

*Ю.В. Любицкий¹, Л.П. Кравчук², О.И. Забродина²,
А.М. Онищук³, Н.Ф. Ефремова⁴, Г.А. Брынцева⁴,
М.Е. Колесникова⁵, М.Е. Кузнецов⁵, Н.В. Рабкевич⁶, Т.П. Щербинина⁶*

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МЕТОДА КРАТКОСРОЧНОГО
(С ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ 72 ЧАСА) ПРОГНОЗА ИЗМЕНЕНИЙ
УРОВНЯ МОРЯ НА ПОБЕРЕЖЬЕ ОХОТСКОГО МОРЯ, СЕВЕРНОЙ
ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ, ВОСТОЧНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ
ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА**

¹ *Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт, г. Владивосток;*

² *Камчатское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей
среды, г. Петропавловск-Камчатский;*

³ *Колымское управление по гидрометеорологии и мониторингу
окружающей среды, г. Магадан;*

⁴ *Дальневосточное управление по гидрометеорологии и мониторингу
окружающей среды, г. Хабаровск;*

⁵ *Сахалинское управление по гидрометеорологии и мониторингу
окружающей среды, г. Южно-Сахалинск;*

⁶ *Приморское управление по гидрометеорологии и мониторингу
окружающей среды, г. Владивосток*

- 60 -

Введение

Задача краткосрочного прогноза изменений уровня моря (в особенности в ситуациях, когда могут возникнуть опасные природные явления – штормовые нагоны или сгоны) является весьма актуальной.

Метод краткосрочного прогноза изменений уровня моря на побережье Охотского моря, северной части Японского моря, восточном побережье полуострова Камчатка разработан в ФГБУ «ДВНИГМИ». С июля 2017 г. по сентябрь 2018 года включительно оперативные испытания метода прогноза проводились в ФГБУ «Камчатское УГМС», «Колымское УГМС», «Дальневосточное УГМС», «Сахалинское УГМС» и «Приморское УГМС».

Метод предусматривает расчет ожидаемых изменений суммарного уровня моря, включающего приливную, непериодическую и фоновую составляющие. Прогнозируемые значения уровня моря для береговых пунктов, для которых имеются многолетние ряды

наблюдений, приводятся к принятым нулям постов, что позволяет оценивать возможность превышения уровнем моря критических отметок.

Разработанный метод прогноза существенно отличается от метода прогноза изменений суммарного уровня моря на побережье Охотского моря, Татарского пролива, тихоокеанском побережье Курильских островов и полуострова Камчатка, который использовался в оперативной работе дальневосточных УГМС Росгидромета с июня 2014 г. по апрель 2019 года включительно [6]:

1. Увеличена заблаговременность прогнозов (с 48 до 72 часов).
2. Для более корректного учета влияния ледяного покрова на изменения уровня моря реализована численная модель совместной динамики воды и льда.
3. Расширена область расчетов, что позволяет выпускать прогнозы для пунктов, расположенных на северо-западном побережье Японского моря (зона ответственности ФГБУ «Приморское УГМС»).
4. Уменьшен пространственный шаг сетки численной модели для расчета непериодической составляющей суммарного уровня моря (с 10 до 7,5 км). В отдельных районах (шельф северо-западной части Охотского моря и восточного побережья о. Сахалин, Сахалинский залив, Амурский лиман, северная часть Татарского пролива) предусмотрена детализация сетки (шаг 2,5 км).
5. Использована прогностическая продукция более совершенной численной региональной атмосферной модели WRF-ARW [2]. При этом уменьшены пространственный (с 50 до 15 км) и временной (с 6 до 1 ч) шаги, с которыми в расчетную схему вводятся значения метеорологических характеристик (поля приземного атмосферного давления и ветра).
6. Применена другая концепция формирования начальных условий – в рамках очередного сеанса прогноза используются поля уровня моря и течений, рассчитанные в предыдущих сеансах.
7. Предусмотрен учет стока Амура.
8. Разработан комплекс процедур, обеспечивающий работу технологической линии метода прогноза в автоматическом режиме.
9. В соответствии с пожеланиями дальневосточных УГМС уточнен и расширен список береговых пунктов, для которых выпускается прогноз.

Основные характеристики метода прогноза

Пространственно-временные изменения непериодической составляющей суммарного уровня моря в пределах всего объекта вычисляются с помощью двумерной нелинейной численной модели совместной динамики воды и льда [1].

Численное моделирование, в отличие от физико-статистических методов, позволяет рассчитывать прогноз даже для тех пунктов, в которых не производились наблюдения над уровнем моря. Отметим, что гидродинамическое моделирование успешно и эффективно используется во многих методах краткосрочного прогноза колебаний уровня моря [1, 3, 7].

Приливная составляющая суммарного уровня моря рассчитывается только для береговых пунктов по гармоническим постоянным 11 основных волн прилива. Изменения фонового (среднего) уровня моря вычисляются непосредственно в рамках численной модели.

Прогноз рассчитывается на кластере CRAY XC-40 ФГБУ «Дальневосточное УГМС» два раза в сутки (в сроки от 00 и 12 ч ВСВ).

Технологическая линия метода прогноза работает в автоматическом режиме. Информация о распределении ледяного покрова на акватории дальневосточных морей ежедневно считывается в Интернете с сайта Японского метеорологического агентства (JMA) (http://ds.data.jma.go.jp/gmd/goos/data/rtrdb/jma-pro/seaice_reg.html).

- 62 -

Для расчета величины стока Амура используются оперативные сведения об уровне воды и ледовых явлениях в с. Богородское (замыкающий створ реки), поступающие в ФГБУ «Дальневосточное УГМС» по каналам связи.

Прогноз уровня моря выпускается для 54 пунктов (рис. 1), перечень которых определен потребителями прогностической продукции: ФГБУ «Камчатское УГМС», «Колымское УГМС», «Дальневосточное УГМС», «Сахалинское УГМС», «Приморское УГМС». В рамках каждого сеанса прогноза для всех управлений формируются текстовые файлы с информацией об ожидаемых ежечасных значениях суммарного уровня моря и его сгонно-нагонной и приливной составляющих в пунктах, расположенных в зоне деятельности данного УГМС. Эти текстовые файлы в автоматическом режиме передаются в УГМС по электронной почте.

Результаты прогнозов также публикуются в Интернете в графическом виде на сайте ФГБУ «ДВНИГМИ» (<http://ferhri.org/prognozy/prognoz-urovnya-morya-v-punktakh.html>).

