

## ПРИЛИВНЫЕ И СГОННО-НАГОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ У МЫСА ЯМ-САЛЕ (ОБСКАЯ ГУБА)

*д-р геогр. наук Г.Н. ВОЙНОВ<sup>1,2</sup>, канд. техн. наук А.А. ПИСКУН<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> — ФГБУ Государственный океанографический институт, Санкт-Петербургское отделение, e-mail: [voinovgn@aari.ru](mailto:voinovgn@aari.ru)

<sup>2</sup> — ГИЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: [piskun@aari.ru](mailto:piskun@aari.ru)

Приведены средние оценки гармонических постоянных приливов за летний период (июль–сентябрь) у мыса Ям-Сале (Обская губа), полученные с помощью МНК за период с 1937 по 1960 г. По остаточным рядам (наблюдения минус предвычисления) произведено исследование сгонно-нагонных колебаний уровня моря в отдельные годы за летний период 1937–1960 гг. Выполнена проверка прогностических уравнений В.Г. Корты и Н.А. Лабзовского для расчета сгонно-нагонных колебаний.

*Ключевые слова:* гармонические постоянные приливов, мыс Ям-Сале, статистические оценки, сгонно-нагонные колебания уровня, прогностические уравнения, расчет сгонно-нагонных колебаний уровня.

### ВВЕДЕНИЕ

При впадении реки Оби в Обскую губу расположена дельта, разветвленная на многочисленные рукава, основными из которых являются левый рукав — Хаманельская Обь и правый — Надымская Обь. На выходе Хаманельской Оби в губу сформирован Ямсальский бар (по названию расположенного вблизи мыса Ям-Сале), который представляет собой мелководный 12–13-километровый участок, лимитирующий судоходство на пути транзита грузов между рекой Обью и Обской губой (Смирнов, 1946) (см. рис. 1). Глубины этого бара настолько малы, что для прохода в период навигации даже мелкоосидающих судов с осадкой 2–3 м требуются нагонные уровни.

Уже в начале XX в. в связи с освоением и развитием Северного морского пути появилась необходимость в прогнозе сгонно-нагонных и приливных колебаний уровня моря на этой акватории Обской губы (рис. 1). В обстоятельной работе В.Г. Корты, до настоящего времени не утратившей научного значения и посвященной непериодическим колебаниям уровня в арктических морях, прогнозу сгонно-нагонных колебаний уровня у мыса Ям-Сале уделено особое внимание (Корт, 1941). Важным практическим аспектом этой работы является разработка эмпирических прогностических уравнений для расчета сгонно-нагонных уровней. В этих уравнениях используются связи между выбранными градиентами атмосферного давления по ряду пунктов и уровнем на посту у м. Ям-Сале. Н.А. Лабзовский в дальнейшем рассматривал кроме величин атмосферного давления показатель ветра, но в полном виде эти эмпирические урав-

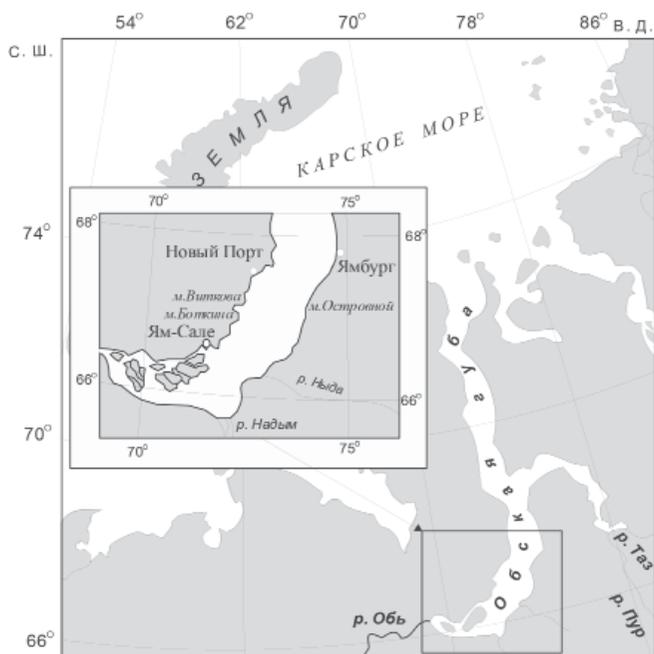


Рис. 1. Расположение уровенного поста в Обской губе Карского моря.

нения не приведены (Лабзовский, 1948). Практически на этих работах заканчивается исследование сгонно-нагонных колебаний у м. Ям-Сале.

Помимо сгонно-нагонных колебаний уровня воды, в Обской губе согласно теории могут возникать свободные колебания водных масс водоема в виде сейш (Корт, 1949). В работе (Корт, 1949) были рассчитаны периоды одноузловой, двухузловой, трехузловой и четырехузловой сейш в Обской губе по методу Дефанта. Однако В.Г. Карту не удалось обнаружить сейши с полученными периодами в колебаниях синхронных ежечасных уровней в летний период из наблюдений на нескольких постах. Он пришел к выводу, что вследствие малых глубин в Обской губе (средняя глубина равна 9,8 м), сильного влияния трения и быстрого изменения синоптической обстановки нельзя ожидать возникновения свободных колебаний в виде сейш с значительной амплитудой. Если учесть, что для решения этой проблемы требуются синхронные наблюдения на постах по всей длине Обской губы, то мы не имели возможности рассмотреть этот вопрос.

В работах (Корт, 1941) и (Лабзовский, 1948) сгонно-нагонные колебания уровня определялись относительно среднего уровня ежечасной серии без учета влияния речного стока и других факторов на его сезонное изменение. За непериодический уровень принимался средний мгновенный уровень, рассчитываемый как среднее значение полных и малых вод, что не строго исключает приливные колебания уровня.

Приливные колебания уровня не достигают у м. Ям-Сале величин, существенно определяющих размахи суммарных наблюдаемых колебаний, тем не менее их учет также является необходимым в прогнозе. Первые сведения о приливах у м. Ям-Сале приведены в работе А.П. Носкова (Носков, 1938). Гармонические постоянные были рассчитаны им по методу Дарвина по месячной серии наблюдений за июль–август

1935 г. Эти же данные помещены в Таблице приливов (1941) и даны также в обзорной работе А.В. Коптевой (Коптева и др., 1952), где для м. Ям-Сале приводятся результаты обработки еще нескольких серий за 1920 г. и 1940 г. Между значениями констант основных волн приливов этих серий имеются заметные различия, которые не комментируются и не оцениваются. Авторам неизвестны публикации по приливам в районе м. Ям-Сале.

Поскольку достоверность эмпирических уравнений из работ (Корт, 1941; Лабзовский, 1948), по-видимому, ранее не проверялась на независимом материале, как и сведений о приливах, то в связи с интенсификацией в последнее десятилетие грузоперевозок в районе Ямсальского бара эта проблема представляет научный и практический интерес.

