

УДК 551.461(265.54)

Ю.В. ЛЮБИЦКИЙ

Штормовой нагон в заливе Петра Великого (Японское море), вызванный тайфуном Лайонрок (29 августа – 2 сентября 2016 г.)

Тайфун Лайонрок вызвал в зал. Петра Великого штормовой нагон, один из самых больших за всю историю наблюдений над уровнем моря в этом районе. Максимальная величина нагона, по данным измерений в береговых пунктах, составила от 63 см в районе пос. Посыет до 73 см в районе Владивостока. Основной причиной значительной интенсивности нагона является аномальный характер траектории движения тайфуна: после выхода на акваторию Японского моря тайфун перемещался в северо-западном направлении непосредственно в район зал. Петра Великого.

Ключевые слова: залив Петра Великого, штормовой нагон, тайфун Лайонрок.

Storm surge in Peter the Great Bay (the Sea of Japan) from August 29 to September 2, 2016 caused by the Lionrock typhoon. Yu.V. LYUBITSKY (The Department of Hydrometeorological Research and Forecast of the Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Khabarovsk).

The Lionrock typhoon generated the highest storm surge in Peter the Great Bay throughout the history of the observations in the area. The maximum surge height at the coastal tide gauges is from 63 cm in Posyet to 73 cm in Vladivostok. The typhoon anomalous movement trajectory is the main reason of the surge intensity: after the typhoon had entered the Sea of Japan basin it moved in the North-West direction to Peter the Great Bay area.

Key words: Peter the Great Bay, storm surge, Lionrock typhoon.

В конце августа 2016 г. из-за проливных дождей, вызванных тайфуном Лайонрок, зародившимся в тропической зоне Тихого океана, на территории Приморского края были подтоплены более 2,5 тыс. домов, повреждены 27 км дорог, разрушены 9 мостов, отрезаны от сообщения 17 поселков [2]. Осадки большой интенсивности, выпавшие в Японии, Республике Корея, КНДР и КНР, привели к наводнениям, во время которых были затоплены населенные пункты, разрушены хозяйственные объекты и транспортные коммуникации. Характер развития и последствия этих опасных природных явлений подробно освещались в СМИ. Менее известно, что под действием тайфуна на северо-западном побережье Японского моря сформировался штормовой нагон, один из самых больших за всю историю наблюдений в этом районе. В результате подъема уровня моря были затоплены прибрежные дороги на о-ве Русский, зоны отдыха и пляжи в Амурском и Уссурийском заливах, пирсы в Спортивной Гавани, Токаревская коса.

ЛЮБИЦКИЙ Юрий Вадимович – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник (Отдел гидрометеорологических исследований и прогнозов Дальневосточного регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института, Хабаровск). E-mail: yuvadlub@gmail.com

Материалы и методы исследований

Для оценки характеристик нагона по материалам наблюдений над уровнем моря использовались данные измерений (с дискретностью 1 ч) автоматизированных постов (АП) Службы предупреждения о цунами и поплавокых самописцев уровня моря (СУМ) Приморского, Сахалинского и Дальневосточного УГМС Росгидромета в береговых пунктах, расположенных на побережье северной части Японского моря. Материалы наблюдений имеют достаточно высокое качество (погрешности измерений не превышают 1 см). Для получения сгонно-нагонной составляющей суммарного уровня моря из данных наблюдений вычитался прилив, рассчитанный по сериям измерений за август–сентябрь 2016 г. с помощью метода наименьших квадратов [12]. В соответствии с критерием Релея [12], длина анализируемых рядов позволяет учесть 37 волн прилива.

Исследование синоптического процесса в течение рассматриваемого периода времени выполнено на основе карт приземного анализа Japan Meteorological Agency (JMA) с дискретностью 6 ч, публикуемых в Интернете (<http://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>).

Для расчета экстремальных величин нагонов редкой повторяемости во Владивостоке применен метод, основанный на асимптотической теории экстремальных значений [1, 6]. Используется двойное экспоненциальное распределение, эмпирические вероятности превышения рассчитываются по формуле Вейбулла.

Механизм и особенности формирования штормового нагона исследованы с помощью двумерной нелинейной численной гидродинамической модели, разработанной в ФГБУ «ДВНИГМИ» для расчета и краткосрочного прогноза (с заблаговременностью 72 ч) уровня моря на побережье и акватории дальневосточных морей России [5].