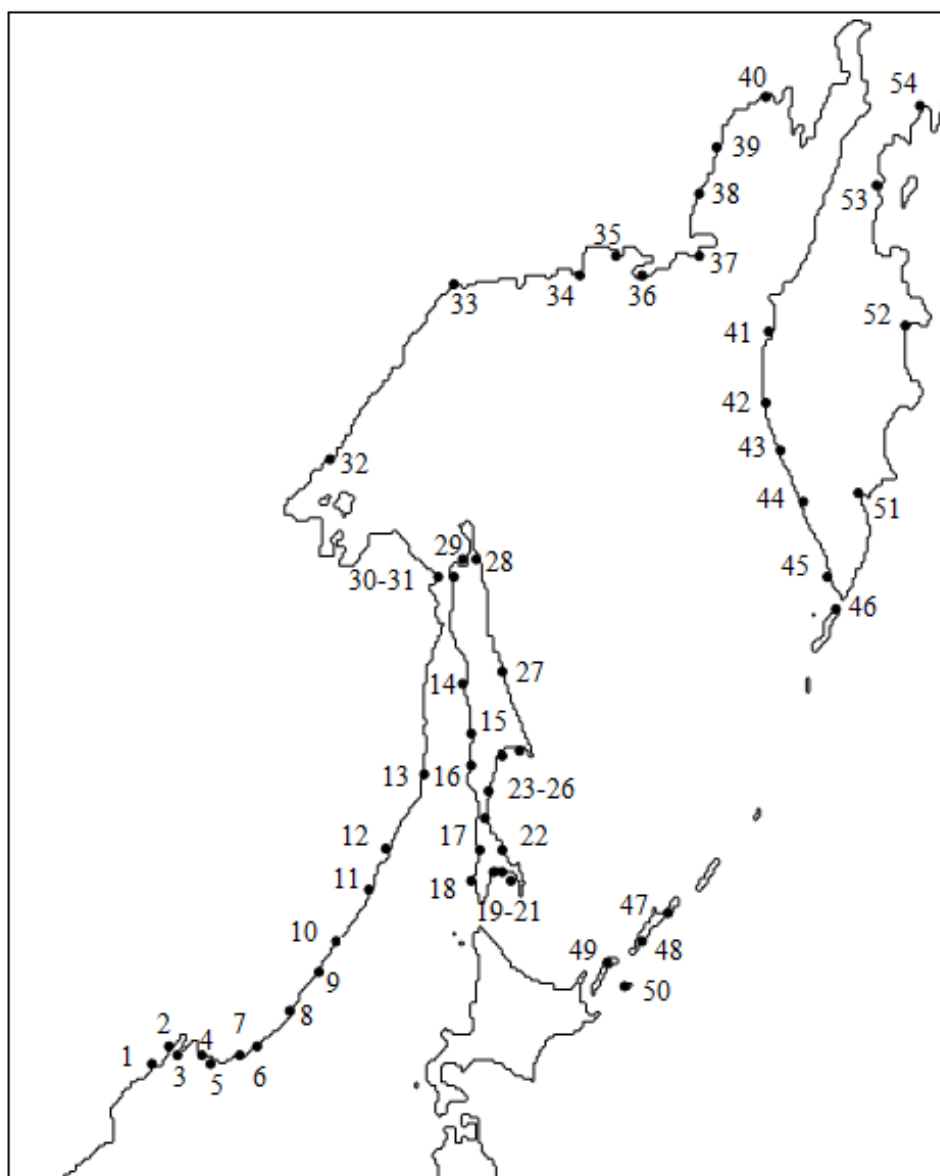


Рис. 1. Схема расположения пунктов, для которых выпускается прогноз уровня моря.

1 – Посьет, 2 – Славянка, 3 – Вле — осток, 4 – Находка, 5 – Козьино, 6 – Преображение, 7 – Валентин, 8 – б. Ольги, 9 – Рудная Пристань, 10 – Пластун, 11 – Сосуново, 12 – Адими, 13 – Советская Гавань, 14 – Александровск-Сахалинский, 15 – Пильво, 16 – Углегорск, 17 – Холмск, 18 – Невельск, 19 – Корсаков, 20 – Пригородное, 21 – Новиково, 22 – Стародубское, 23 – Взморье, 24 – Макаров, 25 – Поронайск, 26 – Владимирово, 27 – Комрво, 28 – Одопту, 29 – Москальво, 30 – Рыбновск, 31 – о. Байдукова, 32 – Аян, 33 – Охотск, 34 – о. Спафарьева, 35 – б. Нагаева, 36 – м. Алевина, 37 – м. Братьев, 38 – Брохово, 39 – зал. Шелихова, 40 – Северо-Эвенск, 41 – Усть-Хайрюзово, 42 – Ича, 43 – Устьевое, 44 – Октябрьский, 45 – Озерновский, 46 – Северо-Курильск, 47 – Курильск, 48 – Буревестник, 49 – Южно-Курильск, 50 – Малокурильское, 51 – Петропавловск-Камчатский, 52 – Усть-Камчатск, 53 – Оссора, 54 – Корф (Тилички).

**Материалы наблюдений над уровнем моря, использованные
для оценки качества прогнозов**

Качество прогнозов оценивалось по данным наблюдений в 18 береговых пунктах, измерения уровня моря в которых выполнялись с помощью различных технологий (табл. 1). Материалы наблюдений прошли детальный критический контроль, данные, поступающие с автоматизированных постов (АП) службы цунами, были обработаны с помощью методов, рассмотренных в [5].

Таблица 1

**Сведения о наблюдениях над уровнем моря, использованных
для оценки качества прогнозов**

Пункт	Метод наблюдений		
	СУМ	АП	Водомерные рейки
Посьет	07.2017 – 10.2017	11.2017 – 09.2018	–
Владивосток	–	07.2017 – 09.2018	–
Находка	–	07.2017 – 09.2018	–
Преображение	–	07.2017 – 09.2018	–
Рудная Пристань	–	07.2017 – 09.2018	–
Сосуново	–	07.2017 – 05.09.2018; 16.2018 – 31.09.2018	–
Советская Гавань	–	10.2017 – 30.09.2018	–
Углегорск	07.2017 – 09.2018	–	–
Холмск	–	–	–
Корсаков	–	07.2017 – 09.2018	–
Стародубское	07.2017 – 11.2017; 03, 04, 06 – 09.2018	12.2017.	–
о. Байдукова	–	–	07.2017 – 10.2017; 22.12.2017 – 15.05.2018; 17.06.2018 – 31.08.2018
Аян	–	–	07.2017 – 28.09.2017; 06.2018 – 16.09.2018
б. Нагаева	07.2017 – 09.2018	–	–
Курильск	07.2017 – 09.2018	–	–
Малокурильское	10.2017 – 09.2018	–	–
Петропавловск-Камчатский	07.2017 – 09.2018	–	–
Корф (Тиличики)	–	07.2017 – 12.2017; 15.01.2017 – 07.2018	–

Примечание. СУМ – поплавковый самописец уровня моря, АП – гидростатический автоматизированный пост службы цунами. В таблице не указаны пропуски в наблюдениях продолжительностью менее трех дней.

Оценка качества прогноза суммарного уровня моря

Качество прогнозов оценивалось с помощью критериев, установленных действующими нормативными документами Росгидромета [8, 9].

Для пунктов Посыет и Стародубское (для периодов времени действия СУМ), Углегорск, Холмск, о. Байдукова, Аян, б. Нагаева, Малокурильское и Петропавловск-Камчатский прогнозируемые значения уровня моря сравнивались с наблюдаемыми уровнями, приведенными к условным нулям постов этих пунктов. Следовательно, полученные ошибки прогноза включают не только погрешности расчета приливной и непериодической составляющих суммарного уровня моря, но и фонового (среднего) уровня.