Основной задачей настоящей работы является анализ приливных и сгонно-нагонных колебаний уровня в районе Ямсальского бара на основе обнаруженных в фондах института исторических данных ежечасных и срочных наблюдений за уровнем, которые в предыдущих опубликованных источниках не были востребованы. Также были выполнены на новом материале статистика сгонно-нагонных колебаний уровня и проверка эмпирических уравнений для краткосрочного прогноза уровня на Ям-Сале в зависимости от градиентов атмосферного давления между различными пунктами.

#### ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Исходными данными для анализа колебаний уровня у мыса Ям-Сале послужили материалы ежечасных наблюдений, выполненные Омским территориальным управлением ГУСМП (ОТУ) за 1935–1940 гг., Салехардским техническим участком Иртышского бассейнового управления пути (СТУИБУП) в 1941–1960 гг., а также срочные наблюдения поста Гидрометслужбы, получившего название Ямсальский бар, за 1965–1976 гг. (табл. 1).

Таблица 1

#### Сведения о ежечасных и срочных наблюдениях за уровнем воды у мыса Ям-Сале, использованные в настоящей работе

Год	Период наблюдений	Длина ряда, сут.	Дискретность измерений, ч.	Кем получены
1935	05.07–29.09	87	1	ОТУ
1937	14.07–28.09	77	1	ОТУ
1938	06.07–30.09	86	1	ОТУ
1939	23.07–23.09	61	1	ОТУ
1940*	16.08–11.09	27	1	ОТУ
1941	09.07–29.09	82	1	СТУИБУП
1944*	01.08–13.10	74	1	СТУИБУП
1945	11.07–07.10	88	1	СТУИБУП
1946	18.07–04.10	78	1	СТУИБУП
1947	24.07–10.10	78	1	СТУИБУП
1955	22.06–15.10	116	1	СТУИБУП
1956	05.07–07.10	95	1	СТУИБУП
1960	25.06–07.10	104	1	СТУИБУП
1965–1976	07–09 (ежегодно)	Летний период	6	Пост Ямсальский бар

Примечание. \* — Наблюдения имеют плохое качество и не вошли в дальнейшую обработку.

Пост Ямсальский бар действовал по 1984 г., но с 1977 г. выполнял только два измерения уровня в сутки. Эти наблюдения уже не представляли интереса применительно к задачам данной работы и нами не использовались. При анализе сгонно-нагонных колебаний уровня привлекались срочные данные об атмосферном давлении за отдельные годы на выбранных метеорологических станциях региона.

Пост Салехардского технического участка представлял собой футшток (рейку), установленный на удалении от берега. Отсчеты по рейке выполнялись с лодки или же со специально устроенных мостков. В штилевую погоду допускалось производить отсчет с берега, пользуясь биноклем. Главной задачей футшточного поста на Ямсальском баре являлось оповещение подходящих к бару со стороны моря и реки судов о глубине фарватера на баре. Зависимость между отсчетом горизонта воды по рейке и соответствующей данному отсчету глубиной на баре определялась в результате одновременных промеров фарватера на баре и отсчетов по рейке поста.

Из архивных материалов (фонды ААНИИ) известно, что нуль рейки поста Ям-Сале привязан к установленному в 1937 г. реперу № 53, имеющему условную отметку 35,921 м. По данным Северной портоизыскательской экспедиции (СПИЭ) 1947–1948 гг., отметка репера № 53 в системе СПИЭ равна 3,35 м. Это соответствует отметке 1,79 м Балтийской системы высот (БС). Нуль поста для периода 1937–1941 гг. равен –3,08 м в БС. В 1951 г. репер № 53 был утрачен. Отметка нуля поста Гидрометслужбы Ямсальский бар, по данным (Государственный водный кадастр, 1985), равна –3,52 м Балтийской системы высот. К настоящему времени, в результате дополнительного анализа данных о высотной основе поста, получена отметка –3,28 м БС-77. К сожалению, по имеющимся архивным источникам невозможно проверить данные о высотной основе за период до 1960 г. и однозначно удостовериться в том, что за все годы, упомянутые в табл. 1, высотное положение футштока оставалось неизменным. Поэтому уровни в данной работе анализировались отдельно за каждый год и, как следствие, мы рассматривали относительные колебания уровня.

При анализе сгонно-нагонных колебаний уровня с целью их сопоставимости необходимо знать средние месячные значения, определенные за многолетний период, то есть первоначально следует установить сезонный ход уровня. В условиях отсутствия высотной привязки в данных табл. 1 до 1960 г. прямо вычислить сезонный ход уровня затруднительно.

В отличие от метода в работе (Корт, 1941), где характеристики непериодических колебаний отсчитывались относительно среднего уровня за весь сезон каждого года в отдельности, в данном случае величина сгонов-нагонов на каждый час отсчитывалась от горизонта линейного тренда этого года. Целесообразность такого подхода представлена на рис. 2. На примере 1955 г. показано, что при выборе среднего за сезон уровня в качестве горизонта отсчета в первой половине серии будет отмечаться длительный многопиковый нагон (или несколько непрерывных нагонов), а во второй — в основном сгонный период. Более приемлемый результат дает использование средних месячных уровней для вычисления величины непериодических колебаний. Однако в этом случае возникает неопределенность в нахождении отклонений ежечасных уровней от среднемесячного, если сгон или нагон приходится на стык календарных месяцев. Более обоснованный результат, на наш взгляд, позволяет получить использование в таких расчетах линии тренда (см. рис. 2).

*Обработка ежечасных серий с целью проверки качества наблюдений, оценки модели прилива и получения остаточных рядов. Для ежечасных временных рядов коле-*

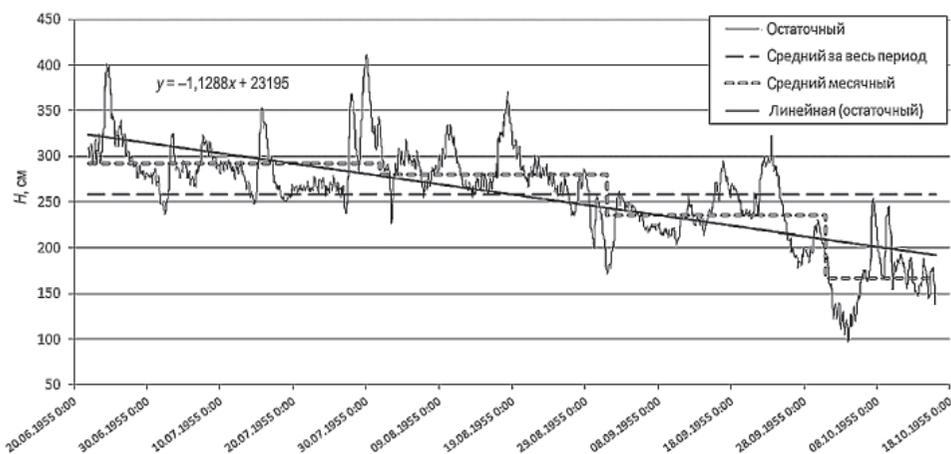


Рис. 2. Ход ежечасных уровней остаточного ряда (наблюдения минус предвычисления) за 1955 г. — пример к выбору отсчетного горизонта для определения количественных характеристик сгонов-нагонов.

