

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-1-71-88>

УДК 551.461:551.468(265.51)

## **Метод и технология краткосрочного прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря**

***Ю.В. Любичский, С.О. Романский***

*Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, г. Владивосток, Россия  
yuvadlub@gmail.com*

Рассмотрены основные характеристики метода краткосрочного (с заблаговременностью 72 часа) прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря. Пространственно-временные вариации сгонно-нагонной составляющей уровня моря в пределах Берингова моря и прилегающих к нему районов рассчитываются по двумерной численной гидродинамической модели совместной динамики воды и льда. Форсинг модели реализуется с помощью полей приземного атмосферного давления и ветра, прогнозируемых в рамках атмосферной модели WRF-ARW. Прилив вычисляется только в береговых пунктах, для которых выпускается прогноз, по гармоническим постоянным 11 основных волн. Информация о распределении ледяного покрова в пределах рассматриваемого объекта формируется по данным Global Forecast System. Технологическая линия метода прогноза работает в автоматическом режиме. Результаты сравнения рассчитанных прогнозов с данными наблюдений автоматизированных постов службы цунами Никольское, Оссора, Корф (Тиличики) свидетельствуют о соответствии разработанного метода прогноза требованиям руководящих документов Росгидромета.

*Ключевые слова:* метод прогноза, уровень моря, Берингово море, численная гидродинамическая модель, сгонно-нагонные явления, прилив, ледяной покров, оценки качества прогнозов

## **Method and technology of short-term forecasting of sea level variations in the southwestern Bering Sea**

***Yu. V. Lyubitskiy, S. O. Romanskiy***

*Far Eastern Regional Hydrometeorological Research  
Institute, Vladivostok, Russia  
yuvadlub@gmail.com*

The main characteristics of the method to forecast sea level with a lead time of 72 hours for the southwestern part of the Bering Sea are considered. Spatiotemporal variations in storm surges within the Bering Sea and adjacent areas are calculated using a two-dimensional numerical hydrodynamic model of the coupled water and ice dynamics. The model forcing is implemented using the data on surface air pressure and wind, which are predicted by the WRF-ARW atmosphere model. Tidal elevations are calculated only

at coastal points, 11 major tidal harmonic constituents are used. Information about the distribution of the ice cover within the study object is formed based on the Global Forecast System data. A technological line of the forecasting method operates in automatic mode. The results of the comparison of sea level forecasts and observations at Nikol'skoye, Ossora, and Korf (Tilichiki) tide gages indicate that the developed forecast method complies with the requirements of the Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet).

*Keywords:* forecast method, sea level, Bering Sea, numerical hydrodynamic model, storm surge, tide, ice cover, forecast skill scores

## Введение

Для реализации эффективной и безопасной морской деятельности на побережье и акватории морей и океанов требуется информация об ожидаемых характеристиках гидрометеорологических явлений [1, 4]. Особую важность имеют прогнозы опасных природных явлений (ОЯ), которые вызывают существенный материальный ущерб и могут угрожать жизни людей.

В данной статье рассмотрены основные структурные блоки и технологическая линия метода краткосрочного (с заблаговременностью 72 часа) прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря, разработанного в ФГБУ «ДВНИГМИ». Эти прогнозы необходимы для обеспечения работы грузопассажирского и рыболовного флота, успешной эксплуатации береговых объектов.

Следует отметить, что на побережье юго-западной части Берингова моря часто возникают опасные нагонные явления, во время которых затопляются населенные пункты, транспортные коммуникации и сооружения.

Во время штормового нагона 17–19 ноября 1981 г. в п. Анапка были затоплены лодочная станция и жилые постройки, в п. Корф разрушены два дома, залит склад рыбокооп.

15–16 декабря 2008 г. подтоплены населенные пункты Корф, Ивашка и Вывенка. В поселке Корф затопило восемь жилых домов, туберкулезный диспансер, три трансформаторные подстанции, котельную. В селе Ивашка были повреждены 13 жилых домов, один из которых стал непригодным для проживания, во многих домах залило подвалы. В Корфе и Ивашке частично было эвакуировано население.

В Никольском (о. Беринга) во время штормов регулярно затопливается пирс зверокомбината.

Следовательно, задача разработки и внедрения в оперативную практику учреждений Росгидромета метода краткосрочного прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря является весьма актуальной.

## Основные характеристики метода прогноза

В рамках разработанного метода прогноза для расчета пространственно-временных колебаний сгонно-нагонной составляющей уровня моря используется численное гидродинамическое моделирование. Данный подход успешно применяется во многих современных методах краткосрочного прогноза уровня моря [8–10, 13, 16].

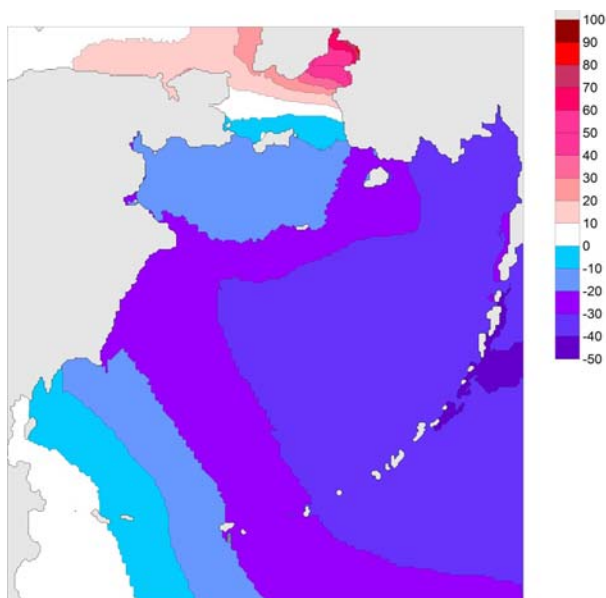
Для обеспечения корректного учета влияния ледяного покрова на процессы формирования сгонно-нагонных явлений используется двумерная нелинейная численная гидродинамическая модель совместной динамики воды и льда [2, 6]. Касательные напряжения на границах разделов воздух – вода, воздух – лед, лед – вода, вода – дно вычисляются по квадратичным зависимостям. Силы внутреннего взаимодействия ледяного покрова учитываются с помощью приближения, предложенного в [2].