Наблюдения над уровнем моря АП службы цунами не приводятся к нулям постов. Поэтому для пунктов Владивосток, Находка, Преображение, Рудная Пристань, Сосуново, Советская Гавань, Корсаков и Корф, а также Посыет и Стародубское, когда измерения уровня моря выполнялись с помощью АП, точность прогнозов оценивалась относительно средних месячных значений уровня моря, полученных по наблюдениям. При этом средние месячные характеристики уровня моря рассчитывались только по данным за сутки, в которых не было пропусков в наблюдениях.

Аналогичный подход применялся также для Курильска, так как разработанный метод прогноза не предусматривает представление рассчитываемых значений суммарного уровня моря относительно нуля поста данного пункта. Это вызвано тем, что СУМ в Курильске был восстановлен после многолетнего перерыва в наблюдениях только в июне 2017 года.

Действующее Наставление по службе морских гидрологических прогнозов [9] предписывает применять для оценки эффективности всех методов краткосрочных прогнозов морских гидрометеорологических явлений, повторяющихся систематически (в том числе и уровня моря), сравнение результатов прогнозов не с природной обеспеченностью, а с обеспеченностью инерционных прогнозов [9].

Данное положение, справедливое для неприливных морей, нельзя использовать для оценки качества прогноза суммарных уровней морей с приливами, в частности морей, омывающих побережье Дальнего Востока России, так как в интервал времени, соответствующий максимальной заблаговременности краткосрочного прогноза (72 часа), формируется несколько приливных циклов. Это приводит к искажению оценок точности рассчитанных прогнозов [4]. Поэтому качество прогнозов суммарных уровней моря за весь период наблюдений оценивалось с помощью общепринятых статистических критериев.

При оценке точности прогнозов уровня приливных морей возникает проблема корректного определения величины допустимой ошибки прогноза $\delta_{доп}$, которая обычно рассчитывается по формуле $\delta_{доп} = \pm 0,674 \sigma_x$, где σ_x – среднеквадратическая изменчивость прогнозируемой величины, рассчитанная по данным наблюдений.

Для пунктов с большими приливами (например, Аян и б. Нагаева) значение $0,674 \sigma_x$ имеет очень большую величину – 59 и 69 см соответственно. Очевидно, что точность прогнозов с такой погрешностью неприемлема для решения прикладных задач, например обслуживания судоходства. Поэтому для Аяна и б. Нагаева величина допустимой ошибки принята равной 25 см (табл. 2).

Таблица 2

Характеристики качества прогнозов суммарного уровня моря

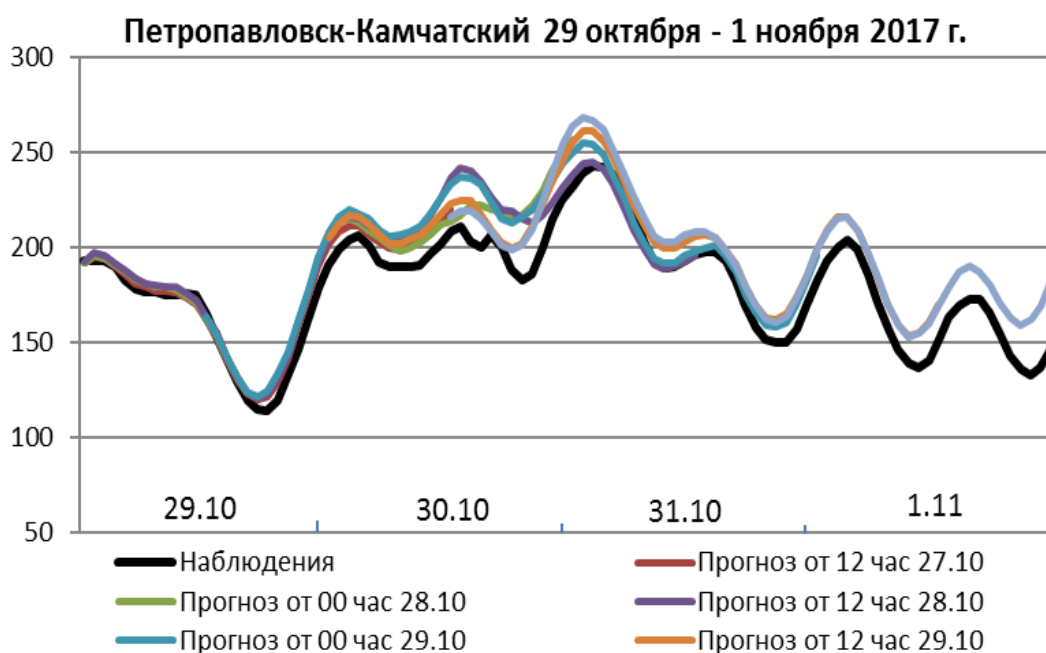
Пункт	ДО, см	N	$\hat{\delta}$, см	δ , см	S, см	S / σ_x	P, %
Посьет	12	5376	-0,2	4,6	5,8	0,34	96,2
Владивосток	12	5376	-0,8	4,6	5,9	0,39	95,5
Находка	12	5358	-0,6	4,7	5,9	0,42	96,7
Преображение	12	5358	0,0	4,1	5,3	0,42	97,2
Рудная Пристань	12	5376	0,0	4,3	5,5	0,37	96,4
Сосуново	15	5256	-0,4	4,9	7,0	0,56	97,6
Советская Гавань	15	4200	0,7	5,8	7,3	0,39	96,0
Углегорск	16	5376	8,1	9,1	11,2	0,48	87,5
Холмск	15	5376	10,7	11,0	12,8	0,87	78,1
Корсаков	19	4779	0,5	6,5	8,9	0,32	95,9
Стародубское	20	4092	1,8	6,2	8,4	0,28	97,1
о. Байдукова	30	3803	3,0	14,9	19,0	0,37	89,3
Аян	25	2322	8,1	11,0	14,3	0,16	92,5
б. Нагаева	25	5376	16,9	18,4	21,8	0,21	78,1
Курильск	18	5358	0,4	5,5	6,9	0,25	98,9
Малокурильское	20	4308	2,5	6,0	7,4	0,25	99,4
Петропавловск-Камчатский	20	5376	8,4	10,0	12,9	0,30	94,0
Корф (Тиличики)	25	5148	0,3	6,0	8,1	0,18	98,5

Примечание. ДО – допустимая ошибка прогноза; N – количество сравниваемых наблюдавшихся и прогнозируемых значений уровней моря; $\hat{\delta}$ – средняя арифметическая (систематическая) ошибка прогноза; δ – средняя абсолютная ошибка прогноза; S – средняя квадратическая ошибка прогноза; σ_x – среднее квадратическое отклонение значений суммарного уровня моря по данным наблюдений; P – оправдываемость метода прогноза.

На о. Байдукова, где наблюдения над уровнем моря выполняются по водомерным рейкам, при значительном ветровом волнении измерения имеют недостаточно высокую точность. Поэтому для данного пункта величина допустимой ошибки прогнозов уменьшена только до 30 см. Для всех остальных пунктов (табл. 2) величина допустимой ошибки прогнозов рассчитана по формуле $\delta_{доп} = \pm 0,674\sigma_x$.

В рамках испытаний метода прогноза сравнивались величины наблюдаемого (суммарного) уровня моря и его прогнозируемые значения с заблаговременностью 12, 24, 36, 48, 60 и 72 ч. Оценка качества прогнозов производилась по двум градациям: «оправдался» или «не оправдался». Прогноз считался оправдавшимся, если его ошибка была меньше или равна допустимой ошибки $\delta_{доп}$.