баний уровня моря нами разработан способ контроля и редакции случайных выбросов (Войнов, 2003). Тестирование временных рядов проводилось с критерием отклонения более 6 см. Далее ежечасные временные ряды подвергались фильтрации фильтром низких частот Гровза (Д49) для подавления влияния неперидических колебаний. С целью устранения срезки при фильтрации (48 значений ряда теряется) временные ряды предварительно дополнялись в начале и конце с помощью предвычисления.

При выборе списка волн для анализа в целом мы следовали критерию Рэлея. Гармонический анализ измерений колебаний уровня моря проводился по методу наименьших квадратов (МНК) по методике, разработанной в ААНИИ (Войнов, 1999). В целом было выделено 26 волн в первом приближении и 6 — во втором в суточном, полусуточном, 1/3-суточном, 1/4-суточном и 1/6-суточном классах прилива.

Результаты по волнам K1, S2, N2 во втором приближении исправлялись от влияния второстепенных волн соответственно  $p$ ,  $S_1$ ,  $\psi_1$ ,  $\phi_1$ ,  $P_1$ ,  $K_2$ ,  $T_2$ ,  $R_2$ ,  $v_2$  по теоретическим соотношениям.

Как установлено в предшествующих исследованиях (Коптева, 1953; Войнов, 1999; Войнов, Пискун, 2015), основной особенностью приливов и приливных течений в Обской губе является сезонная изменчивость их основных характеристик (величин амплитуд основных волн, их фаз, величины прилива и т.д.). То есть параметры приливных колебаний сильно варьируют в зимний период (ноябрь–июнь), и в этот период их необходимо определять на каждый месяц года. В летний период (июль–сентябрь) также наблюдается, хотя и незначительная, изменчивость приливов. К тому же имеется индивидуальный сезонный ход приливных колебаний уровня и течений, зависящий в Обской губе от времени становления, степени развития припая и его толщины, а также продолжительности периода нахождения припая и дрейфующего льда.

В материалах исторических наблюдений время производства измерений иногда или неверно указывалось, или вообще не записывалось. Поэтому на первом этапе по результатам анализа месячных серий анализируемого года устанавливалось соответ-

ствие углов положений волны  $M_2$  декларируемому в материалах времени измерений. В ряде случаев наблюдатели неверно записывали в журналах время измерений как местное вместо поясного 6 пояса и наоборот.

По результатам нашей ревизии исторических материалов была подтверждена правильность обработки наблюдений за 1935 г. (Носков, 1938) и установлены ошибки в обработке наблюдений за 1940 г. (Коптева и др., 1952). Причиной ошибок в последнем случае стало плохое качество наблюдений и использование в обработке местного времени измерений вместо реального поясного по 6 поясу.

### РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ПРИЛИВОВ

В целом установлено, что сезонная изменчивость прилива в августе и сентябре не выходит за пределы ошибок гармонического анализа. Также не установлен тренд в межгодовой изменчивости амплитуд и фаз волны  $M_2$  за август за весь период ежедневных наблюдений (1935–1960 гг.). Срочные наблюдения за 1965–1976 гг. были подвергнуты предварительной обработке и анализу, но не были использованы в расчете

Таблица 2

Средние векторные оценки гармонических постоянных приливов в летний период (июль–сентябрь) у мыса Ям-Сале

Волна	Угловая скорость, град/ч	Амплитуда		Угол положения	
		$H$	$\pm$ СКО	$g$	$\pm$ СКО
$O_1$	13,943035	0,94	0,63	57	38
$P_1$	14,958931	0,52	0,18	231	20
$K_1$	15,041068	1,58	0,55	231	20
$\mu_2$	27,968208	0,22	0,20	131	21
$N_2$	28,439729	1,23	0,38	177	18
$\nu_2$	28,512583	0,23	0,07	177	18
$M_2$	28,984104	9,09	0,69	222	4
$L_2$	29,528479	0,52	0,33	260	36
$T_2$	29,958933	0,21	0,11	314	29
$S_2$	30,000000	2,58	0,70	314	16
$K_2$	30,041067	0,93	0,36	314	22
$2SM_2$	31,015896	0,42	0,34	237	46
$MO_3$	42,927140	0,23	0,17	284	44
$MK_3$	44,025173	0,19	0,15	35	45
$MN_4$	57,423834	0,25	0,18	308	41
$M_4$	57,968208	1,02	0,20	18	11
$SN_4$	58,439729	0,13	0,12	131	55
$MS_4$	58,984104	0,86	0,20	104	13
$M_6$	86,952313	0,13	0,06	123	28
$2MS_6$	87,968208	0,18	0,06	235	18

Примечания. 1. Приведены волны с амплитудой, превышающей одно с.к.о. в данной частотной полосе прилива. 2. Волны  $P_1$ ,  $K_2$ ,  $N_2$  и  $\nu_2$  даны во втором приближении по известным теоретическим соотношениям. 3. Для всех волн для расчета нодальных параметров учитывались только составляющие волн от второго члена потенциала (приливов второй степени) по Картрайту (Дудсону). 4.  $H$  — амплитуда, см;  $g$  — угол положения, град. СКО — значения среднего квадратического отклонения (векторного). Углы положений приведены к 0 поясу.

средних оценок вследствие недостаточно хорошего качества и ограничений за счет дискретности в количестве разрешаемых волн прилива. Здесь укажем для будущих исследователей, что время этих измерений было нестандартное. Наблюдения выполнялись по времени 5 пояса в сроки 2, 8, 14 и 20 ч.

В итоге для предвычисления мы предлагаем использовать средние оценки гармонических постоянных, полученные в результате гармонического анализа ежечасных серий за 10 лет: 1937, 1938, 1939, 1941, 1945, 1946, 1947, 1955, 1956, 1960 годы. Они даны в табл. 2.

Данными табл. 2 можно пользоваться для предвычисления приливов только для летнего периода (июль–сентябрь) для условий чистой воды. В зимний период (октябрь–июнь) эти гармонические постоянные не будут правильно описывать прилив, так как, по имеющимся сведениям по приливам, даже в районе бухты Новый Порт он практически исчезает в октябре–июне при становлении припайного льда (Войнов, Пискун, 2015).

