточный интервал, предшествующий текущему сроку, и кривой ожидаемого хода уровня на 12 часов вперед (прогнозная оценка). По запросу танкера может быть подготовлен дополнительный уточненный прогноз в любой требуемый срок наблюдений, не совпадающий со сроками предоставления регулярной информации.

Для определения прогнозируемого уровня моря применяется комбинированный метод, объединяющий оперативные наблюдения за уровнем, расчет неперiodических

колебаний уровня с использованием трехмерной гидродинамической модели, разработанной в ААНИИ, и предвычисление приливных колебаний по методике Г.Н. Войнова.

Модельный расчет неперриодических колебаний уровня

Для разработки прогнозов сгонно-нагонных колебаний уровня моря в районе м. Каменный используется технология расчета и краткосрочного прогноза уровня моря и течений в Северном Ледовитом океане и его морях на основе трехмерной гидродинамической модели совместной циркуляции вод и льдов AARI-IOCM [8]. Эта технология в 2013 г. была одобрена Центральной методической комиссией Росгидромета по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) и рекомендована для использования в оперативной работе.

Модель AARI-IOCM, являющаяся ядром технологии, представляет собой результат объединения трех моделей: трехмерной бароклинной модели циркуляции вод, модели дрейфа ледяного покрова и термодинамической модели морского льда. Модель адаптирована ко всей акватории СЛО и прилегающей акватории Атлантического океана и имеет пространственное разрешение 13,8 км. Для описания донной топографии и конфигурации береговой черты использован архив GEBCO. В качестве граничных условий используются среднемесячные среднесезонные значения расходов 17 основных рек, впадающих в Северный Ледовитый океан. Температура и соленость воды из World Ocean Atlas (WOA05) [9] для летнего или зимнего периодов взяты в качестве начальных условий. В качестве внешнего атмосферного форсинга используются данные глобальной гидродинамической модели Global Forecast System (GFS) [10] с горизонтальным пространственным шагом $0,5 \times 0,5^\circ$ и временным дискретом 3 часа. В работах [8, 11–13] было показано, что AARI-IOCM достаточно хорошо воспроизводит ледовые условия и циркуляцию вод и льдов в Северном Ледовитом океане.

При производстве краткосрочных прогнозов уровня моря термодинамический блок модели не задействован, а информация о сплоченности морского льда обновляется еженедельно в автоматическом режиме. Источником информации о состоянии ледяного покрова на целевой акватории служит продукция Центра ледовой гидрометеорологической информации (ЦЛГМИ) ААНИИ. Ледовые карты еженедельно поставляются центром в формате Sea Ice Grid (SIGRID-3), который является приклад-

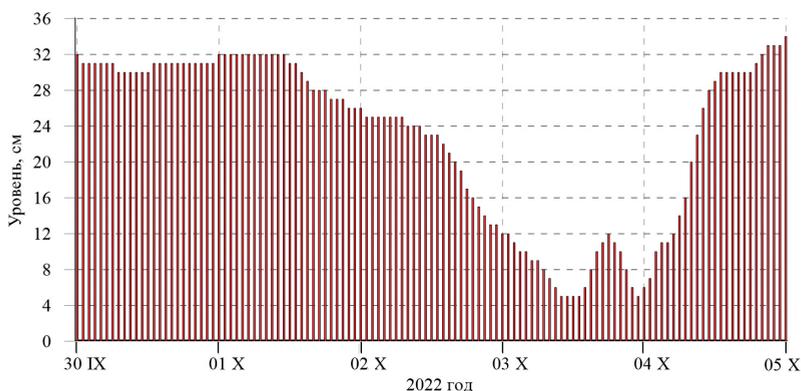


Рис. 3. Прогноз колебаний уровня по модельным расчетам в районе м. Каменный

Fig. 3. Forecast of level fluctuations according to model calculations in the Cape Kamenny area

ным расширением формата хранения векторной графической информации Shapefiles. В оперативном режиме работы информация о ледовой обстановке обрабатывается в соответствии с временным регламентом деятельности ЦЛГМИ, данные в формате SIGRID-3 усваиваются моделью после каждого обновления, выпускаемого центром.