Качество прогноза суммарных уровней моря в береговых пунктах в целом достаточно хорошее (табл. 2, рис. 2). Средняя оправдываемость прогнозов при принятых значениях допустимой ошибки выше 78 %, значение критерия S/σ_x для всех пунктов, исключая Холмск, меньше его порогового значения, равного 0,67 при количестве проверочных прогнозов большем или равном 25 [9] (табл. 2).



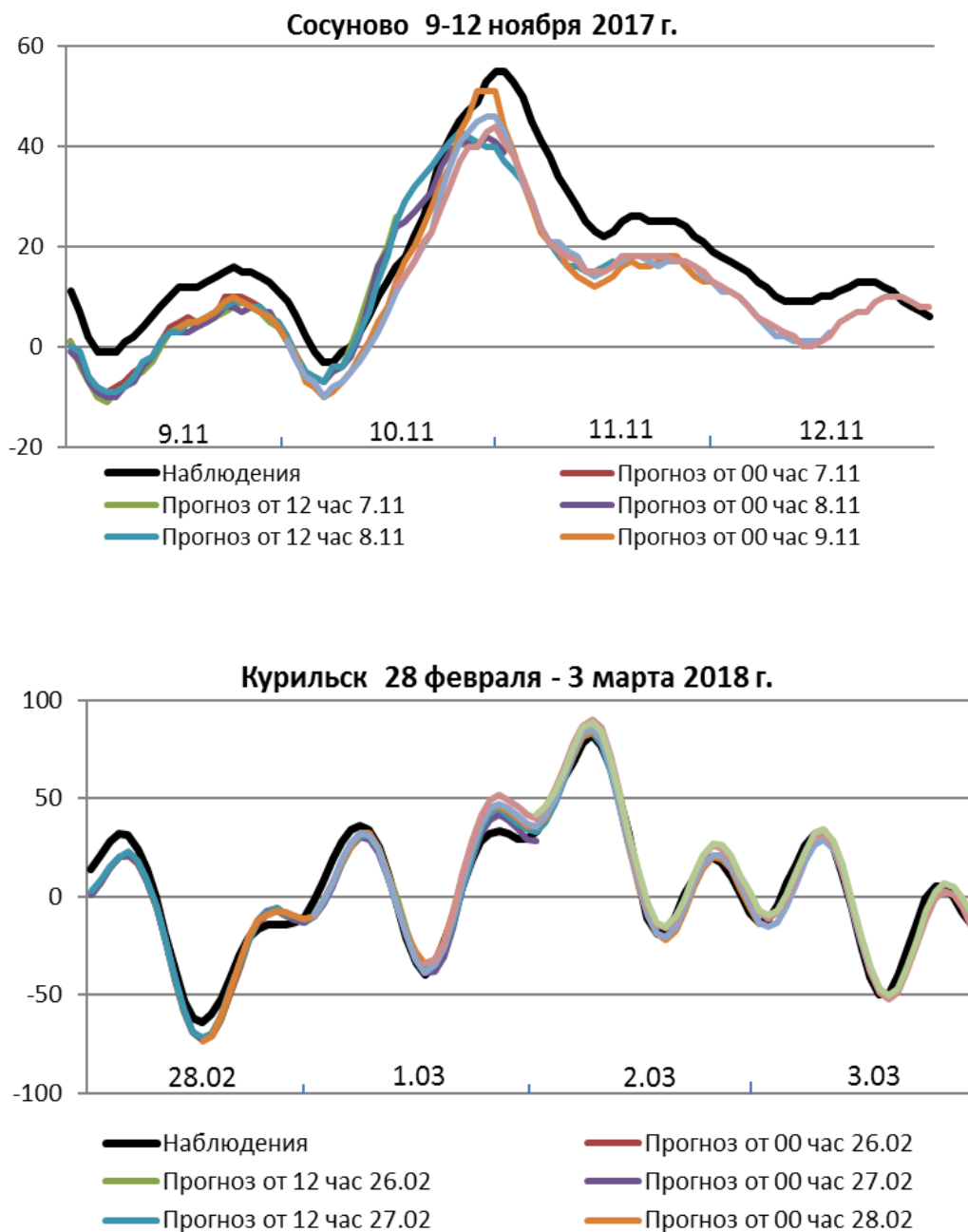


Рис. 2. Изменения суммарного уровня моря во время штормовых нагонов, см.

Оправдываемость прогнозов суммарного уровня моря при различной заблаговременности прогноза изменяется в относительно небольших пределах (табл. 3). Интересно, что для пунктов, расположенных на северо-западном побережье Японского моря (от Посыета до Рудной Пристани), оправдываемость имеет наибольшую величину при заблаговременности прогноза 36–48 часов. Для всех других районов максимальная оправдываемость прогнозов соответствует заблаговременности 12–24 часа (табл. 3).

**Оправдываемость прогнозов суммарного уровня моря, рассчитанных в рамках разработанного
и используемого в оперативной работе методов прогноза, проценты**

Пункт	Метод	N	Заблаговременность прогноза, ч						Средняя
			12	24	36	48	60	72	
Посъет	PM	896	95,7	96,5	96,8	96,9	96,1	95,4	96,2
Владивосток	PM	896	95,8	95,9	96,3	95,8	94,9	94,4	95,5
Находка	PM	893	96,1	96,8	97,3	97,2	96,6	96,1	96,7
Преображение	PM	893	97,1	97,1	97,9	97,5	97,3	96,5	97,2
Рудная Пристань	PM	896	96,4	96,8	96,9	96,9	96,1	95,5	96,4
Сосуново	PM	876	98,1	98,2	97,8	97,9	97,1	96,5	97,6
Советская Гавань	PM	700	98,3	97,6	96,4	95,7	94,9	93,4	96,0
Углегорск	PM	896	92,5	91,2	89,3	86,8	84,0	81,4	87,5
	OM	578	67,7	80,0	87,7	90,2	–	–	81,4
Холмск	PM	896	81,6	80,2	78,1	78,2	76,5	73,7	78,1
	OM	578	90,6	90,5	87,2	86,6	–	–	88,7
Корсаков	PM	796	95,5	96,9	96,5	96,5	95,6	94,5	95,9
Стародубское	PM	682	97,9	97,9	97,7	97,2	96,6	95,2	97,1
	OM	438	79,8	80,2	83,2	82,0	–	–	81,3
о.Байдукова	PM	634	91,5	91,6	91,0	89,7	86,6	85,6	89,3
	OM	406	77,2	77,7	79,1	78,1	–	–	78,0
Аян	PM	387	94,3	94,8	94,6	93,0	89,9	88,4	92,5
	OM	242	79,1	85,9	84,7	82,5	–	–	83,1
б.Нагаева	PM	896	85,2	81,7	78,2	76,2	74,6	73,0	78,1
	OM	578	82,7	79,5	79,4	79,4	–	–	80,3
Курильск	PM	893	99,9	99,9	99,6	99,2	98,3	96,6	98,9
Малокурильское	PM	718	100,0	100,0	99,9	99,6	98,7	98,3	99,4
Петропавловск-Камчатский	PM	896	95,6	95,7	94,2	93,9	93,2	91,3	94,0
Корф (Тиличики)	PM	858	98,8	98,8	98,6	98,5	98,0	98,1	98,5
	OM	556	77,3	75,9	76,4	77,5	–	–	76,8

Примечание. PM – разработанный метод прогноза; OM – метод прогноза, используемый в оперативной работе; N – количество сравниваемых значений для каждой заблаговременности. Оправдываемость прогнозов, выпущенных в рамках метода прогноза, используемого в оперативной работе, приводится только для пунктов, для которых значения суммарного уровня моря рассчитываются в одинаковых системах отсчета с разработанным методом прогноза.