По данным табл. 2 были рассчитаны значения средней сизигийной и квадратурной величин уровня моря по формулам Гарриса. Средняя сизигийная ( $S_g$ ) и средняя квадратурная ( $N_p$ ) величины прилива соответственно равны 23,4 см и 13,4 см. При этом значения  $S_g$  и  $N_p$  не связаны с какой-либо системой высот, а выражают среднюю абсолютную величину размаха колебаний прилива.

Прилив носит правильный полусуточный характер. Критерий Куртье, определяемый как отношение суммы амплитуд волн  $K_1$  и  $O_1$  к сумме амплитуд волн  $M_2$  и  $S_2$ , равен 0,22, а менее точный критерий Дуванина (не учитывает волну  $S_2$ ) равен 0,28. Во временном ходе приливных колебаний уровня фазовое неравенство (цикл сизигия–квадратура) не ярко выражено, вследствие малой величины амплитуды волны  $S_2$ , а параллактическое неравенство почти незаметно. Возраст полусуточного прилива составляет 3,7 сут., а возраст суточного прилива достигает 6,6 сут. При таком аномально большом значении возраста суточного прилива тропические приливы будут наблюдаться при нулевом склонении Луны, а равноденственные при максимальных значениях склонения Луны. Поэтому при близости моментов астрономических сизигий и максимальных склонений Луны сизигийные и тропические приливы не будут совпадать.

Несмотря на относительно небольшую величину мелководных волн, они существенно влияют на вид кривой прилива. Время роста кривой прилива в среднем в сизигию составляет 5 ч, а время падения достигает 7 ч.

### РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА СГОННО-НАГОННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Остаточные ряды (наблюдения минус предвычисления), полученные в результате обработки исходных рядов ежечасных уровней за период 1941–1960 гг. (также для сравнения за 1937–1939 гг.), были использованы для анализа сгонно-нагонных колебаний и расчета компонент прогностических зависимостей по уравнениям, предложенным для краткосрочных прогнозов сгонно-нагонных колебаний уровня у мыса Ям-Сале (Корт, 1941; Лабзовский, 1948). При этом данные об уровнях за 1960 г. не были оценены по уравнениям прогноза из-за прекращения после 1957 г. наблюдений за атмосферным давлением на посту Усть-Енисейский порт, необходимых для расчета одной из составляющих уравнения по Карту (1941). То же относится к данным за 1935–1939 гг., где отсутствуют данные по давлению на Ям-Сале.

Детальный обзор физических факторов, вызывающих непериодические колебания уровня у Ям-Сале, дан в работах (Корт, 1941; Лабзовский, 1948). В этих работах

установлены типы барических условий над районом Обской губы, влияющие на развитие сгонно-нагонных колебаний уровня, и предложены уравнения связи сгонов и нагонов с ветром и барическим режимом. На основе диаграмм повторяемости ветра и уровня при разных градациях скорости ветра выявлено, что сгонными являются ветры направлений от северо-запада через юг до юго-востока. Нагонными считаются ветры остальной половины горизонта. При этом наиболее эффективными ветрами, производящими при прочих равных условиях (одинаковая скорость, продолжительность и т.д.) максимальные сгоны и нагоны воды у м. Ям-Сале, являются: для нагона — север-северо-восток, для сгона — запад (Корт, 1941).

Повышения (нагоны) или понижения (сгоны) уровня от среднего за сезон, по данным работы (Корт, 1941), имели продолжительность от 1,5 сут. до 20 сут. При этом отмечались затруднения в выделении этих периодов, вследствие недостаточного обоснования отсчетного горизонта. Даже предлагалось рассматривать отдельно подъемы и спады уровня в рамках наблюдаемого продолжительного нагона (повышения уровня, называемого В.Г. Кортом стадией нагона) или сгона (понижения уровня — стадия сгона), что сильно затрудняло интерпретацию полученных результатов.

В табл. 3 приведены характеристики нагонов и сгонов на Ям-Сале, полученные авторами по ежечасным данным остаточных рядов, приведенных к тренду. В целом подтверждены характерные черты развития сгонно-нагонных колебаний, выявленные ранее в работах (Смирнов, 1937; Корт, 1941; Лабзовский, 1948; Коптева, 1953).

Данные табл. 3 показывают, что в летний период повторяемость нагонов и сгонов приближенно одинакова, а абсолютная величина нагонов существенно больше, чем сгонов. Наибольший размах сгонов-нагонов на Ям-Сале за период с 1937 по 1960 г. и дисперсия колебаний приходятся на 1938 г. Примечательно, что Корт (1941) считал этот ряд характерным, опираясь на те ряды, которые были в то время получены.

Наблюдается также существенная сезонная и межгодовая изменчивость характеристик сгоно-нагонов. Установлено, что вклад приливов в среднем составляет 4,2 % дисперсии остаточных рядов и также меняется от 2 до 6 % в зависимости от величины размаха непериодических колебаний (см. табл. 3).

Таблица 3

**Статистические характеристики сгонно-нагонных колебаний уровня в летний период по остаточным ежечасным рядам у Ям-Сале относительно линейных трендов**

Год	Число нагонов <sup>1</sup>	Число сгонов <sup>1</sup>	Макс. нагон, см	Макс. сгон, см	Размах, см	Дисперсия ряда	Дисперсия прилива <sup>2</sup>
1937	10	12	120	-85	205	1395,8	50,8 (3,5 %)
1938	13	13	298	-100	398	2705,0	51,0 (1,9 %)
1939	12	15	113	-83	196	1126,0	52,6 (4,5 %)
1941	12	12	105	-70	175	840,7	52,9 (5,9 %)
1945	10	9	129	-92	221	1160,0	49,1 (4,1 %)
1946	7	10	167	-69	236	1102,0	49,5 (4,3 %)
1947	8	9	106	-69	175	770,3	47,9 (5,9 %)
1955	11	12	132	-111	243	1299,9	49,4 (3,7 %)
1956	13	8	101	-71	172	807,2	51,1 (6,0 %)
1960	10	12	144	-91	235	1830,7	51,6 (2,7 %)

*Примечание.* 1 — число нагонов и сгонов по абсолютной величине более 25 см; 2 — в скобках величина дисперсии прилива, в процентах, от общей дисперсии наблюдений.