Технология расчета и краткосрочного прогноза уровня моря и течений в Северном Ледовитом океане и его морях поддерживает весь цикл: от проведения предварительной обработки исходных данных до оформления полученных результатов расчетов в согласованном виде выходной продукции и отправления прогностических значений потребителю.

По результатам расчетов ежечасные значения уровня моря предоставлялись в виде таблиц в формате Excel и графиков в формате bmp. Для примера на рис. 3 представлен график прогноза колебаний уровня моря, выпущенный 30 сентября 2022 г.

Анализ сезонной изменчивости и предвычисление приливов

Предвычисление приливов для м. Каменный основывается на гармоническом анализе годовых и месячных серий наблюдений за уровнем. Этапы обработки и анализа данных по уровню зависят от задач исследования. Для изучения мезомасштабных неприливных колебаний гармонический анализ с использованием МНК производится по материалам наблюдений с той дискретностью, какая получена прибором. Для исследования приливных колебаний уровня этапы обработки следуют стандартной схеме, изложенной ниже.

На первом этапе обработки выполняется контроль случайных ошибок. Для ежечасных временных рядов колебаний уровня моря нами разработан способ контроля и редакции случайных выбросов [14]. Этот контроль производится по остаточному ряду (наблюдения минус предвычисления). В практике гармонического анализа приливов для полного завершения обработки необходим анализ остаточного ряда (наблюдения минус предвычисления). Анализ остаточной кривой необходим и потому, что только способа контроля выбросов недостаточно для обнаружения многих других скрытых ошибок и брака. К ним относятся различные сбои в работе измерительного устройства, ошибки при нивелировке нуля поста и т. д. При этом хорошие результаты для идентификации сомнительных участков дает совместный просмотр наблюдаемой и предвычисленной кривых колебаний уровня. После замены на предвычисления выявленных сомнительных участков, а также пропусков (если они есть) производится повторный гармонический анализ.

Далее ежечасные временные ряды подвергались фильтрации фильтром нижних частот (Гровза) для подавления влияния непериодических колебаний. С целью устранения срезки при фильтрации (48 значений ряда теряется) временные ряды предварительно дополнялись в начале и конце рядов с помощью предвычисления. Затем по полученным временным рядам производился гармонический анализ приливов с помощью МНК по методике, разработанной в ААНИИ [14].

В целом из каждой месячной серии было выделено 32 волны. В классе суточных приливов выделены 6 волн ($Q_1, O_1, M_1, K_1, J_1, OO_1$), полусуточных — 8 волн ($\mu_2, N_2, M_2, L_2, S_2, MNS_2, MSN_2, 2SM_2$), 1/3-суточных — 4 волны (M_3, MO_3, MK_3, SK_3), 1/4-суточных — 5 волн ($MN_4, M_4, SN_4, MS_4, S_4$), 1/5-суточных — 2 волны ($2MP_5, MSK_5$), 1/6-суточных — 5 волн ($2MN_6, M_6, MSN_6, 2MS_6, 2SM_6$), 1/8-суточных — 1 волна (M_8).

Дополнительно 9 второстепенных волн (2-е приближение) были получены из основных приливов K_1, μ_2, N_2, S_2 в результате разделения по теоретическим соотношениям соответственно $\pi_1, S_1, \psi_1, \phi_1, P_1, 2N_2, v_2, K_2, T_2, R_2$. Используемый автором

список волн близок к классической работе Дудсона. Однако по Дудсону можно выделить по месячной серии 2 волны долгопериодного прилива — MS_f и M_m . Но наш практический опыт позволяет утверждать, что достоверную оценку этих приливов можно получить только из годовых серий наблюдений.

По Фурье-анализу остаточных рядов (наблюдения минус предвычисления) были рассчитаны средние уровни шума, средние квадратические отклонения в классах приливов и по ним определены 95 % доверительные интервалы для оценки точности.