Наименее высокая точность прогнозов суммарного уровня моря получена для пунктов Холмск, Углегорск и б. Нагаева (табл. 2, 3). Для Холмска качество прогнозов, рассчитанных с помощью разработанного метода, даже ниже, чем прогнозов, выпущенных в рамках метода, используемого в оперативной работе (табл. 3).

Причиной данной особенности являются значительные (иногда превышающие допустимую ошибку прогноза) погрешности прогноза среднего (фонового) уровня моря в перечисленных пунктах в отдельные месяцы. В методе прогноза, используемом в оперативной работе, в качестве среднего (фонового) уровня моря в береговых пунктах учитываются сведения о средних за многолетний период времени месячных уровнях моря, полученных по материалам наблюдений. В разработанном методе прогноза данная характеристика рассчитывается непосредственно в рамках численного моделирования, что позволяет, как было установлено экспериментально, лучше учитывать аномальные изменения среднего уровня моря. Тем не менее очевидно, что в некоторых исключительных ситуациях такой подход недостаточно эффективен.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости усовершенствования в разработанном методе прогноза методик и технологий прогноза/расчета среднего (фонового) уровня моря.

Оценка качества прогноза непериодической составляющей суммарного уровня моря

Для оперативных подразделений Росгидромета наибольший интерес представляют прогнозы изменений непериодической составляющей суммарного уровня моря во время значительных сгонно-нагонных явлений, когда уровень моря либо понижается ниже опасных отметок, при которых прекращается судоходство, гибнет рыба, повреждаются суда, либо поднимается выше опасных отметок, при которых затопляются населенные пункты, береговые сооружения и объекты.

Поэтому изначально планировалось оценить точность прогнозов только тех нагонов и сгонов, максимальная величина которых превышает некоторое пороговое значение (40 см для пунктов, расположенных на восточном побережье полуострова Камчатка и побережье Охотского моря; 30 см – на побережье Японского моря). Сведения о количестве штормовых нагонов, наблюдавшихся в рассматриваемых береговых пунктах во время испытаний метода прогноза, приводятся в табл. 4. Сгонов, удовлетворяющих указанным критериям, на побережье дальневосточных морей в период испытаний метода прогноза не было.

Характеристики качества прогнозов неперидической составляющей уровня моря во время штормовых нагонов

Пункт	N	K		$\hat{\delta}$, см		ε		δ , см		S, см		$\hat{\sigma}$, см		S / σ_x		P, %	
		PM	OM	PM	OM	PM	OM	PM	OM	PM	OM	PM	OM	PM	OM	PM	OM
Находка	2	179	–	-10,9	–	0,33	–	11,4	–	14,2	–	9,1	–	0,40	–	60,9	–
Преображение	3	227	–	-14,8	–	0,44	–	14,8	–	16,7	–	8,8	–	0,54	–	58,6	–
Рудная Пристань	3	279	–	-9,3	–	0,29	–	10,6	–	12,5	–	8,4	–	0,33	–	72,0	–
Сосуново	6	558	–	-6,4	–	0,18	–	8,1	–	11,0	–	8,9	–	0,24	–	86,6	–
Советская Гавань	2	61	43	-7,4	-2,8	0,30	0,27	10,6	9,0	11,7	10,8	9,0	10,4	0,33	0,32	85,2	81,4
Углегорск	2	191	117	6,2	-15,7	0,26	0,43	9,6	15,7	12,4	20,2	10,8	12,7	0,38	0,52	80,6	66,7
Холмск	3	178	97	9,8	-9,0	0,29	0,28	10,5	11,0	12,1	13,4	7,1	9,9	0,32	0,33	79,8	75,3
Стародубское	4	319	220	2,3	-6,8	0,17	0,27	8,7	11,4	10,6	14,5	10,4	12,8	0,26	0,35	95,0	83,2
о. Байдукова	6	172	123	-5,0	16,7	0,29	0,61	16,5	30,2	19,7	41,1	19,0	37,6	0,35	0,74	88,4	61,0
Аян	2	104	66	8,7	12,9	0,49	0,57	13,4	17,4	16,8	21,1	14,4	16,7	0,40	0,50	87,5	81,8
б. Нагаева	4	377	224	12,5	1,7	0,42	0,37	16,3	15,9	20,3	20,0	16,0	19,9	0,52	0,52	78,2	81,7
Курильск	3	312	201	-6,3	-18,9	0,22	0,45	9,9	20,0	12,7	23,0	11,0	13,1	0,35	0,50	82,1	44,8
Малокурильское	2	185	119	-0,6	-34,7	0,15	0,88	6,4	35,2	9,0	38,8	9,0	17,3	0,21	0,92	96,2	23,5
Петропавловск-Камчатский	3	412	283	3,0	-3,9	0,28	0,37	10,3	11,7	13,4	14,5	13,0	14,0	0,37	0,40	89,1	83,4
Корф (Тиличики)	2	229	162	5,9	4,5	0,43	0,60	7,4	9,0	8,8	10,6	6,5	9,6	0,28	0,33	100,0	98,8

Примечание. N – количество штормовых нагонов; K – число сравниваемых наблюдавшихся и прогнозируемых значений неперидической составляющей суммарного уровня моря; PM – разработанный метод прогноза; OM – метод прогноза, используемый в оперативной работе.

$\hat{\delta}$ – средняя арифметическая (систематическая) ошибка прогноза; ε – средняя относительная ошибка прогноза, δ – средняя абсолютная ошибка прогноза; S – средняя квадратическая ошибка прогноза; $\hat{\sigma}$ – среднее квадратическое отклонение ошибки прогноза (стандартная - 71 -ошибка); σ_x – среднее квадратическое отклонение значений неперидической составляющей суммарного уровня моря по данным наблюдений; P – оправдываемость метода прогноза.

Для Посьета, Владивостока и Корсакова характеристики не приводятся, так как в данных пунктах во время испытаний разработанного метода прогноза не было штормовых нагонов, максимальная величина которых превышала пороговое значение.