Для численной аппроксимации уравнений модели используется явная конечно-разностная схема, реализованная на сетке типа «С» по классификации Аракавы.

Сточная область численной модели с пространственным шагом 7,5 км включает акватории Берингова моря, прилегающих к нему районов Тихого океана и Чукотского моря (рис. 1). Выбор столь обширного объекта позволяет, во-первых, корректно задать условия на жидких границах сеточной области, во-вторых, в перспективе, при некотором усовершенствовании метода (например, детализации сетки в Анадырском заливе), предусмотреть выпуск прогнозов уровня моря и для побережья Чукотки. В соответствии с критерием Куранта – Фридрихса – Леви шаг по времени составляет 12 секунд.

На твердых границах сеточной области модели нормальные к ним компоненты скорости течения и дрейфа льда принимаются равными нулю. На жидких границах сеточной области для льда применяется условие свободного протекания, для воды учитываются два условия: импедансное и гидростатического изменения уровня моря по «закону обратного барометра» в результате вариаций приземного атмосферного давления относительно их средних месячных значений, рассчитанных для интервала времени с 1993 по 2017 год (данный подход позволяет в первом приближении воспроизводить сезонный (годовой) ход уровня моря).

В качестве начальных условий при расчете сгонно-нагонных колебаний уровня моря используются поля уровня моря и течений, рассчитанные в рамках предшествующего сеанса прогноза для заблаговременности 12, 24, 36 или 48 ч. Выбор полей для выполняемого расчета определяется наличием пропусков предыдущих прогнозов: если таких пропусков не было, учитывается информация для заблаговременности 12 ч, если пропущен один прогноз – для заблаговременности 24 ч и т. д. В ситуациях, когда не рассчитаны более трех последовательных прогнозов, расчет очередного прогноза выполняется при нулевых начальных условиях.



**Рис. 1.** Прогнозируемые сгонно-нагонные уровни моря в 00 ч ВСВ 14.01.2020 г. (прогноз от 12 ч ВСВ 11.01.2020 г.), см.

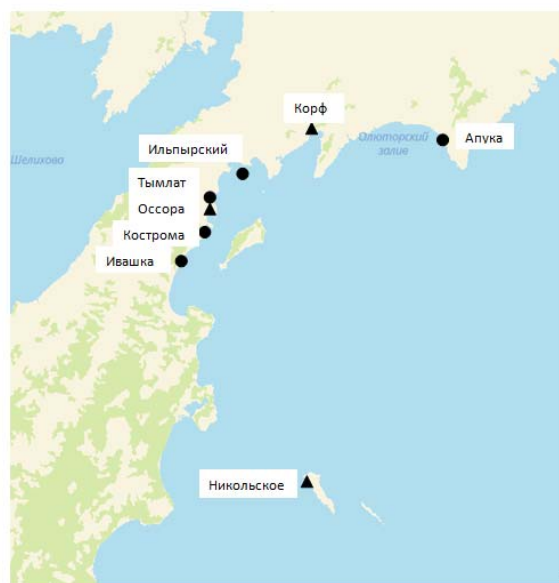
**Fig. 1.** Forecasted storm surge heights at 00.00 UTC 2020-01-14 (initial time of the forecast is 12.00 UTC 2020-01-11), cm.

Для форсинга численной модели, применяемой для расчета сгонно-нагонных колебаний уровня моря, используется прогностическая продукция (поля ветра на высоте 10 м и приземного атмосферного давления на уровне земли) региональной атмосферной модели WRF-ARW [17] с пространственным шагом 15 км [3]. Для построения сетки модели WRF-ARW использована равноугольная коническая проекция Ламберта. В целях экономии вычислительных ресурсов сетки обеих моделей сопряжены между собой. Значения метеорологических характеристик вводятся в модель для расчета уровня моря с дискретностью, равной одному часу. Для их получения в узлах расчетной сетки применяется линейная интерполяция.

Сведения о распределении ледяного покрова в пределах сеточной области модели формируются по данным Global Forecast System.

Численная модель, используемая в разработанном методе прогноза для расчета сгонно-нагонных колебаний уровня моря, при задании на жидких границах сеточной области гармонических постоянных уровня и средних по глубине скоростей течений основных волн прилива [14] позволяет успешно воспроизводить пространственно-временные вариации суммарного уровня моря и его приливной составляющей [7]. Тем не менее для экономии вычислительных ресурсов прилив (соответственно,

и суммарный уровень моря) вычисляется только в восьми береговых пунктах, для которых выпускается прогноз (рис. 2). При этом используются рассчитанные заранее по материалам наблюдений гармонические постоянные одиннадцати основных волн прилива ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$ ,  $Q_1$ ,  $M_4$ ,  $MS_4$ ,  $M_6$ ). Для пунктов Никольское и Корф (Тиличики) (рис. 2) учитывается сезонная изменчивость гармонических постоянных.



**Рис. 2.** Пункты, для которых рассчитывается прогноз суммарного уровня моря (треугольники – станции, где выполняются наблюдения над уровнем моря).

**Fig. 2.** The points at which the total sea level is forecasted (triangles represent the tide gauges).

### Технологическая линия метода прогноза

Технологическая линия метода прогноза реализована на вычислительном комплексе CRAY XC-40 Регионального вычислительного центра ФГБУ «Дальневосточное УГМС» и работает в автоматическом режиме.

Заблаговременность прогноза составляет до 72 ч. Прогноз рассчитывается два раза в сутки от сроков 00 и 12 ч ВСВ.

Во время каждого сеанса прогноза выполняется следующая последовательность действий.

1. После завершения работы региональной атмосферной модели WRF-ARW формируется файл с ежечасными прогнозируемыми значениями направления и скорости ветра на высоте 10 м и приземного атмосферного давления в узлах сетки данной модели.