При наличии многолетних наблюдений возникает возможность статистической обработки результатов анализа месячных серий. По этому массиву информации для амплитуд и фаз (углов положений) всех основных волн прилива на каждый месяц определяются средние оценки, максимумы и минимумы, средние квадратические отклонения (СКО). Оценка сезонной изменчивости амплитуд и фаз основных волн производится по известным выражениям [14].

Сезонный ход амплитуды представлен в виде относительного изменения (dH) ее средней величины (H) как $dH = (H_M - H_T)/H_M$ (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 $dg = (g_M - g_T)$. СКО (σ) для амплитуды и фазы рассчитывались по формулам ошибок векторного среднего. Для этого средняя оценка и отдельные месячные значения амплитуды и фазы преобразовывались в компоненты $H \cdot \cos g$ и $H \cdot \sin g$. По ним рассчитывалась стандартная ошибка для амплитуды σ_H , и затем для фазы $\sigma_G = \sigma_H/H$ (рад):

$$\sigma_H = \left[\sigma_A^2 \cdot (\cos g)^2 + \sigma_B^2 \cdot (\sin g)^2 \right]^{1/2},$$

где σ_A — СКО для компоненты $H \cdot \cos g$, а σ_B — СКО для компоненты $H \cdot \sin g$.

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

$$\operatorname{tg}(g) = H \cdot \sin g / H \cdot \cos g.$$

По этим формулам были получены средние месячные оценки и их изменения от месяца к месяцу в годовом цикле. Эти оценки для волны M_2 в пункте м. Каменный Обской губы представлены в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сезонный ход прилива

В таблице даны оценки среднего сезонного хода констант прилива волны M_2 за периоды 1977–1994 и 2016–2021 гг. на м. Каменный.

Из данных табл. следует, что за период 1977–1994 гг. наибольшее гашение прилива ледяным покровом в среднем наблюдалось в апреле, а максимальное развитие прилива происходило в августе. В настоящее время происходит более раннее развитие прилива, и максимальная амплитуда наступает в июле, а наибольшее гашение прилива в среднем сместилось к марту.

Сопоставление оценок сезонного хода амплитуд прилива волны M_2 в годовом цикле за 6 лет за период 2016–2021 гг. показывает особенности, которые присутствуют в оценках сезонного хода за исторический период 1977–1994 гг., а также такие черты, которые не наблюдались ранее. Общим для обоих периодов является большая изменчивость параметров прилива за январь–май в годовом цикле и, наоборот, слабая изменчивость амплитуд в июле–октябре.

Оценки средних векторных значений сезонного хода относительных амплитуд (dH) и разности фаз (dg) волны M_2 на м. Каменный

Table

Estimations of mean vector values of seasonal changes of relative amplitudes (dH) and difference of phases (dg) of the wave M_2 at the Cape Kamenny

Месяц	1977–1994 гг.				2016–2021 гг.			
	dH , %	СКО	dg , град	СКО	dH , %	СКО	dg , град	СКО
I	-30,3	0,51	26,4	5,4	-49,4	2,0	34,5	23,8
II	-27,0	0,55	35,2	5,6	-49,5	2,3	40,1	27,9
III	-49,7	0,68	51,5	10,0	-53,8	1,5	50,2	19,7
IV	-50,0	0,82	55,6	12,1	-50,5	1,9	45,0	23,0
V	-46,5	0,82	55,4	11,3	-42,0	2,6	46,8	27,3
VI	-13,4	0,51	15,2	4,4	8,5	4,1	2,9	22,9
VII	66,8	1,03	-5,3	4,6	116,2	1,0	-12,5	2,7
VIII	149,1	0,57	-25,3	1,7	110,0	1,1	-17,1	3,3
IX	114,3	0,63	-22,5	2,2	88,8	1,4	-15,3	4,4
X	87,0	0,33	-18,3	1,3	69,8	1,1	-15,2	4,0
XI	-31,3	0,36	13,0	3,8	0,9	1,1	0,2	6,8
XII	-24,8	0,47	20,5	4,7	-46,2	1,0	25,8	11,3