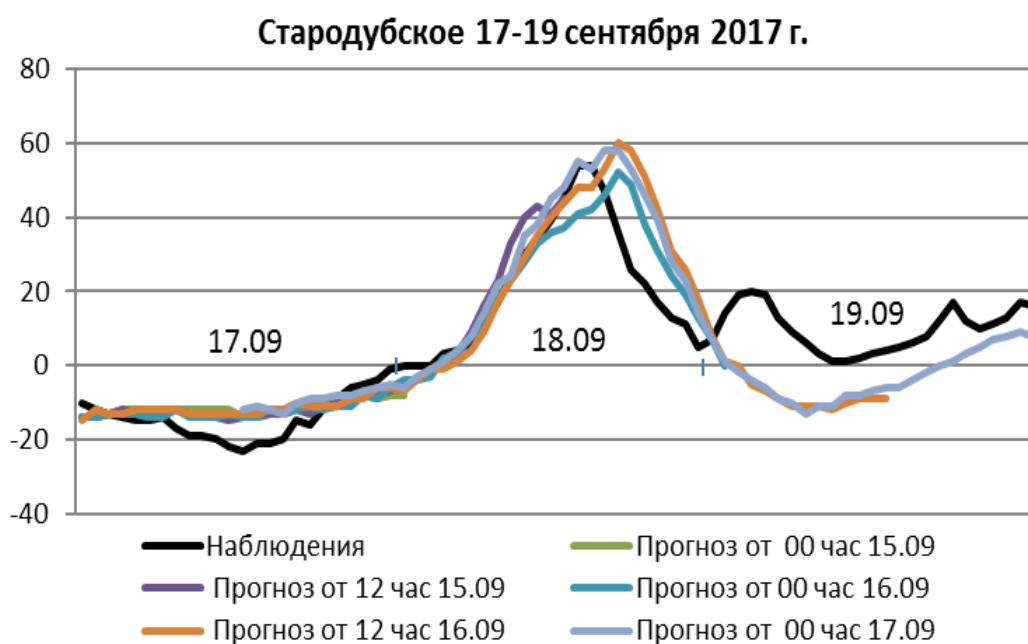
В качестве моментов начала и окончания штормового нагона принималось время устойчивого перехода неперiodической составляющей суммарного уровня моря через отметку 25 см.

Точность прогноза штормовых нагонов на побережье дальневосточных морей с помощью разработанного метода в целом удовлетворяет требованиям руководящих документов Росгидромета [8, 9] (табл. 4).

Средняя оправдываемость рассчитанных прогнозов для всех пунктов, исключая Находку и Преображение, составляет от 72 до 100 %. Средняя арифметическая (систематическая) ошибка прогноза по абсолютной величине в основном не превышает 10 см, средняя абсолютная и средняя квадратическая ошибки прогноза для большинства пунктов меньше 15 см, величина средней относительной ошибки прогноза находится в диапазоне от 0,15 до 0,49, значение параметра S/σ_x не превышает 0,54 (табл. 4).

Разработанный метод обеспечивает более высокое качество прогноза штормовых нагонов по сравнению с методом, используемым в оперативной работе (табл. 4). Только для пункта б. Нагаева точность прогнозов штормовых нагонов в рамках разработанного метода прогноза несколько ниже (табл. 4).

В большинстве случаев достаточно успешно прогнозируются не только величина и время формирования максимума штормового нагона, но и изменения неперiodической составляющей суммарного уровня моря во времени (рис. 3).



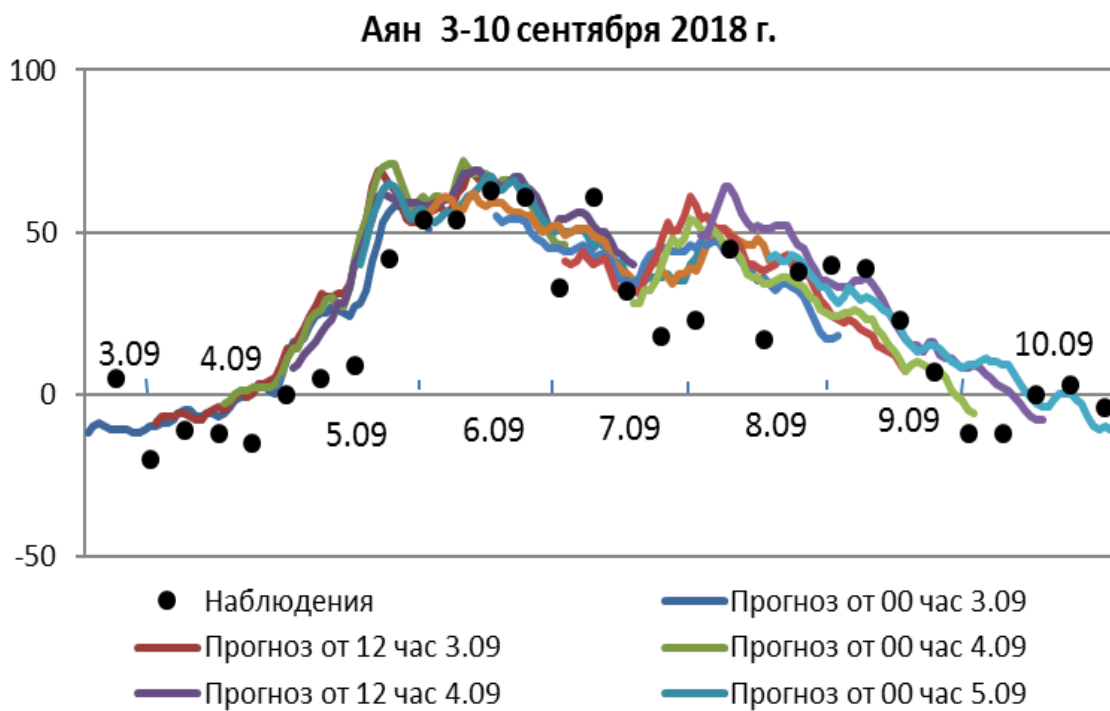
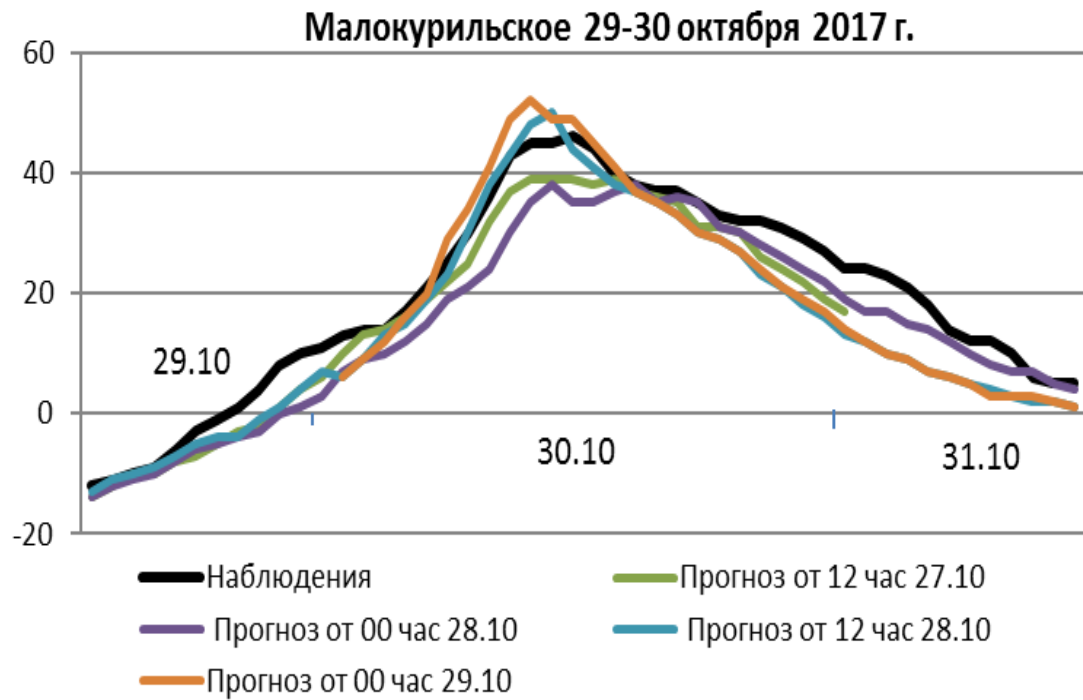


Рис. 3. Изменения непериодической составляющей суммарного уровня моря во время штормовых нагонов, см.