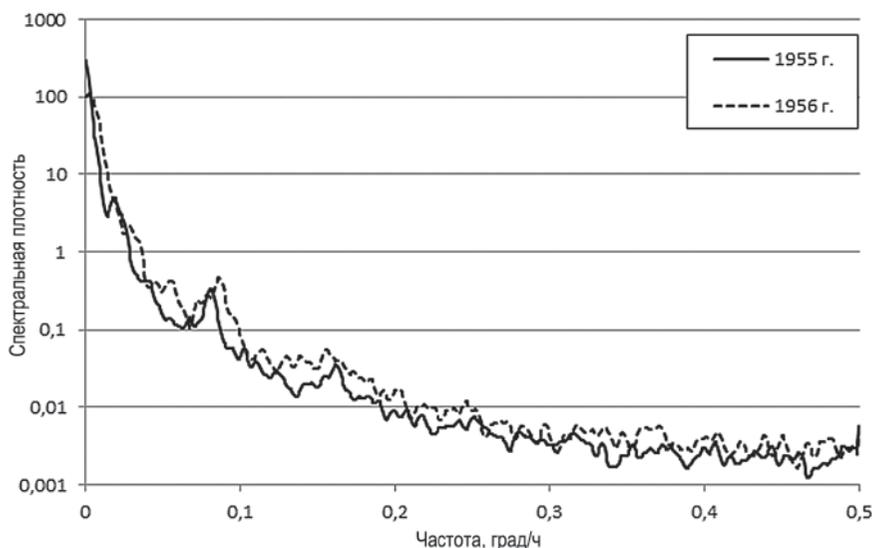


Рис. 3. Спектры остаточных ежечасных рядов за 1955 и 1956 гг.

Поскольку в предшествующих работах спектральная структура неперiodических колебаний уровня не изучалась, был выполнен расчет и анализ спектра остаточных рядов и также для детализации процесса произведен их фурье-анализ.

На рис. 3 даны спектры остаточных рядов за 1955 г. с высоким уровнем дисперсии колебаний и за 1956 г. со слабым развитием сгонно-нагонных колебаний (по их величине). Видно из хода кривых этого рисунка, что в долгопериодной полосе спектра можно различить не более двух пиков, причем они не совпадают по периодам. В 1955 г. присутствуют пики в спектре на периодах 54,5 ч и 24,5 ч, а в 1956 г. выделяются периоды 34,3 ч и 18,2 ч.

В полусуточной полосе спектров есть периоды соответственно 12,37 ч и 12,77 ч. Казалось, что на этих частотах пиков не должно быть, так как прилив в этих рядах устранялся по константам конкретного года и отдельно по месяцам. В первом случае, по-видимому, проявляется влияние четырехузловой сейши, так как в работе (Корт, 1949) рассчитан период этой сейши, который равен 12 ч 30 м. Во втором случае можно предположить проявление инерционных колебаний уровня с теоретическим значением 13,0 ч на широте Ям-Сале.

Видны значимые пики на периодах около 6 ч и 4 ч, которые отражают, по-видимому, высокочастотные сгонно-нагонные колебания уровня.

Все же спектры отражают колебания в стационарном приближении и не позволяют выявить детальные черты изменчивости (хотя и недостаточно устойчивые), и по результатам фурье-анализа остаточных рядов за 1935–1960 гг. были установлены общие для всех лет периодичности в остаточных рядах.

В синоптическом диапазоне колебаний выделяются периоды 69–75; 48–59; 34–40; 20–22 ч. В отдельные годы отмечаются колебания на периодах 120 ч и более до 688 ч (но они все мало значимые). Более ясно выражены колебания в мезомасштабном диапазоне. Здесь можно указать периоды 14–16; 12,4–13,0; 8,0–8,8; 6,0–6,3;

3,4–4,3; 2,6–3,2 ч. Видно, что большинство этих периодичностей находится вблизи линий спектра прилива. Возможно, что при более тщательном удалении прилива, а именно — не по средним за весь период наблюдений, а по оценкам за данный год, то есть с учетом межгодовой и сезонной изменчивости, оценки периодов могли бы несколько скорректироваться. Однако при визуальном просмотре остаточных рядов в них видны подобные нерегулярные высокочастотные колебания.

*Оценка прогностических уравнений В.Г. Корта (1941) и Н.А. Лабзовского (1948).* Работа (Корт, 1941) базируется в основном на материалах уровневых наблюдений на Ямсальском баре, выполненных в 1938 г. В.Г. Кортом получено несколько уравнений для расчета уровня с заблаговременностью 18 и 12 ч для полной воды, малой воды и для среднего мгновенного уровня. Под средним мгновенным уровнем понимался средний уровень серии в данном году с исключенным приливом, как текущее среднее из уровней полной и малой вод. В качестве предикторов автор использовал уровень Ям-Сале, а также градиенты атмосферного давления между пунктами Салехард — о. Белый и о. Белый — Усть-Енисейский порт по данным четырехсрочных наблюдений. Для учета влияния речного стока В.Г. Корт использовал уровень по посту Ангальский мыс (Салехард), измеренный за 120 ч до момента дачи прогноза. Именно такое значение времени добегающего (5 сут.) речного уровня от Ангальского мыса до мыса Ям-Сале принимал В.Г. Корт, опираясь на данные отчета (Смирнов, 1937).

Вследствие малых величин коэффициента связи у члена уравнения, выражающего влияние речного стока в зависимости от уровня у м. Ангальский (Салехард), в работе (Корт, 1941) предложено его не использовать.

Выполненные нами расчеты коэффициента корреляции среднесуточных уровней у мыса Ям-Сале с уровнями р. Оби у Салехарда показали, что при разных временных сдвигах рядов (4, 5, 6 и 7 сут.) их значения оказались наименьшими для 1941 г. (от –0,027 до 0,065) и наибольшими для 1947 г. (0,68) (см. табл. 4). В данном случае коэффициенты корреляции оценивались по среднесуточным уровням в связи с отсутствием срочных наблюдений по посту Ангальский мыс, синхронных с Ям-Сале.

На самом деле коэффициент связи в прогностическом уравнении, отражающий влияние речного стока, настолько мал, что мы, следуя за (Корт, 1941), им пренебрегли.

Предложенная в (Корт, 1941) прогностическая зависимость имеет вид:

$$H_{\text{пр}} = k_1 \times H_{\text{и}} + k_2 \times \Gamma_1 + k_3 \times \Gamma_2 + C, \quad (1)$$

Таблица 4

**Коэффициенты корреляции среднесуточных уровней на постах Ям-Сале и Ангальский мыс при различных временных сдвигах рядов (опережение Салехарда относительно Ям-Сале)**

Год	Сдвиг, сут.			
	4	5	6	7
1941	0,065	0,051	0,027	–0,027
1945	0,274	0,252	0,219	0,193
1946	0,316	0,315	0,314	0,309
1947	0,678	0,679	0,68	0,678
1955	0,288	0,278	0,272	0,268
1956	0,17	0,195	0,208	0,210
1960	0,169	0,171	0,169	0,172

где  $H_{пр}$  — прогнозируемый уровень с заданной заблаговременностью (в сантиметрах);  $H_{н}$  — остаточный (средний мгновенный) уровень, измеренный на момент дачи прогноза (в сантиметрах);  $\Gamma_1, \Gamma_2$  — градиенты атмосферного давления (в миллибарах) между выбранными метеорологическими станциями на момент дачи прогноза с заданной заблаговременностью, где  $\Gamma_1 = P_1 - P_2, \Gamma_2 = P_2 - P_3, P_1$  — станция Салехард,  $P_2$  — станция о. Белый,  $P_3$  — станция Усть-Енисейский порт;  $k_1, k_2, k_3, C$  — соответственно коэффициенты регрессии и свободный член.