2. С сайта <https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/> загружается информация о распределении и сплоченности ледяного покрова в северной части Тихого океана и в Чукотском море с разрешением 0,25 градуса. Файл с этой информацией сохраняется на локальном сервере для возможности его использования в дальнейшем, если в последующих сеансах прогноза уровня моря при передаче ледовых данных по сети Интернет произойдет сбой.

3. Перед стартом расчета из файлов считываются константы, используемые в модели: гармонические постоянные основных волн прилива в береговых пунктах, значения параметра Кориолиса в узлах расчетной численной сетки, средние за многолетний период месячные значения приземного атмосферного давления в узлах жидких границ сеточной области и ряд других характеристик.

4. Из архивных файлов предыдущего сеанса прогноза считываются поля сгонно-нагонной составляющей суммарного уровня моря и течений, которые используются в качестве начальных данных при расчетах по численной модели в текущем сеансе прогноза.

5. Информация о состоянии ледяного покрова и значения метеорологических характеристик интерполируются в узлы сеточной области модели для расчета сгонно-нагонной составляющей уровня моря. Приземное атмосферное давление приводится к уровню моря.

6. По дате и времени выпуска прогноза вычисляются астрономические характеристики [15]: средняя долгота Солнца, средняя долгота Луны, средняя долгота перигея лунной орбиты, долгота восходящего узла лунной орбиты. Эти значения используются для вычисления редуцированных множителей и астрономических частей фаз основных волн прилива.

7. По гармоническим постоянным волн прилива и значениям астрономических характеристик рассчитывается приливная составляющая суммарного уровня моря в береговых пунктах.

8. Выполняется расчет пространственно-временных изменений сгонно-нагонной составляющей суммарного уровня моря по численной модели. В процессе вычислений на дисковой полке вычислительного комплекса сохраняются поля уровня моря и течений с заблаговременностью прогноза 12, 24, 36 и 48 ч, которые будут использованы в последующих сеансах прогноза в качестве начальных условий.

9. Формируются и архивируются файлы с информацией об ожидаемых ежечасных значениях суммарного уровня моря, его сгонно-нагонной и приливной составляющих в восьми береговых пунктах, расположенных в юго-западной части Берингова моря, и в 134 дополнительных пунктах на побережье и акватории Берингова моря, прилегающих к нему районов Тихого океана и Чукотского моря. Первый файл автоматически передается по электронной почте в отдел морских прогнозов ФГБУ «Камчатское УГМС», второй используется для исследования особенностей и закономерностей возникновения и развития сгонно-нагонных колебаний уровня моря в пределах рассматриваемого объекта.

Технологическая линия метода прогноза работает в оперативном режиме с 1 октября 2020 г. Для оценки качества работы метода в квазиоперативном режиме (по прогностическим полям метеорологических характеристик и информации о состоянии ледяного покрова) дополнительно рассчитаны прогнозы изменений уровня моря для периода с января по сентябрь 2020 года.

С 1 января 2020 г. по 31 декабря 2021 г. по техническим причинам (в периоды плановых технологических работ на вычислительном комплексе) не были рассчитаны всего 10 прогнозов (0,7 % от общего числа возможных прогнозов), что свидетельствует о надежности и устойчивости работы технологической линии метода прогноза.

### Оценка качества прогнозов

Наблюдения над уровнем моря в юго-западной части Берингова моря в настоящее время выполняются только на трех автоматизированных постах (АП) службы цунами Росгидромета: Никольское, Оссора и Корф (Тиличики) (см. рис. 2).

АП службы цунами производят измерения с минутной дискретностью. Для получения рядов ежечасных значений уровня моря, традиционно используемых для оценки точности прогнозов уровня моря, исходные ряды сглаживались с помощью треугольного фильтра Бартлетта с интервалом фильтрации 181 минута [5]. Данные измерений прошли детальный критический контроль с помощью методов, рассмотренных в [5].

Сведения о данных наблюдений, использованных для оценки качества прогнозов уровня моря, приводятся в табл. 1. Пропуски в наблюдениях продолжительностью менее пяти дней в этой таблице не указаны.

**Таблица 1.** Наблюдения над уровнем моря, использованные для оценки точности метода прогноза

**Table 1.** Sea level observations used to assess the accuracy of the forecasting method

Пункт	Период наблюдений
Никольское	1.01–27.10, 22.11–31.12.2020, 1.01–31.12.2021
Оссора	12.11–31.12.2020, 1–12.01, 17.01–5.03, 11–18.03, 24.03–24.04, 13–28.05, 4.06–30.08, 18.09–31.12.2021
Корф (Тиличики)	21.04–20.10, 30.10–31.12.2020, 1.01–31.12.2021

Данные наблюдений АП службы цунами не приводятся к нулям постов. Поэтому, чтобы исключить в первом приближении их искажение в результате изменения высотного положения измерительных датчиков и влияния ряда других причин, имеющих технический характер, при оценке

точности прогноза суммарного (наблюдаемого) уровня моря сравнивались отклонения данных измерений АП и прогнозируемых ежечасных уровней моря от их значений, средних для каждого месяца.

Точность прогнозов оценивалась с помощью статистических критериев, утвержденных действующими нормативными документами Росгидромета [11, 12].

При оценке оправдываемости морских прогнозов [12] величину допустимой ошибки прогноза рекомендуется рассчитывать по формуле  $\delta_{\text{доп}} \leq 0,674\sigma_x$ , где  $\sigma_x$  – среднеквадратическое отклонение данных наблюдений от их среднего значения.

В соответствии с этой формулой допустимая ошибка прогноза для Никольского составляет 24 см, Оссоры – 37 см, Корфа (Тиличиков) – 25 см. Тем не менее было решено использовать более «жесткие» критерии: для Никольского и Корфа (Тиличиков) допустимая ошибка прогноза принята равной 20 см, для Оссоры – 25 см.

Наблюденные значения суммарного уровня моря сравнивались с его прогнозируемыми значениями с заблаговременностью 24, 36, 48, 60 и 72 ч. Прогноз считался оправдавшимся, если его ошибка была меньше или равна допустимой ошибки  $\delta_{\text{доп}}$ .