Количество штормовых нагонов, возникших на побережье дальневосточных морей во время испытаний разработанного метода прогноза, невелико (табл. 4). Поэтому выявить для каждого берегового пункта в отдельности зависимость качества прогнозов неперiodической составляющей суммарного уровня моря во время нагонов от заблаговременности прогноза довольно сложно (табл. 5).

Таблица 5

Оправдываемость прогнозов неперiodической составляющей суммарного уровня моря во время штормовых нагонов (числитель), % и число сравниваемых наблюдавшихся и прогнозируемых значений (знаменатель)

Пункт	Заблаговременность, ч						
	12–18	21–27	30–36	39–45	48–54	57–63	66–72
Находка	$\frac{69,6}{23}$	$\frac{76,2}{21}$	$\frac{70,0}{20}$	$\frac{61,9}{21}$	$\frac{60,9}{23}$	$\frac{57,1}{21}$	$\frac{56,3}{16}$
Преображение	$\frac{57,6}{33}$	$\frac{60,0}{25}$	$\frac{57,1}{21}$	$\frac{59,3}{27}$	$\frac{57,6}{33}$	$\frac{56,0}{25}$	$\frac{60,0}{20}$
Рудная Пристань	$\frac{71,9}{32}$	$\frac{80,0}{30}$	$\frac{87,5}{32}$	$\frac{85,7}{35}$	$\frac{65,6}{32}$	$\frac{63,3}{30}$	$\frac{62,5}{32}$
Сосуново	$\frac{89,2}{65}$	$\frac{87,3}{63}$	$\frac{81,0}{63}$	$\frac{84,6}{65}$	$\frac{93,8}{65}$	$\frac{90,5}{63}$	$\frac{79,4}{63}$
Углегорск	$\frac{100,0}{17}$	$\frac{100,0}{22}$	$\frac{95,5}{22}$	$\frac{90,9}{22}$	$\frac{75,0}{24}$	$\frac{68,0}{25}$	$\frac{68,2}{22}$
Холмск	$\frac{95,5}{22}$	$\frac{86,4}{22}$	$\frac{94,4}{18}$	$\frac{75,0}{20}$	$\frac{59,1}{22}$	$\frac{68,2}{22}$	$\frac{100,0}{18}$
Стародубское	$\frac{100,0}{26}$	$\frac{93,1}{29}$	$\frac{97,1}{35}$	$\frac{86,0}{43}$	$\frac{90,0}{40}$	$\frac{100,0}{39}$	$\frac{100,0}{41}$
о. Байдукова	$\frac{81,3}{16}$	$\frac{100,0}{16}$	$\frac{90,9}{33}$	$\frac{88,2}{17}$	$\frac{85,7}{35}$	$\frac{88,9}{18}$	$\frac{86,5}{37}$
Аян	$\frac{100,0}{11}$	$\frac{77,8}{9}$	$\frac{89,5}{19}$	$\frac{81,8}{11}$	$\frac{95,5}{22}$	$\frac{90,0}{10}$	$\frac{77,3}{22}$
б. Нагаева	$\frac{81,6}{49}$	$\frac{80,0}{45}$	$\frac{64,9}{37}$	$\frac{78,6}{42}$	$\frac{69,4}{49}$	$\frac{86,7}{45}$	$\frac{89,2}{37}$
Курильск	$\frac{75,9}{29}$	$\frac{82,1}{39}$	$\frac{85,0}{40}$	$\frac{85,3}{34}$	$\frac{75,8}{33}$	$\frac{94,9}{39}$	$\frac{72,5}{40}$
Малокурильское	$\frac{100,0}{14}$	$\frac{100,0}{18}$	$\frac{100,0}{24}$	$\frac{100,0}{25}$	$\frac{100,0}{21}$	$\frac{100,0}{21}$	$\frac{70,8}{24}$
Петропавловск-Камчатский	$\frac{71,7}{53}$	$\frac{92,5}{53}$	$\frac{92,2}{51}$	$\frac{100,0}{53}$	$\frac{98,1}{54}$	$\frac{84,9}{53}$	$\frac{82,4}{51}$
Корф (Тиличики)	$\frac{100,0}{24}$	$\frac{100,0}{22}$	$\frac{100,0}{19}$	$\frac{100,0}{21}$	$\frac{100,0}{24}$	$\frac{100,0}{22}$	$\frac{100,0}{19}$
Среднее	85,3	86,8	86,1	84,1	80,5	82,0	78,9

Примечание. Допустимые ошибки прогноза соответствуют значениям, указанным в табл. 2.

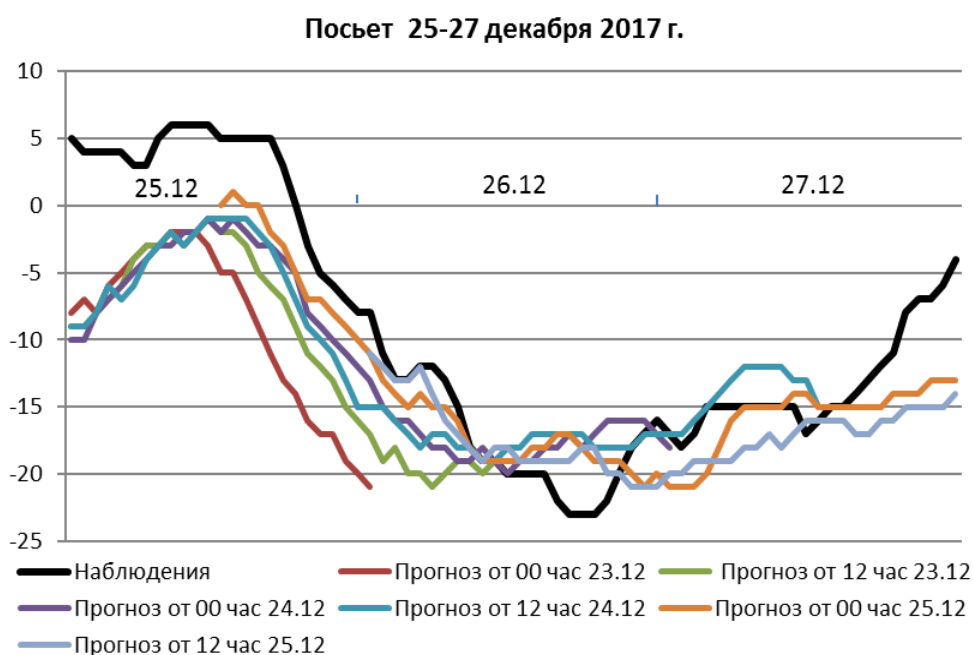
Для Посъета, Владивостока и Корсакова характеристики не приводятся, так как в данных пунктах во время испытаний разработанного метода прогноза не было штормовых нагонов, максимальная величина которых превышала пороговое значение.