По мнению Н.А. Лабзовского (Лабзовский, 1948), наиболее удачным уравнением В.Г. Корта (Корт, 1941) является зависимость для заблаговременности 12 ч, полученная для среднего мгновенного уровня. При этом Н.А. Лабзовский, выполнив проверку зависимости для ряда градиентов атмосферного давления между 12 пунктами на материалах 1937 и 1940 гг., в окончательном варианте прогностического уравнения принял градиенты между Марре-Сале – Усть-Енисейский порт ( $\Gamma_1$ ), а также Амдерма – Салехард ( $\Gamma_2$ ).

Проведенное нами исследование связи уровня на посту Ям-Сале с градиентами атмосферного давления, вычисленными по (Корт, 1941) с различной заблаговременностью, показали, что наиболее тесная связь отмечается при заблаговременности 18 ч для градиента Белый – Усть-Енисейский порт ( $\Gamma_2$  в уравнении (1)) (см. рис. 4).

Аналогичное исследование связи уровня на посту Ям-Сале с градиентами атмосферного давления, вычисленными по (Лабзовский, 1948), показали, что наибольшие коэффициенты корреляции получены при сдвиге рядов по времени 12 и 18 ч для градиента давления между станциями Марре-Сале – Усть-Енисейский порт ( $\Gamma_1$  в уравнении (1), (см. рис. 5).

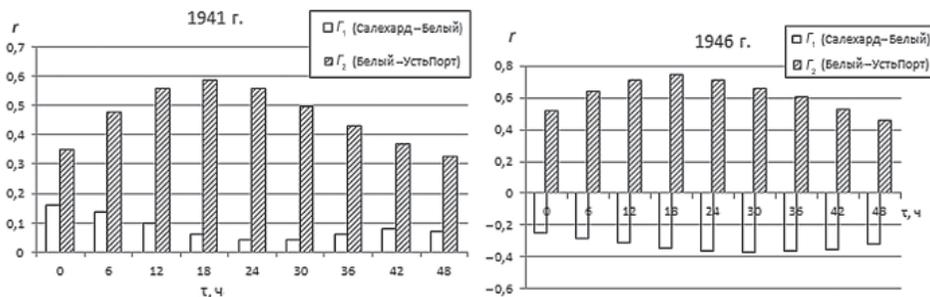


Рис. 4. Коэффициенты корреляции ( $r$ ) уровней Ям-Сале с градиентами давления  $\Gamma_1, \Gamma_2$ , вычисленными по (Корт, 1941) при различном временном сдвиге ( $\tau$ ) по данным за 1941 и 1946 гг.

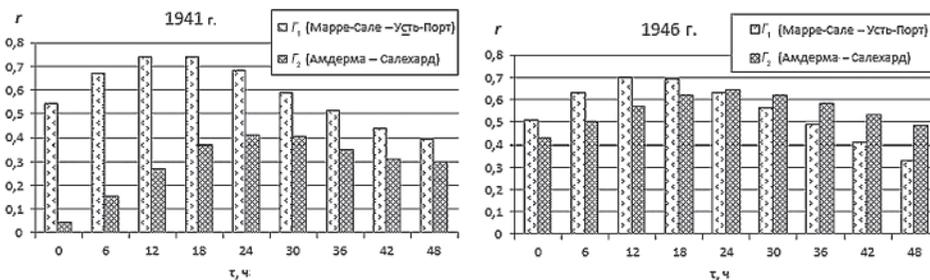


Рис. 5. Коэффициенты корреляции ( $r$ ) уровней Ям-Сале с градиентами давления  $\Gamma_1, \Gamma_2$ , вычисленными по (Лабзовский, 1948) при различном временном сдвиге ( $\tau$ ) по данным за 1941 и 1946 гг.

Таблица 5

**Параметры прогностического уравнения, полные коэффициенты корреляции ( $R$ ) и среднеквадратичные отклонения (СКО) для заблаговременности 18 ч при вычислении градиентов давления  $G_1, G_2$  по (Корт, 1941) ( $n$  – длина ряда)**

Год	Параметры уравнения				Статистика		
	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$C$	$R$	СКО	$n$
1938 (Корт, 1941)	0,729	0,630	2,058	26,5	0,94	17,6	344
1941	0,421	1,042	2,982	137,00	0,76	19,98	214
1945	0,306	1,268	3,490	75,18	0,85	18,40	349
1946	0,500	0,602	2,573	57,27	0,86	17,20	309
1947	0,323	0,716	2,616	137,78	0,91	13,66	310
1955	0,815	0,021	0,990	44,26	0,87	25,90	461
1956	0,396	0,552	2,386	148,25	0,80	17,31	377

Таблица 6

**Параметры прогностического уравнения, полные коэффициенты корреляции ( $R$ ) и среднеквадратичные отклонения (СКО) для заблаговременности 18 ч при вычислении градиентов давления  $G_1, G_2$  по (Лабзовский, 1948)**

Год	Параметры уравнения				Статистика	
	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$C$	$R$	СКО
1941	0,548	0,288	1,005	120,65	0,64	23,87
1945	0,286	2,889	2,049	84,79	0,89	16,31
1946	0,487	1,671	2,058	68,61	0,86	17,09
1947	0,456	1,728	1,044	97,95	0,90	14,35
1955	0,767	0,635	2,606	71,98	0,89	23,80
1956	0,300	2,118	1,959	188,11	0,85	15,03

Количественная оценка уравнения (1) на наблюдениях за 1941–1956 гг. дана в табл. 5 и табл. 6. Приведенные в табл. 5 и табл. 6 данные показывают, что наибольшие значения множественного (полного) коэффициента корреляции (после 1938 г.) наблюдаются в 1947 г. как для случаев вычисления градиентов давления по (Корт, 1941), так и по (Лабзовский, 1948). Минимальные значения коэффициентов корреляции и, как следствие, наибольшие СКО при расчетах по обоим методам наблюдались в 1941 и 1955 гг.

В 1938 г. наблюдались самые высокие значения частных и общего коэффициентов корреляции, а в ряду был отмечен нагон с величиной около 3 м (см. табл. 3). По-видимому, такие условия встречаются с повторяемостью 1 раз в 20 лет, поэтому нельзя рассматривать серию уровня в 1938 г. как характерную (Корт, 1941).