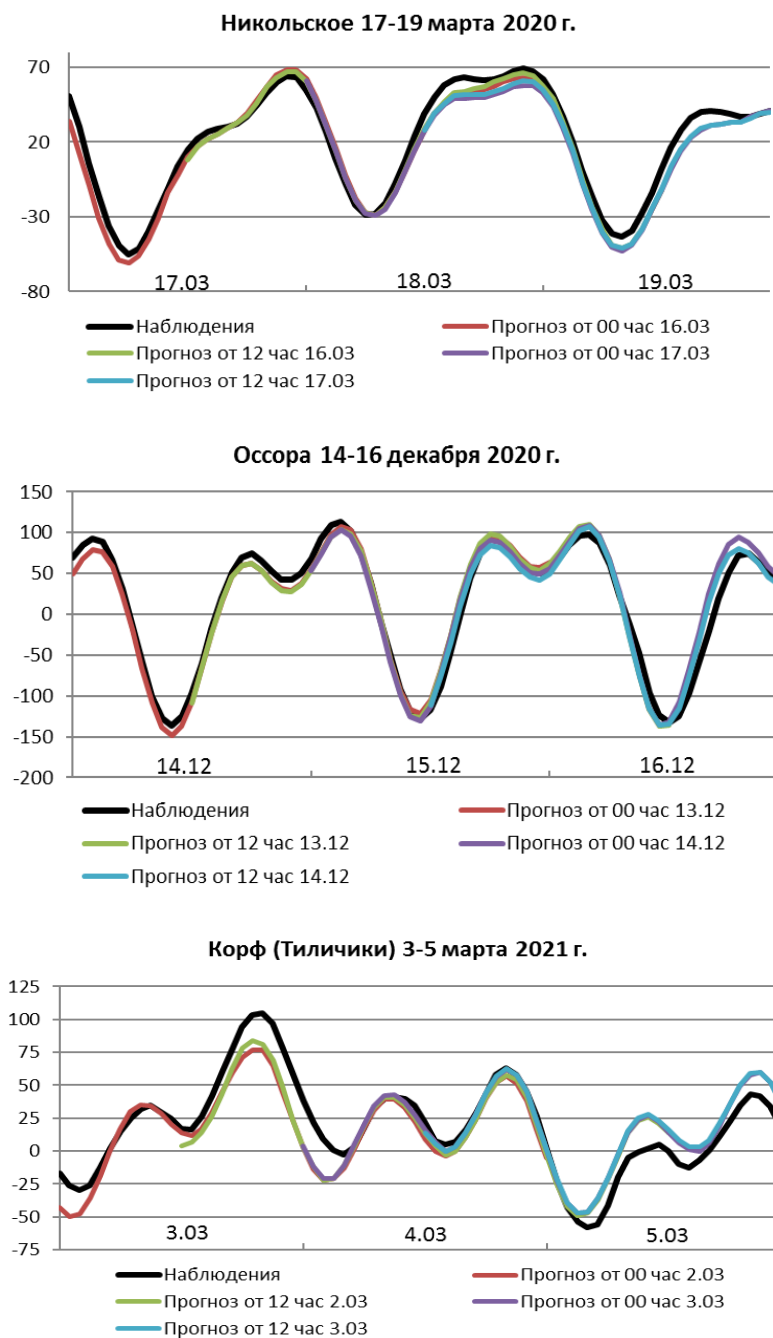
Точность прогноза суммарных уровней моря в береговых пунктах достаточно высокая (табл. 2, рис. 3). Средняя оправдываемость прогнозов составляет от 93,9 % (Корф (Тиличики)) до 97,8 % (Никольское), средняя абсолютная ошибка прогноза не превышает 10,4 см, среднеквадратическая ошибка прогноза – 13,3 см. Значение критерия  $S/\sigma_x$  находится в диапазоне 0,22–0,28. Это существенно меньше его порогового значения, равного 0,67, при количестве проверочных прогнозов большем или равном 25 [12].

**Таблица 2.** Характеристики качества прогнозов суммарного уровня моря  
**Table 2.** Characteristics of the accuracy of the total sea level forecasts

Пункт	$N$	$\hat{\delta}$ , см	$\delta$ , см	$S$ , см	$S/\sigma_x$	$P$ , %
Никольское	6858	0,3	6,5	7,7	0,22	97,8
Оссора	3204	–0,1	10,4	13,3	0,24	94,8
Корф (Тиличики)	5871	0,0	8,1	10,5	0,28	93,9

*Примечание.*  $N$  – количество сравниваемых наблюдавшихся и прогнозируемых значений уровня моря (заблаговременность прогноза 24, 36, 48, 60, 72 ч);  $\hat{\delta}$  – средняя арифметическая (систематическая) ошибка прогноза;  $\delta$  – средняя абсолютная ошибка прогноза;  $S$  – среднеквадратическая ошибка прогноза;  $\sigma_x$  – среднеквадратическое отклонение значений суммарного уровня моря по данным наблюдений;  $P$  – оправдываемость метода прогноза.





**Рис. 3.** Изменения суммарного уровня моря в береговых пунктах по данным наблюдений и результатам прогнозов во время штормовых нагонов, см  
**Fig. 3.** Observed and forecasted total sea level variations at the tide gauges during the surges, cm

Оправдываемость прогнозов суммарного уровня моря в целом уменьшается при увеличении заблаговременности прогноза, но эти изменения относительно невелики (табл. 3). Увеличение оправдываемости в Оссоре при заблаговременности прогноза 72 ч, очевидно, имеет случайный характер.