Данные таблицы показывают значительное изменение средних месячных величин прилива за исторический и современный периоды. Они касаются как самих амплитуд и фаз, так и величин их среднеквадратических отклонений. Здесь надо учитывать различие баз данных: за период 1977–1994 гг. использовались срочные измерения уровня по рейке. Эти наблюдения не всегда имели хорошее качество и были приведены к однородным рядам. Вследствие этой процедуры происходит некоторое уменьшение величин разброса. Однако общие особенности обоих периодов остаются подобными. В годовом цикле СКО амплитуд и фаз в разы больше в январе–мае, а в июле–октябре величины СКО гораздо меньше и остаются приближенно на одном уровне. Очевидно, что такие особенности в развитии прилива в годовом цикле связаны с изменениями в развитии ледяного покрова в Обской губе в январе–мае и с отсутствием такового в июле–октябре.

Результаты анализа показывают очень большие межгодовые девиации сезонного хода констант волны M_2 в зимний период с января по май. На рис. 4 (а, б) показаны кривые сезонного хода средних месячных оценок амплитуд и фаз волны M_2 , средних за 2016–2021 гг. (норма) и в годы 2017 и 2021 их экстремального хода в годовом цикле. Для наглядности значения даны в нормированном виде от их значений в летний период (июль или август). Из рис. 4а видно, что в норме в январе–мае амплитуда составляет всего 0,23–0,28 от ее значения в июле, а фаза в марте возрастает на 62° . Это означает, что полная вода в марте запаздывает на 2,1 ч по сравнению с июлем. В июле–октябре изменчивость амплитуд находится в интервале 1,0–0,8, а фаз — 0 – 5° .

Обратимся к сезонному ходу констант волны M_2 в экстремальные годы. В 2017 г. в январе–мае наблюдались наибольшие значения амплитуд волны M_2 в интервале соответственно 5,1–8,6 см за этот период. В 2021 г. отмечались наименьшие значения амплитуд в январе–мае, которые составили всего 2,7–3,5 см в эти месяцы. Такие малые значения среднемесячных значений амплитуд волны M_2 не наблюдались и за исторический период 1977–1994 гг. В отношении фазы волны M_2 отмечаются аналогичные

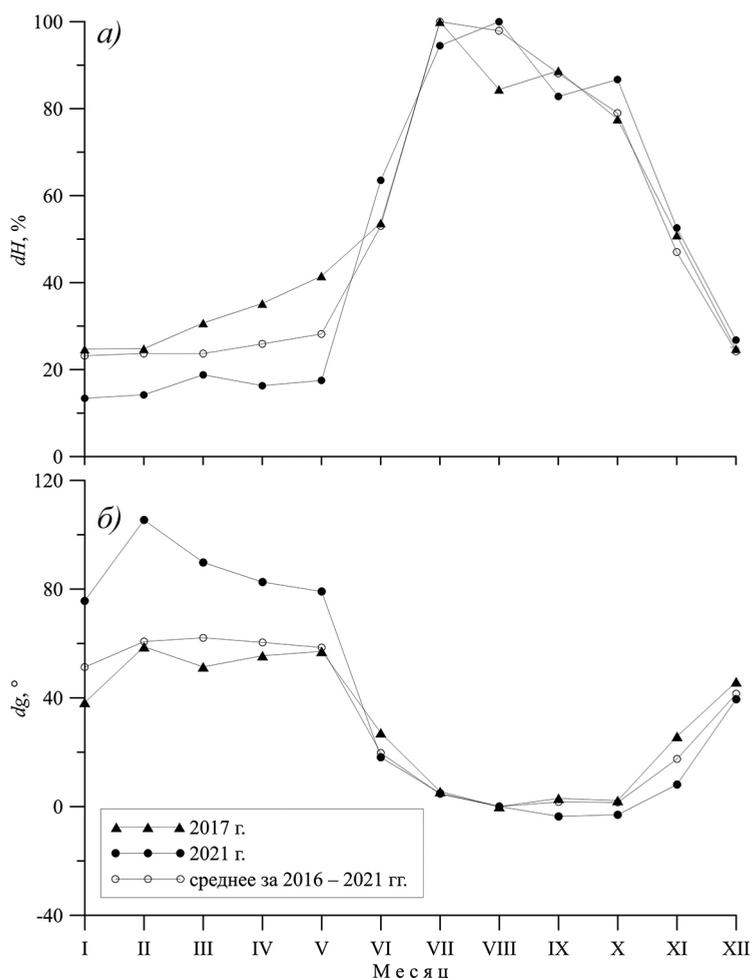


Рис. 4. Кривые сезонного хода нормированных средних месячных оценок амплитуд и фаз волны M_2 : амплитуды (а) и фазы (б)