При осреднении данных по всем береговым пунктам установлено, что наиболее высокая точность прогнозов штормовых нагонов соответствует заблаговременности 21–27 часов. С увеличением заблаговременности прогноза его качество понижается (небольшое увеличение оправдываемости прогнозов при заблаговременности 57–63 часа, скорее всего, имеет случайный характер).

Следует отметить, что все штормовые нагоны, наблюдавшиеся на побережье дальневосточных морей в период испытаний разработанного метода прогноза, были предусмотрены рассчитанными прогнозами. Тем не менее имеются случаи, когда в соответствии с прогнозами в некотором береговом пункте ожидалось формирование значительного нагона, которого, как выяснилось позже по данным наблюдений над уровнем моря, не было. Очевидно, что причиной наличия таких ситуаций являются погрешности прогноза полей ветра и приземного атмосферного давления по атмосферной модели.

В период испытаний разработанного метода прогноза на побережье дальневосточных морей зарегистрированы семь опасных природных явлений (ОЯ), когда затапливались населенные пункты, береговые сооружения и объекты. Изменения уровня моря во время шести из этих ситуаций были успешно рассчитаны в рамках выпущенных прогнозов.

Как отмечалось ранее, больших сгонов на побережье дальневосточных морей во время испытаний разработанного метода прогноза не было. Тем не менее установлено, что с помощью данного метода наиболее значительные сгоны прогнозируются достаточно качественно (рис. 4).



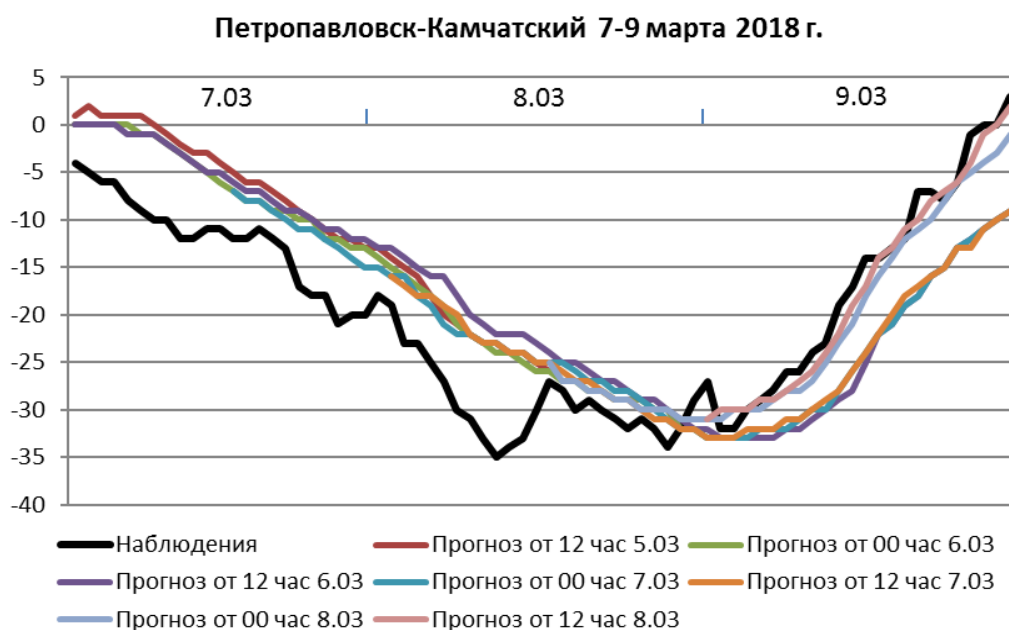


Рис. 4. Изменения неперiodической составляющей суммарного уровня моря во время сгонов, см.

Заключение

Результаты оперативных (производственных) испытаний разработанного в ФГБУ «ДВНИГМИ» метода краткосрочного прогноза уровня моря на побережье Охотского моря, северной части Японского моря, восточном побережье полуострова Камчатка свидетельствуют, что данный метод позволяет успешно прогнозировать колебания уровня моря в большинстве пунктов, расположенных в пределах рассматриваемого объекта.

Метод прогноза обеспечивает получение результатов, соответствующих требованиям руководящих документов Росгидромета. Оправдываемость прогнозов суммарных (наблюдаемых) уровней моря и штормовых нагонов практически для всех береговых пунктов выше, чем по методу прогноза, который используется в оперативной работе дальневосточных УГМС.

В основном успешно прогнозируются изменения уровня моря во время опасных природных явлений, когда подтапливаются береговые объекты и сооружения.

Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета на заседании от 18 апреля 2019 г. приняла следующее решение:

- одобрить работу ФГБУ «ДВНИГМИ» по созданию метода краткосрочного (с заблаговременностью 72 часа) прогноза изменений уровня моря на побережье Охотского моря, северной части Японского моря, восточном побережье полуострова Камчатка;
- рекомендовать использовать разработанный метод в оперативной практике ФГБУ «Камчатское УГМС», «Колымское УГМС», «Сахалинское УГМС», «Дальневосточное УГМС», «Приморское УГМС» в качестве метода основного численного прогноза уровня моря;
- ФГБУ «Дальневосточное УГМС» обеспечить производственную эксплуатацию оперативной технологической линии разработанного метода прогноза;
- ФГБУ «ДВНИГМИ» обеспечить публикацию рассчитанных прогнозов на сайте института.

Список литературы

1. *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.
2. *Вербицкая Е.М., Романский С.О.* Конфигурация модели WRF-ARW для прогноза погоды в Дальневосточном регионе // Юбилейный выпуск «ДВНИГМИ – 65 лет». Владивосток: Дальнаука, 2015. – 270 с. – С. 172–203.
3. *Вербицкая О.А., Зильберштейн О.И., Попов С.К., Лобов А.Л.* Метод краткосрочного гидродинамического прогноза штормовых нагонов в северной части Каспийского моря и результаты его испытаний // Результаты испытания новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических прогнозов. – 2002. – Информационный сборник № 29. – С. 76–89.
4. *Любицкий Ю.В.* Об оценке качества прогнозов суммарных уровней приливного моря // Юбилейный выпуск «ДВНИГМИ – 65 лет». Владивосток: Дальнаука, 2015. – 270 с. – С. 52–62.
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 // Юбилейный выпуск «ДВНИГМИ – 65 лет». Владивосток: Дальнаука, 2015. – 270 с. – С. 8–32.
6. *Любицкий Ю.В., Вербицкая Е.М., Романский С.О., Кравчук Л.П., Новикова О.И., Тюрнин В.Б., Кузнецов М.Е.* Результаты испытаний метода краткосрочного прогноза

изменений суммарного уровня моря на побережье Охотского моря, Татарского пролива, тихоокеанском побережье Курильских островов и полуострова Камчатка // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2015. – Информационный сборник № 42. – С. 93–110.

7. Попов С.К., Зильберштейн О.И., Лобов А.Л., Елисов В.В., Батов В.И. Метод краткосрочного прогноза уровня Баренцева и Белого морей // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2014. – Информационный сборник № 41. – С. 98–110.

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

9. РД 52.27.759-2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. – М.: Триада лтд, 2011. – 195 с.