**Таблица 3.** Оправдываемость прогнозов суммарного уровня моря при различной заблаговременности прогноза, %

**Table 3.** Accuracy of the total sea level forecasts for various leading time, %

Пункт	Заблаговременность прогноза, ч				
	24	36	48	60	72
Никольское	98,4	98,3	97,8	97,7	97,1
Оссора	95,6	95,3	94,5	93,8	94,9
Корф (Тиличики)	94,0	94,0	94,1	94,0	93,4
Средняя	96,0	95,8	95,5	95,1	95,1

Оправдываемость прогнозов уменьшается с ноября по март (табл. 4). Вероятно, при активизации циклонической деятельности над Беринговым морем в этот период, атмосферная модель, прогностическая продукция которой используется для форсинга численной модели для расчета стонно-нагонных колебаний уровня моря, не всегда адекватно воспроизводит поля ветра и атмосферного давления над морем. Например, на это указывает факт низкой оправдываемости прогнозов суммарных уровней моря в относительно недалеко расположенных друг от друга пунктах Оссора и Корф (Тиличики) в марте 2021 г. (85,3 и 82,3 % соответственно).

**Таблица 4.** Оправдываемость прогнозов суммарного уровня моря по месяцам, %

**Table 4.** Accuracy of the total sea level forecasts by months, %

Месяц	Пункт			Средняя
	Никольское	Оссора	Корф (Тиличики)	
Январь	96,2	91,6	95,7	94,5
Февраль	95,1	94,5	97,0	95,5
Март	96,5	85,3	82,3	88,0
Апрель	99,0	99,1	97,8	98,6
Май	100,0	97,9	88,0	95,3
Июнь	96,6	98,5	95,3	96,8
Июль	99,7	96,5	99,1	98,4
Август	99,9	100,0	99,7	99,8
Сентябрь	100,0	98,0	97,8	98,6
Октябрь	97,9	98,1	95,4	97,1
Ноябрь	97,5	91,7	87,7	92,3
Декабрь	94,8	91,9	89,2	92,0

В отдельные месяцы оправдываемость прогнозов суммарных уровней моря в Оссоре и Корфе (Тиличиках) может существенно отличаться (в мае 2021 г. – 97,9 и 84,3 % соответственно). Возможными причинами данной особенности могут быть локальные явления, которые не учитываются в разработанном методе прогноза (например, заторы льда, нарушающие водообмен между районом расположения АП службы цунами в Корфе (Тиличиках) и открытым морем), или погрешности в данных измерений АП, не выявленные при критическом контроле материалов наблюдений.

Высокая точность прогноза суммарных уровней моря в береговых пунктах во многом определяется надежностью расчета прилива (как указывалось ранее, для этого в методе прогноза используются гармонические постоянные одиннадцати основных волн, полученные заранее по данным наблюдений).

Поэтому отдельно оценивалось качество прогноза (расчета по численной модели) сгонно-нагонной (непериодической) составляющей уровня моря по прогнозируемым полям ветра и приземного атмосферного давления. Исходя из специфики наблюдений АП службы цунами, ежечасные значения непериодической составляющей уровня моря для каждой сгонно-нагонной ситуации вычислялись в виде разностей между суммарными (наблюдавшимися) уровнями и приливом, рассчитанным методом наименьших квадратов [15], а также средним уровнем моря. Для каждой ситуации обрабатывался ряд измерений продолжительностью 31 сутки, центральная дата которого соответствовала времени формирования максимума нагона (сгона). Принятая длительность исходных рядов, при соблюдении критерия Релея, позволяет учесть при расчете приливной составляющей суммарного уровня моря 31 волну прилива [15].

Анализировались только ситуации, во время которых максимальная величина нагонов и сгонов была больше 30 см. Статистические характеристики качества расчетов вычислялись для периодов, когда значения непериодической составляющей уровня моря, полученные по данным наблюдений, по абсолютной величине превышали 25 см. На основании рассмотренной ранее методики определения величины допустимой ошибки прогноза, ее значение принималось равным: для нагонов в Никольском – 15 см, в Оссоре и Корфе (Тиличиках) – 19 см; для сгонов в Никольском – 15 см, в Оссоре и Корфе (Тиличиках) – 17 см.

Небольшое количество сгонов и нагонов в юго-западной части Берингова моря в 2020–2021 гг. не позволяет объективно рассмотреть изменения характеристик точности прогнозов сгонно-нагонных уровней моря в зависимости от заблаговременности прогноза. Поэтому при расчете этих характеристик каждое ежечасное значение непериодической составляющей уровня моря, полученное по данным наблюдений, сравнивалось с соответствующими ему несколькими (от одного до пяти) уровнями, прогнозируемыми с различной заблаговременностью.

Установлено, что точность прогноза нагонов и сгонов с помощью разработанного метода удовлетворяет требованиям руководящих документов Росгидромета [11, 12] (табл. 5).

**Таблица 5.** Оценки точности прогноза нагонов и сгонов  
**Table 5.** Accuracy of surge forecasts

Пункт	Количество нагонов (сгонов)	$N$	$\hat{\delta}$ , см	$\delta$ , см	$S$ , см	$S/\sigma_x$	$P$ , %
Нагоны							
Никольское	7	384	-2,2	6,0	7,7	0,25	94,0
Оссора	7	938	-13,6	14,5	17,3	0,48	69,4
Корф (Тиличики)	9	788	-5,1	13,9	15,3	0,46	83,0
Сгоны							
Никольское	1	37	9,4	9,4	9,5	0,34	100,0
Оссора	3	284	9,9	10,6	12,0	0,37	89,8
Корф (Тиличики)	2	252	9,7	10,1	12,8	0,40	73,8

*Примечание.*  $N$  – количество сравниваемых значений уровня моря;

$\hat{\delta}$  – средняя арифметическая (систематическая) ошибка прогноза;