Fig. 4. Curves of seasonal changes of average month amplitude estimates and wave phases M_2 : amplitude (a) and phase (b)

особенности, но с обратным результатом. При увеличении амплитуды наблюдается более раннее наступление прилива в сравнении с нормой (фаза уменьшается), а при уменьшении амплитуды происходит запаздывание полной воды прилива (фаза увеличивается). При этом даже для экстремальных лет в годовом цикле за июнь–октябрь значения оценок амплитуд и фаз близки к норме. Радикальные различия с нормой для аномальных 2017 и 2021 гг. наблюдаются в зимний период в январе–мае.

Например, в 2017 г. в январе–мае амплитуда волны M_2 не превышала 0,13–0,17 от ее значения в августе, а фаза изменялась от 349° до 7° , с максимумом в феврале, равным 9° . В 2021 г. значения амплитуды в январе–мае достигали соответственно 0,25–0,42 от таковой величины в июле, а фаза колебалась в диапазоне 29 – 33° , с максимумом в феврале, равным 59° . То есть по времени прилив (полная вода) наступил в феврале

2021 г. на 1,7 ч позже, чем в феврале 2017 г. Понятно, что приведенный здесь характер изменчивости сезонного хода в экстремальные годы однозначно определялся особенностями развития ледовых условий в Обской губе. Действительно, в 2021 г. наблюдались тяжелые ледовые условия, а в 2017 г. — легкие ледовые условия [15]. Аномальное поведение прилива и констант волны M_2 в зимний период в 2017 и 2021 гг. по своим характеристикам перекрывает аналогичные сведения за весь исторический период начиная с 1947 г. Особенно интересовал вопрос об интерпретации необычного гашения прилива в 2021 г.: связано ли это явление с локальными эффектами при прохождении приливной волны в районе м. Каменный (влияние ледового канала, гряд торосов, стамух) или оно имеет универсальный характер. Сведения о приливах, полученные в то же время в других районах Обской губы (в районах Геофизического и Салмановского месторождений), подтвердили и там аномальное гашение прилива в зимний период.

Выше было отмечено, что такие особенности в развитии прилива в годовом цикле связаны с изменениями в развитии ледяного покрова в Обской губе в январе–мае и с отсутствием такового в июле–октябре. Вопрос о влиянии ледяного покрова на приливную волну требует дальнейшей самостоятельной разработки, и здесь мы его касаемся в самых общих чертах.

В зимний период под влиянием ледяного покрова под припаем развивается подледный пограничный слой и происходит гашение и торможение приливной волны, а следовательно, и величины прилива, и, соответственно, величины скоростей приливных течений. Максимальный эффект этого процесса проявляется в апреле–мае, когда толщина припайного льда достигает максимума.

В работе [16] по данным наблюдений за течениями в Енисейском заливе был сделан интересный вывод о пороговом, критическом значении глубины моря в плане ее влияния на развитие приливных течений под припаем. Заметное влияние припайного льда обнаруживается на глубинах менее 25 м. Примечательно, что такое же значение для возникновения в течении волны M_2 градиентно-вязкого режима получено теоретически в работе [17]. Глубина моря в 12–13 м является критической глубиной. Физический механизм этого явления обусловлен резким усилением диссипации энергии за счет смыкания приледного и придонного пограничных слоев воды. По данным наблюдений за приливными течениями в работе [16] были рассчитаны элементы гашения и запаздывания приливной волны в Енисейском заливе, составившие на каждые 100 км пути под припаем соответственно 26 % и 24°.