При сравнении эффективности уравнений по обоим прогностическим уравнениям (см. табл. 5 и 6), если в качестве критерия брать средние значения СКО за период 1941–1956 гг., видно, что небольшое преимущество наблюдается по (Лабзовский, 1948), так как средние СКО соответственно равны 18,74 и 18,41. Однако средние коэффициенты корреляции за тот же период практически одинаковы, но чуть выше по (Корт, 1941). В целом различие как в коэффициентах корреляции, так и в СКО по величине незначительное, поэтому оба метода приближенно одинаково эффективны.

Очевидно, что более надежный прогноз сгонно-нагонных колебаний уровня моря можно получить при использовании прогностического уравнения (1), построенного с использованием параметров, осредненных за ряд лет.

Средние за 1941–1956 гг. значения параметров прогностического уравнения при использовании градиентов атмосферного давления по В.Г. Корту (см. табл. 5) составили:  $k_1 = 0,460$ ;  $k_2 = 0,700$ ;  $k_3 = 2,506$ ;  $C = 99,957$ . Аналогично, средние значения параметров уравнения при вычислении градиентов давления по Н.А. Лабзовскому (см. табл. 6) составили соответственно 0,474; 1,555; 1,787; 105,348. К сожалению, наблюдения за 1937–1939 гг. не удалось оценить по новым уравнениям вследствие отсутствия данных по атмосферному давлению.

На рис. 6 представлен ход уровней по наблюдениям и рассчитанный по средним параметрам вместе с предвычисленными по константам табл. 2 приливными колебаниями (прогноз). Видимое на графике наибольшее расхождение наблюдений с прогнозом отмечается на период наибольшего подъема уровня 22 сентября. Но в целом сгонно-нагонные колебания описываются удовлетворительно.

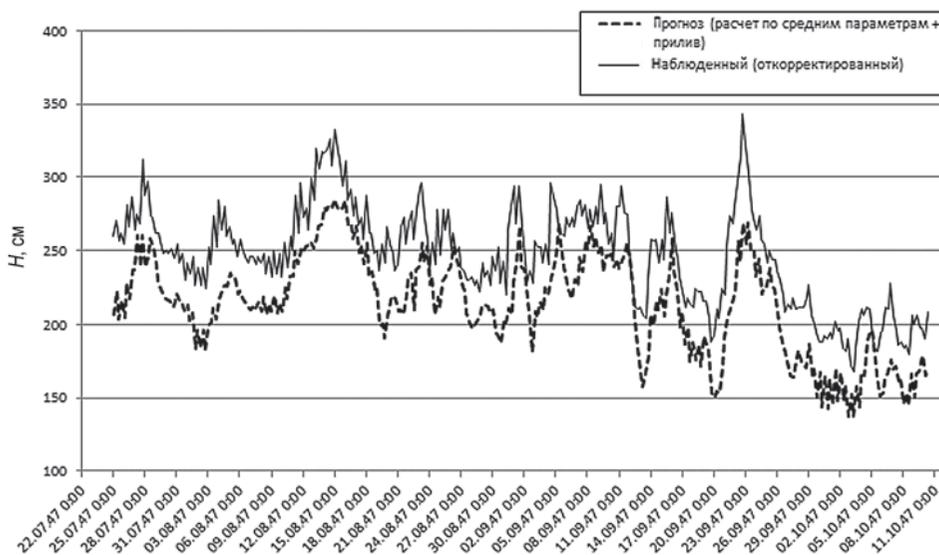


Рис. 6. Временной ход уровней наблюдаемого (откорректированного) ряда и рассчитанного по средним параметрам при заблаговременности 18 ч для 1947 г. (градиенты давления — по В.Г. Корту).

На рис. 6 кривые наблюдений и прогноза имеют разный горизонт отсчета. Это вызвано, во-первых, особенностями сезонного хода уровня в 1947 г. и, во-вторых, неустановленной высотной привязкой измерений уровня в этом году. В таких случаях следует ввести в прогноз поправку на высоту уровня, равную величине расхождения кривых в начале прогноза.

В табл. 7 представлены коэффициенты корреляции исходных (наблюденных) рядов с прогнозными, рассчитанными по средним за 1941–1956 гг. значениям параметров прогностического уравнения, для заблаговременности 18 ч. В качестве исходного (наблюденного) брался ряд, откорректированный на наличие ошибок. Прогнозные ряды формировались из остаточного ряда, рассчитанного по уравнению с осредненными параметрами, и приливной составляющей, предвычисленной по гармоническим постоянным.

Как видно из данных табл. 7, наиболее тесная связь наблюдаемых уровней с рассчитанными по осредненным параметрам отмечается для 1947 г. При вычислении

**Коэффициенты корреляции остаточных рядов с рассчитанными по средним значениям параметров прогностического уравнения (1), для заблаговременности 18 ч по версиям Корта (1941) и Лабзовского (1948)**

Год	Коэффициенты корреляции при вычислении градиентов давления	
	по Корту (1941)	по Лабзовскому (1948)
1941	0,78	0,81
1945	0,84	0,86
1946	0,86	0,87
1947	0,91	0,90
1955	0,83	0,88
1956	0,80	0,84

параметров по градиентам атмосферного давления по (Корт, 1941) и (Лабзовский, 1947) коэффициенты корреляции соответственно составили 0,91 и 0,90. Для остальных лет во всех случаях картина обратная — использование градиентов давления по (Лабзовский, 1947) дает коэффициенты корреляции несколько выше, чем по (Корт, 1941). Это является следствием того, что коэффициенты корреляции уровней Ям-Сале с градиентами давления для параметра  $\Gamma_2$ , вычисленными по (Лабзовский, 1948) при различном временном сдвиге, несколько лучше, чем по (Корт, 1941).

Сравнение коэффициентов корреляции остаточных рядов с прогнозными, полученными по уравнению (1) по средним параметрам при задании градиентов давления по Корту (1941) и по Лабзовскому (1948), показало небольшое преимущество версии Лабзовского (см. табл. 6). Коэффициенты корреляции в среднем за период 1941–1956 гг. составили соответственно 83,7 и 86,0.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью гармонического анализа приливов по МНК удалось установить реальное время измерений в наблюдениях за уровнем воды у мыса Ям-Сале за все имеющиеся периоды измерений уровня воды. При этом подтверждена правильность обработки приливов у м. Ям-Сале в работе (Носков, 1938), результаты которой опубликованы в Таблицах приливов (1941). Однако обнаружена ошибка времени измерений в сведениях о приливах у м. Ям-Сале в работе (Коптева и др., 1952) за 1940 г.