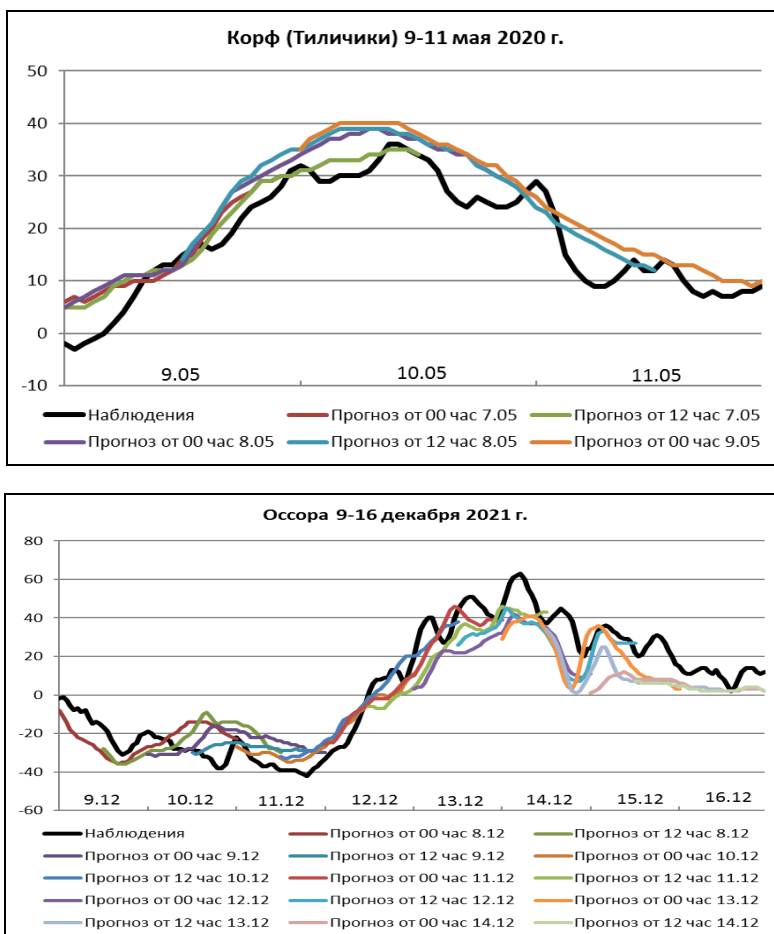
$\delta$  – средняя абсолютная ошибка прогноза;  $S$  – среднеквадратическая ошибка прогноза;  $\sigma_x$  – среднеквадратическое отклонение значений нагонов (сгонов) по данным наблюдений;  $P$  – оправдываемость метода прогноза.

Для нагонов оправдываемость прогнозов непериодической составляющей уровня моря составляет больше 69 процентов, отношение  $S/\sigma_x$  не превышает 0,48, средняя абсолютная ошибка прогноза находится в диапазоне 6,0–14,5 см, среднеквадратическая ошибка прогноза – в интервале от 7,7 до 17,3 см (табл. 5).

Для сгонов оправдываемость прогнозов непериодической составляющей уровня моря превосходит 73 %, средняя абсолютная ошибка прогноза не превышает 10,6 см, среднеквадратическая ошибка прогноза – 12,8 см, отношение  $S/\sigma_x$  – 0,40.

Наиболее высокую точность прогнозы нагонов и сгонов имеют в Никольском. Это объясняется небольшой шириной и приглубостью шельфа вблизи о. Беринга, в результате чего вариации приземного атмосферного давления, прогнозируемые с помощью атмосферной модели достаточно качественно, оказывают доминирующее влияние на процессы формирования сгонно-нагонных колебаний уровня моря в данном районе (табл. 5).

Рассчитанные прогнозы вполне удовлетворительно воспроизводят изменения сгонно-нагонной составляющей суммарного уровня моря во времени (рис. 4).

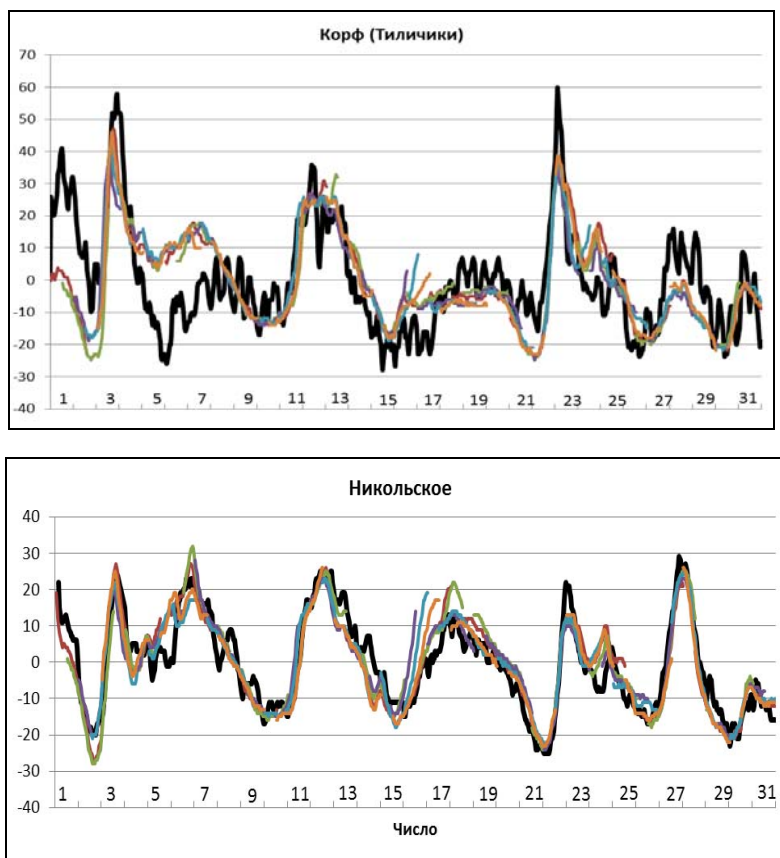


**Рис. 4.** Сгонно-нагонные колебания уровня моря в береговых пунктах по данным наблюдений и результатам прогнозов, см.

**Fig. 4.** Observed and forecasted surges at the tide gauges, cm.

Тем не менее следует отметить, что средняя арифметическая (систематическая) ошибка прогноза значений непериодической составляющей уровня моря во время нагонов во всех пунктах отрицательна, а во время сгонов – положительна (см. табл. 5). Это указывает на то, что применяемая в рамках разработанного метода прогноза численная модель несколько занижает величину сгонно-нагонных колебаний уровня моря. Очевидно, это является следствием недостаточно подробного учета морфометрии моделируемого объекта, имеющей очень сложный характер. Следовательно, усовершенствование разработанного метода прогноза в первую очередь должно предусматривать детализацию сетки модели в прибрежных районах.