Прогноз суммарного уровня

Прогноз непериодических колебаний уровня и предвычисление приливов традиционно выполняются относительно условного среднегололетнего уровня моря. Для практического использования судоводителям необходим уровень относительно глубин, представленных на навигационных картах и планшетах, т. е. относительно НТУ. Привязка прогностических и предвычисленных значений уровня к НТУ осуществляется гидрологами, обслуживающими уровеньный пост на Каменном: из фактического уровня вычитается прилив, после чего к нему привязывается прогноз сгонно-нагонных колебаний, рассчитанный по гидродинамической модели AARI-ЮСМ. Результирующий прогноз суммарного хода уровня получается добавлением прилива, предвычисленного по методике Г.Н. Войнова. Пример мареограммы с прогнозом уровня на 12 ч вперед, подготовленный для оператора Новопортовского терминала, приведен на рис. 5.

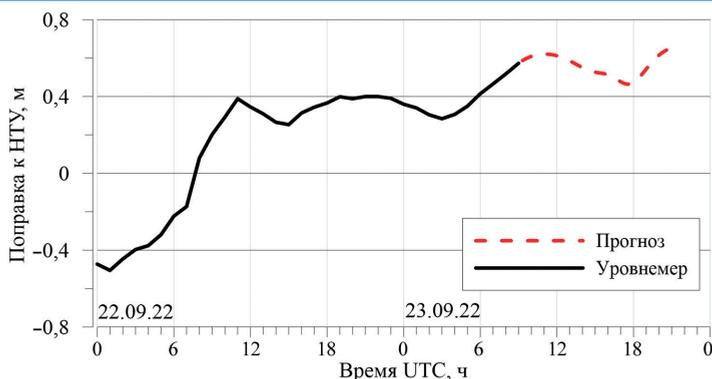


Рис. 5. Фактический уровень и прогнозная оценка с заблаговременностью 12 ч для Новопортовского терминала

Fig. 5. Actual level and forecast estimate with 12 hours lead time for the Novoportovskiy terminal

Оценка ошибки прогноза суммарного уровня выполнена путем сравнения фактических и прогнозируемых значений. При заблаговременности прогноза 12 часов вероятность того, что ошибка прогнозируемого уровня не превысит 5 см, составила 0,44; не превысит 10 см — 0,74; 15 см — 0,81; 20 см — 0,85; 25 см — 0,93. При этом следует учитывать, что разрешение датчика давления буйкового уровнемера в пересчете на метрическую шкалу составляет 2 см, а абсолютная погрешность измерения уровня составляет ± 10 см.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новые результаты гармонического анализа наблюдений за уровнем моря в Обской губе в районе м. Каменный за 2016–2021 гг. показали существенное различие с историческими сведениями о приливных колебаниях уровня. Сравнение значений средних месячных оценок амплитуд и фаз прилива волны M_2 за 2016–2021 гг. с аналогичными значениями за период 1977–1994 гг. свидетельствует о значимых расхождениях как в целом в поведении кривых сезонного хода амплитуд и фаз волны M_2 в годовом цикле, так и значений оценок средних за каждый месяц в зимний и летний периоды.

Это означает, что для расчета приливов в районе м. Каменный нецелесообразно пользоваться средними годовыми или средними месячными гармоническими константами прилива на всем годовом цикле. В январе–июне необходимо подстраиваться под конкретный ход развития прилива по данным наблюдений и каждый месяц корректировать список констант волн. В практике предвычисления приливов для Новопортовского терминала это реализуется следующим образом. К концу каждого месяца выполняются обработка и анализ данных наблюдений за последний месяц, по результатам которого уточняются текущие значения гармонических постоянных, зависящие от фактических ледовых условий, и производится расчет прилива на следующий месяц. Следует заметить, что в различные периоды ледового сезона влияние ледовых условий на прилив может проявляться по-разному. Если в начале сезона прилив показывает значения, соответствующие легкому или, например, тяжелому типу ледовых условий, то в последующие месяцы он может перестроиться, например, на средний тип.