Средние оценки констант волн приливов, выведенные за период 1937–1960 гг. и проверенные по данным за 1965–1976 гг., позволяют производить прогноз приливных колебаний уровня на навигационный период (июль–сентябрь) в условиях чистой воды и также обеспечивают строгий расчет остаточных рядов (наблюдения минус предвычисления) для исследования непериодических колебаний уровня. Можно предположить, опираясь на выводы в работе (Войнов, Пискун, 2015), что на период развития припайного льда в октябре–июне приливные колебания у мыса Ям-Сале будут практически незаметны (не более 1–2 см в сизигию).

Дисперсия приливных колебаний уровня в среднем составляет всего 4,2 % общей дисперсии наблюдений, но средняя сизигийная величина прилива равна 23 см, и поэтому учет прилива в прогнозе колебаний уровня все же необходим.

Анализ остаточных рядов (наблюдения минус предвычисления), приведенных к линейному тренду, показывает, что в летний период повторяемость нагонов и сгонов

приближенно одинакова, а абсолютная величина нагонов существенно больше, чем сгонов. Наибольший размах сгонов-нагонов на Ям-Сале за период с 1937 по 1960 г. и дисперсия колебаний приходится на 1938 г. Величина нагона в этом году составила 3 м. По нашей оценке, повторяемость нагона такой величины равна 1 разу за 20 лет.

В синоптическом диапазоне непериодических колебаний уровня выделяются периоды 69–75; 48–59; 34–40; 20–22 ч. В отдельные годы отмечаются колебания на периодах 120 ч и более до 688 ч (но они все мало значимые). Более ясно выражены колебания в мезомасштабном диапазоне. Здесь можно указать периоды 14–16; 12,4–13,0; 8,0–8,8; 6,0–6,3; 3,4–4,3; 2,6–3,2 ч.

В результате анализа связей уровня на посту Ям-Сале с градиентами атмосферного давления, вычисленными по В.Г. Карту с различной заблаговременностью, установлено, что наиболее тесная связь отмечается при заблаговременности 18 ч для градиента о. Белый – Усть-Енисейский порт. Зависимость остаточных уровенных рядов у м. Ям-Сале от расходов воды у Салехарда при разных временных сдвигах рядов (4, 5, 6 и 7 сут.) оказалась иногда значимой. Но в уравнении прогноза коэффициент при члене этой связи крайне мал и в прогнозе по уравнению (1) не учитывался.

Связи уровня на посту Ям-Сале с градиентами атмосферного давления, вычисленными по Н.А. Лабзовскому, дают наибольшие коэффициенты корреляции при сдвиге рядов по времени 12 и 18 ч для градиента давления между станциями Марре-Сале – Усть-Енисейский порт.

Предложены уравнения вида (1) с использованием средних параметров за рассматриваемые годы. Выполненные на их основе прогностические расчеты показали, что при вычислении параметров по градиентам атмосферного давления по (Корт, 1941) и по (Лабзовский, 1947) коэффициенты корреляции соответственно составили в среднем 83,6 и 86,0. Однако при использовании уравнений с коэффициентами связи по отдельным годовым сериям в среднем коэффициенты корреляции по (Корт, 1941) были немного выше.

Таким образом, приведенные результаты подтверждают надежность уравнения, структура которого предложена В.Г. Карту (Корт, 1941), для краткосрочных прогнозов уровня на Ям-Сале с заблаговременностью 18 ч. В целом значимых преимуществ при использовании разных методов определения параметров прогностического уравнения не отмечается.

Полученные в настоящей работе результаты могут быть полезны при дальнейшем поиске эмпирических связей для прогноза уровня воды на Ямсальском баре и разработке численной модели штормовых нагонов. Следует отметить необходимость возобновления уровенных наблюдений на Ямсальском баре с применением современных приборов, без чего невозможно обеспечить судоводителей фактической и прогностической информацией о состоянии глубин на баре.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Войнов Г.Н.* Приливные явления в Карском море. СПб.: Изд-во Русского географического общества, 1999. 109 с.
- Войнов Г.Н.* Метод аппроксимации и интерполяции временных рядов ежечасных наблюдений за уровнем моря // Записки по гидрографии. 2003. № 257. С. 59–65.
- Войнов Г.Н., Пискун А.А.* Оценка приливов в Новом порту (Обская губа) по наблюдениям за уровнем за период 1977–2012 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 3 (105). С. 51–65.

Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек за 1983 г. Т. 7. Вып. 1. Ч. 2. Л.: Зап.-Сиб. РВЦ, 1985. 126 с.

*Коптева А.В., Бутенко А.К., Иванова З.К.* Материалы по изучению приливов арктических морей СССР // Тр. АНИИ. 1952. Т. 42. Вып. VII. Карское море. 536 с.

*Коптева А.В.* Уровень и течения Обской губы // Тр. АНИИ. 1953. Т. 59. С. 84–148.

*Корт В.Г.* Непериодические колебания уровня воды в Арктических морях и способы их прогноза // Тр. АНИИ. 1941. Т. 175. 163 с.

*Корт В.Г.* К вопросу о колебаниях уровня поверхности Обской губы // Тр. АНИИ. 1949. Т. 13. С. 100–118.

*Лабзовский Н.А.* Непериодические колебания уровня в Обской губе. Л.: АНИИ, 1948. 30 с.

*Носков А.П.* Приливы в Обь-Енисейском районе и шхерах Минина // Приливы в морях Советской Арктики: Материалы по гидрографии морей и рек Советской арктики. Вып. III. Ч. I. Л.: Изд-во Главсевморпути, 1938. 63 с.

*Смирнов К.И.* К материалам гидрологии бара р. Оби. Л.: АНИИ, 1937. Фонды ААНИИ. Фондовый № О-529. С. 30–90.

*Смирнов К.И.* О колебаниях глубин Ямсаляского бара реки Оби // Проблемы Арктики и Антарктики. 1946. № 2. С. 5–12.

Таблицы приливов. Т. II. Гармонические постоянные для предвычисления приливов. Л.: Изд. Гидрогр. Упр. ВМФ СССР, 1941. 295 с.

*G.N. VOINOV, A.A. PISKUN*

## **TIDAL AND STORM SURGES SEA LEVEL AT CAPE YAM-SALE (THE GULF OF OB)**

Average estimates of the harmonic constants of tides are given over the summer period (July–September) at Cape Yam-Sale (Obskaya Guba), obtained using least-squares method version of the AARI over the period from 1937 to 1960. According to the residual series (observation minus prediction) are produced a study of the wind-surges of sea level fluctuations in some years during the summer period 1937–1960. Verify the predictive equations V.G. Kort and N.A. Labzovski is considered to calculate the storm surges.

*Keywords:* harmonic constants, Cape Yam-Sale, statistical evaluation of the storm surges, sea level, prognostic equations.