Для исследования причин не оправдавшихся прогнозов уровня моря, рассмотрим изменения сгонно-нагонной составляющей суммарного уровня моря по данным наблюдений и результатам прогнозов в марте 2021 г. – в месяце, когда оправдываемость рассчитанных прогнозов была самой низкой в течение рассматриваемого интервала времени (рис. 5).



**Рис. 5.** Сгонно-нагонные колебания уровня моря в береговых пунктах по данным наблюдений (черные сплошные линии) и результатам прогнозов (цветные линии) в марте 2021 г., см.

**Fig. 5.** Observed (solid black lines) and forecasted (colored lines) surges at the tide gauges in March 2021, cm.

Очевидно, что основной причиной ухудшения качества прогнозов уровня моря в отдельные периоды является недостаточно высокая точность прогностических полей ветра и атмосферного давления, рассчитанных по атмосферной модели. Об этом наглядно свидетельствует низкая точность прогноза уровня моря 1–2 марта в Корфе (Тиличихах) и 16–17 марта в Корфе (Тиличихах) и Никольском (рис. 5).

Не исключено, что заметное различие между наблюдавшимися и прогнозируемыми уровнями моря в Корфе (Тиличиках) 5–8 марта может быть следствием возникновения ледовой пробки в проливе, соединяющем бухту Скрытную, где установлен АП службы цунами, и открытым морем.

### Заключение

Метод краткосрочного (с заблаговременностью 72 часа) прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря, разработанный в ФГБУ «ДВНИГМИ», обеспечивает качество прогнозов с точностью, соответствующей требованиям руководящих документов Росгидромета. Следовательно, данный метод может быть использован для выпуска оперативных прогнозов изменений уровня моря, включая сгонно-нагонные явления, в пределах рассматриваемого объекта.

При доработке метода (детализации сетки численной модели для расчета сгонно-нагонных колебаний уровня моря в отдельных районах, оптимизации информации о состоянии ледяного покрова, учете стока крупных рек) в рамках его структуры можно предусмотреть выпуск краткосрочных прогнозов уровня моря для побережья Чукотского моря и северо-западной части Берингова моря.

Технологическая линия метода прогноза работает устойчиво, процессы сбора исходной информации, выполнения расчетов, формирования результатов прогнозов и отправки их в ФГБУ «Камчатское УГМС» реализуются в автоматическом режиме.

Разработанный метод прогноза будет использоваться в качестве элемента системы прогноза возможности возникновения опасных явлений, во время которых затопливаются населенные пункты, береговые сооружения и объекты на российском побережье Берингова моря.

Для повышения точности прогнозов по разработанному методу необходимо детализировать сетку численной модели, применяемой для расчета изменений уровня моря, в прибрежной зоне юго-западной части Берингова моря, разработать алгоритмы и технологии учета локальных явлений, которые могут возникать в отдельных районах (например, ледовые заторы в проливах, соединяющих заливы и бухты с открытым морем).

В перспективе представляется необходимым использование в методе прогноза уровня Берингова моря трехмерной бароклинной численной модели, позволяющей более корректно воспроизводить динамику вод в пределах рассматриваемого объекта.

### Список литературы

1. *Абузаров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С.* Оперативное океанографическое обслуживание. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. 287 с.
2. *Ашик И.М.* Численный гидродинамический метод прогноза колебаний уровня в юго-восточной части Баренцева и юго-западной части Карского моря // Результаты испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических прогнозов. 2005. Информационный сборник № 31. С. 85-103.

3. *Вербицкая Е.М., Романский С.О.* Конфигурация модели WRF-ARW для прогноза погоды в Дальневосточном регионе // 65 лет ДВНИГМИ. Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 172-203.

4. *Думанская И.О., Зеленко А.А., Мысленков С.А., Нестеров Е.С., Попов С.К., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С.* Морские гидрологические прогнозы и оперативная океанология в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 149-183.

5. *Любицкий Ю.В., Манько А.Н., Соколов О.В.* Перспективы использования данных измерений автоматизированных постов службы цунами для формирования многолетних массивов наблюдений над уровнем моря // 65 лет ДВНИГМИ. Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 8-32.

6. *Любицкий Ю.В.* Метод краткосрочного прогноза уровня моря на побережье и акватории Охотского и Японского морей и на восточном побережье полуострова Камчатка // Труды ДВНИГМИ. 2017. Вып. 155. С. 32-68.

7. *Любицкий Ю.В.* Численное моделирование приливов Берингова моря // Материалы докладов XII Всероссийского симпозиума «Физика геосфер», 6-10 сентября 2021 г., Владивосток. 2021. С. 239-241.

8. *Попов С.К., Лобов А.Л.* Гидродинамическое моделирование наводнений в Санкт-Петербурге с учётом работающей дамбы // Метеорология и гидрология. 2017. № 4. С. 80-89.

9. *Попов С.К., Лобов А.Л.* Диагноз и прогноз уровня Каспийского моря по оперативной гидродинамической модели // Метеорология и гидрология. 2017. № 9. С. 90-99.

10. *Попов С.К., Лобов А.Л.* Краткосрочные прогнозы колебаний уровня Азовского моря в безледный период 2017 года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3 (369). С. 104-118.

11. РД 52.27.284-91. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических прогнозов: Методические указания. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 150 с.

12. РД 52.27.759-2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. М.: ТРИАДА-ЛТД, 2011. 195 с.

13. *Bernier N.B., Thompson K.R.* Deterministic and ensemble storm surge prediction for Atlantic Canada with lead times of hours to ten days // *Ocean Modelling*. 2015. Vol. 86. P. 114-127.

14. *Egbert G.D., Erofeeva S.Y.* Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // *J. Atm. Ocean. Tech.* 2002. Vol. 19, no. 2. P. 183-204.