Повышение точности прогноза может быть достигнуто как за счет совершенствования наблюдений непосредственно на м. Каменный (путем сооружения стационарного уровневого поста с постоянным нулем глубин), так и за счет организации системы мониторинга уровня в Обской губе с открытием ежечасных наблюдений в порту Сабетта, населенных пунктах Тадибеяха и Сеяха. Все данные должны быть доступны в режиме реального времени для оперативного анализа.

Конфликт интересов. У авторов исследования нет конфликта интересов.

Финансирование. При подготовке статьи использованы результаты, полученные в рамках хозяйственных работ (договор № 17/12-01 от «17» декабря 2021 г. между ООО «Онего Шиппинг Лтд» и ООО «Арктик Шельф Консалтинг», договор № 137060/2022 от 28 декабря 2021 года между ООО «Арктик Шельф Консалтинг» и ФГБУ «ААНИИ»), а также в ходе выполнения проекта 5.1.1 плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 гг.

Competing interests. The authors have no conflicts of interest to declare.

Funding. In preparing the article the authors used the results obtained within the framework of the contractual works (contract №17/12-01 dated December 17, 2021 between “Onego Shipping Ltd” LLC and “Arctic Shelf Consulting” LLC, contract № 137060/2022 dated December 28, 2021 between “Arctic Shelf Consulting” LLC and FSBI “AARI”) and in the course of project 5.1.1 of the Roshydromet R&D works plan for 2020–2024.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лоция Обь-Енисейского района Карского моря. СПб.: ГУНиО, 1993. 312 с.
2. *Коптева А.В.* Уровень и течения Обской губы // Труды АНИИ. 1953. Т. 59. С. 84–148.
3. *Коптева А.В., Бутенко А.К., Иванова З.К.* Материалы по изучению приливов арктических морей СССР // Труды АНИИ. 1952. Т. 42. Вып. VII. Карское море. 536 с.
4. *Диесперова Р.А.* Приливы Северного Ледовитого океана // Труды ГОИН. 1954. Вып. 19. 74 с.
5. *Войнов Г.Н., Пискун А.А.* Приливные и стонно-нагонные колебания уровня воды в районе м. Каменный (Обская губа) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 1. С. 15–33.
6. *Войнов Г.Н., Налимов Ю.В., Пискун А.А., Становой В.В., Усанкина Г.Е.* Основные черты гидрологического режима Обской и Тазовской губ (лед, уровни, структура вод) / Под ред. д-ра геогр. наук Г.Н. Войнова. СПб.: Нестор-История, 2017. 192 с.
7. Измеритель уровня воды (уровнемер) WLG-30. URL: https://marlin-yug.com/assets/files/pdf_ru/water_level_gauge_wlg-30_ru.pdf (дата обращения: 10.03.2023).
8. *Кулаков М.Ю., Макитас А.П., Шутилин С.В.* AARI–IOCM — совместная модель циркуляции вод и льдов Северного Ледовитого океана // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 2 (92). С. 6–18.
9. World Ocean Atlas 2005 (WOA05). URL: http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA05/pr_woa05.html (дата обращения: 10.03.2023).
10. The National Centers for Environmental Prediction (NCEP). URL: <ftp.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod> (дата обращения: 10.03.2023).
11. *Кулаков М.Ю.* О новом подходе к моделированию циркуляции вод арктических морей // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 2 (92). С. 55–62.
12. *Кулаков М.Ю., Макитас А.П., Шутилин С.В.* Модельные оценки чувствительности ледяного покрова Северного Ледовитого океана к изменениям форсингов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 3 (93). С. 66–74.

13. Кулаков М.Ю., Макситас А.П. Роль дрейфа льда в формировании ледяного покрова Северного Ледовитого океана в начале XXI века // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 2 (96). С. 67–75.
14. Войнов Г.Н. Приливные явления и методология их исследований в шельфовой зоне арктических морей (на примере Карского и северо-восточной части Баренцева морей): Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. СПб., 2003. 46 с.
15. Тарасенко А.Д., Селюжонок В.В., Сандалюк Н.В., Абрамова И.А., Демчев Д.М. Исследование ледовой обстановки Обской губы по современным спутниковым данным в 2007–2017 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 1. С. 48–63.
16. Войнов Г.Н. Приливные течения арктических морей // Труды ААНИИ. 1988. Т. 128. 238 с.
17. Зырянов В.Н., Реушков А.Б. Остаточный вдольбереговой перенос водных масс приливным течением на мелководье // Океанология. 1999. Т. 39. № 3. С. 328–338.

REFERENCES

1. *Lociya Ob'-Enisejskogo rajona Karskogo morya*. GUNiO, 1993: 312 p. [In Russian].
2. Kopteva A.V. Level and currents of the Ob' Bay. *Trudy AANII*. Proc. of AARI. 1953, 59: 84–148. [In Russian].
3. Kopteva A.V., Butenko A.K., Ivanova Z.K. Materials for the study of tides in the arctic seas of the USSR. *Trudy AANII*. Proc. of AARI. 1952, 42 (issue VII. Kara Sea): 536 p. [In Russian].
4. Diesperova R.A. Tides of the Arctic Ocean. *Trudy GOIN*. Proc. of GOIN. 1954, 19: 74 p. [In Russian].
5. Voinov G.N., Piskun A.A. Tidal and storm surges water level fluctuations at the Cape Kamenny area (Ob' Bay). *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 1 (65): 15–33. [In Russian].
6. Voinov G.N., Nalimov Yu.V., Piskun A.A., Stanovoy V.V., Usankina G.E. *Osnovnye cherty gidrologicheskogo rezhima Obskoi i Tazovskoi gub (led, urovni, struktura vod)*. Main characteristics of the hydrological regime of the Ob' Bay and Taz Bay (ice, levels, water structure). St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2017: 192 p. [In Russian].
7. *Izmeritel' urovnia vody (urovner) WLG-30*. Water level meter (level gauge) WLG-30. Available at: https://marlin-yug.com/assets/files/pdf_ru/water_level_gauge_wlg-30_ru.pdf (accessed 10.03.2023).
8. Kulakov M.Yu., Makshtas A.P., Shutilin S.V. AARI–IOCM — coupled ice-ocean circulation model for the Arctic Ocean. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2012, 2 (92): 6–18. [In Russian].
9. World Ocean Atlas 2005 (WOA05). Available at: http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA05/pr_woa05.html (accessed 10.03.2023).
10. The National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Available at: <ftp.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod> (accessed 10.03.2023).
11. Kulakov M.Yu. About the new approach to modelling of water circulation of the Arctic Seas. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2012, 2 (92): 55–62. [In Russian].
12. Kulakov M.Yu., Makshtas A.P., Shutilin S.V. Modelling estimations of sensitivity of the Arctic Ocean ice cover to changes of forcings. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2012, 3 (93): 66–74. [In Russian].
13. Kulakov M.Yu., Makshtas A.P. The role of ice drift in formation of sea ice cover in the Arctic Ocean at the beginning of XXI century. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2013, 2 (96): 67–75. [In Russian].

14. *Voinov G.N. Prilivnye iavleniia i metodologiia ikh issledovaniia v shel'fovoi zone arkticheskikh morei (na primere Karskogo i severo-vostochnoi chasti Barentseva morei)*. Tides and methodology of their researches in the shelf zone of the Arctic seas (using the example of the Kara Sea and north-east part of the Barents Sea). Dr. geographical sci. thesis. St. Petersburg, 2003: 46 p. [In Russian].
15. *Tarasenko A.D., Selyuzhenok V.V., Sandalyuk N.V., Abramova I.A., Demchev D.M.* Study of sea ice regime in the Ob' Bay using modern satellite data in 2007–2017. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 1 (68): 48–63. [In Russian].
16. *Voinov G.N.* Tidal currents of the Arctic Seas. *Trudy AANII*. Proc. of AARI. 1988, 128: 238 p. [In Russian].
17. *Zyryanov V.N., Reshetkov A.B.* Along shore residual transport of water masses by tidal current in shallow water. *Okeanologiya*. Oceanology. 1999, 3 (39): 328–338. [In Russian].