15. *Foreman M.G.G.* Manual for tidal heights analysis and prediction // *Pacific Marine Science Report 77-10*, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Victoria, B.C. 2004. 58 p.

16. *Glahn B., Taylor A., Kurkowski N., Shaffer W.* The role of the SLOSH model in National Weather Service storm surge forecasting // *Nat. Weath. Dig.* 2009. Vol. 33, no. 1. P. 3-14.

17. *Skamarock W. C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X., Wang W., Powers J.G.* A description of the advanced research WRF version 3 (No. NCAR/TN-475+STR). University Corporation for atmospheric research. 2008. 125 p.



## References

1. *Abuzyarov Z.K., Dumanskaya I.O., Nesterov E.S.* Operativnoe okeanograficheskoe obsluzhivanie. Moscow, Obninsk, IG-SOCIN publ., 2009, 287 p. [in Russ.].
2. *Ashik I.M.* Chislennyj gidrodinamicheskij metod prognoza kolebanij urovnja v jugo-vostochnoj chasti Barenceva i jugo-zapadnoj chasti Karskogo morja [Numerical hydrodynamic method for forecasting level fluctuations in the south-eastern part of the Barents Sea and south-western part of the Kara Sea]. *Rezul'taty ispytaniya novyh i usovershenstvovannyh metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. Informacionnyi sbornik*, 2005, vol. 31, pp. 85-103 [in Russ.].
3. *Verbitskaya E.M., Romanskiy S.O.* Konfiguracija modeli WRF-ARW dlja prognoza pogody v Dal'nevostochnom regione [Configuration of the WRF-ARW model for weather forecasting in the Far East region]. *65 let DVNIGMI*. Vladivostok, Dalnauka publ., 2015, pp. 172-203 [in Russ.].
4. *Dumanskaya I.O., Zelen'ko A.A., Myslenkov S.A., Nesterov E.S., Popov S.K., Resnyanskiy Y.D., Strukov B.S.* Morskie gidrologicheskie prognozy i operativnaja okeanologija v Hidrometcentre Rossii [Marine hydrological forecasts and operational oceanology at the Hydrometeorological Center of Russia]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 374, no. 4, pp. 149-183 [in Russ.].
5. *Lyubitskiy Yu.V., Man'ko A.N., Sokolov O.V.* Perspektivy ispol'zovaniya dannyh izmerenij avtomatizirovannyh postov sluzhby cunami dlja formirovaniya mnogoletnih massivov nabljudenij nad urovнем morja [Perspectives for the use of measurement data from automated tsunami posts for the formation of long-term arrays of observations above sea level]. *65 let DVNIGMI*. Vladivostok, Dalnauka publ., 2015, pp. 8-32 [in Russ.].
6. *Lyubitskiy Yu.V.* Metod kratkosrochnogo prognoza urovnja morja na poberezh'e i akvatorii Ohotskogo i Japonskogo morej i na vostochnom poberezh'e poluostrova Kamchatka [Short-range sea level forecasting method for the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan, and at the Eastern coast of the Kamchatka Peninsula]. *Trudy DVNIGMI [Proceedings of Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute]*, 2017, vol. 155, pp. 32-68 [in Russ.].
7. *Lyubitskiy Yu.V.* Chislennoe modelirovanie prilivov Beringova morja [Numerical simulation of the Bering Sea tides]. *Proc. 12th All-Russia Symp. "Physics of Geospheres"*. Vladivostok, 2021, pp. 239-241 [in Russ.].
8. *Popov S.K., Lobov A.L.* Hydrodynamic modeling of floods in Saint Petersburg considering the operating dam. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 4, pp. 267-274 [in Russ.]. DOI: 10.3103/S1068373917040070.
9. *Popov S.K., Lobov A.L.* Diagnosis and forecast of the Caspian Sea level with the operational hydrodynamic model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 9, pp. 607-614 [in Russ.]. DOI: 10.3103/S1068373917090084.
10. *Popov S.K., Lobov A.L.* Short-term forecasts of sea level fluctuations in the Sea of Azov in the ice-free period of 2017. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*. 2018. vol. 369, no. 3, pp. 104-118 [in Russ.].
11. RD 52.27.284-91. Metodicheskie ukazaniya. Provedenie proizvodstvennyh (operativnyh) ispytanij novyh i usovershenstvovannyh metodov gidrometeorologicheskikh i geliograficheskikh prognozov [Methodical instructions. Conducting production (operational) tests of new and improved methods of hydrometeorological and heli-

ogeophysical forecasts]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 1991, 150 p. [in Russ.].

12. RD 52.27.759-2011. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Chast' III. Sluzhba morskikh gidrologicheskikh prognozov [Manual for the forecasting service. Section 3. Part III. Marine Hydrological Forecasting Service]. Moscow, TRIADA-LTD publ., 2011, 195 p. [in Russ.].

13. Bernier N.B., Thompson K.R. Deterministic and ensemble storm surge prediction for Atlantic Canada with lead times of hours to ten days. *Ocean Modelling*, 2015, vol. 86, pp. 114-127.

14. Egbert G.D., Erofeeva S.Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *J. Atm. Ocean. Tech.*, 2002, vol. 19, no 2, pp. 183-204.

15. Foreman M.G.G. Manual for tidal heights analysis and prediction. Pacific Marine Science Report 77-10, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Victoria, B.C. 2004, 58 p.

16. Glahn B., Taylor A., Kurkowski N., Shaffer W. The role of the SLOSH model in National Weather Service storm surge forecasting. *Nat. Weath. Dig.*, 2009, vol. 33, no 1, pp. 3-14.

17. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X., Wang W., Powers J.G. A description of the advanced research WRF version 3 (No. NCAR/TN-475+STR). University Corporation for atmospheric research. 2008. 125 p.

*Поступила 02.03.2022; одобрена после рецензирования 17.03.2022;  
принята в печать 30.03.2022.*

*Submitted 02.03.2022; approved after reviewing 17.03.2022;  
accepted for publication 30.03.2022.*