Результаты исследований

По данным наблюдений, максимальная величина нагона на побережье в районе Посьета составила 63 см, Владивостока – 73 см, Находки – 68 см. Подъем уровня моря продолжался в течение длительного времени (почти 2 сут), практически с постоянной скоростью (рис. 1). Нагон в пунктах, расположенных на побережье зал. Петра Великого, достиг максимума в период с 22 ч ВСВ (Всемирное скоординированное время) 30 августа до 03 ч 31 августа, что соответствует 08–13 ч местного времени 31 августа. После прохождения максимума уровень моря понижался 3 сут, следовательно, штормовой нагон продолжался в целом почти 5 сут.

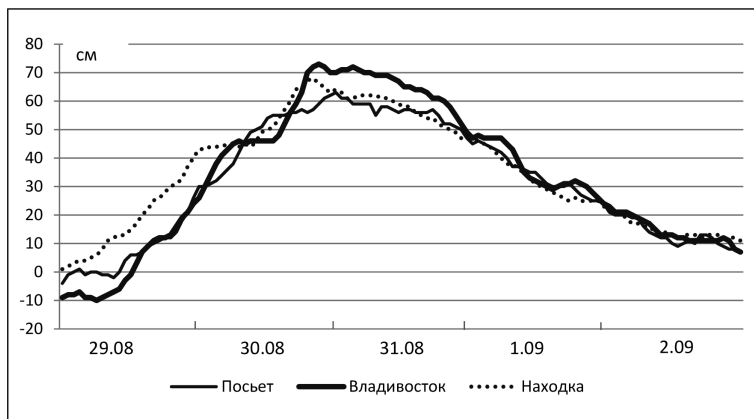


Рис. 1. Изменения сгонно-нагонной составляющей суммарного уровня моря в пунктах, расположенных на побережье зал. Петра Великого, во время штормового нагона, вызванного тайфуном Лайонрок

Как свидетельствуют численные эксперименты, основным фактором, вызвавшим нагон, стало понижение приземного атмосферного давления над морем при прохождении тайфуна. Влияние ветра на изменение уровня моря менее значительно, что объясняется небольшой шириной шельфа в районе зал. Петра Великого (рис. 2).



Рис. 2. Рассчитанные с помощью численного моделирования компоненты стонно-нагонной составляющей суммарного уровня моря во Владивостоке (12 ч ВСВ 30 августа – 23 ч 1 сентября 2016 г.), сформированные действием ветра и приземного атмосферного давления

Одной из особенностей штормового нагона, вызванного тайфуном Лайонрок, является локализация его максимумов непосредственно в зал. Петра Великого (табл. 1), хотя обычно нагоны более значительную величину имеют в северной части Японского моря и Татарском проливе [9, 10].

Таблица 1

Максимальные величины нагона, вызванного тайфуном Лайонрок, в береговых пунктах, расположенных на побережье Японского моря (в направлении с севера на юг)

Пункт	Величина нагона, см	Источник данных
Углегорск	9	Наблюдения СУМ
Советская Гавань	20	Наблюдения АП
Холмск	21	Наблюдения СУМ
Невельск	25	Наблюдения АП
Сосуново	86	-//-
Рудная Пристань	58	-//-
Преображение	60	-//-
Находка	68	Наблюдения СУМ
Владивосток	73	Наблюдения АП
Посьет	63	Наблюдения СУМ
Чхончжин	42	Численное моделирование
Вонсан	28	-//-

Обращает на себя внимание факт, что в пос. Сосуново (южная часть материкового побережья Татарского пролива) максимальная величина штормового нагона больше, чем в зал. Петра Великого (табл. 1). Это не противоречит отмеченной ранее особенности, так как датчик АП Службы предупреждения о цунами в Сосуново расположен не на берегу моря, а в устье р. Светлая, в бассейне которой только за сутки 29 августа 2016 г. выпало больше трех месячных норм осадков [2]. В результате измерений автоматизированным

постом были зарегистрированы не только штормовой нагон, но и волна дождевого паводка, проходившая на устьевом участке р. Светлая.

Для выявления причин локализации наибольших значений штормового нагона в зал. Петра Великого рассмотрим динамику процесса.

Тайфун Лайонрок достиг наибольшего развития в период с 06 ч 28 августа до 00 ч ВСВ 29 августа. Вначале центр тайфуна располагался южнее Японии, затем переместился над акваторией Тихого океана в северо-восточном направлении. Приземное атмосферное давление в центре тайфуна составляло 940 гПа, максимальная скорость ветра (без учета порывов) достигала 90 узлов (46 м/с) [2]. В это же время над Японским морем сформировался циклон глубиной 988 гПа (рис. 3), вызвавший усиление ветра над акваторией моря и сильные дожди в Приморском крае [2].

Характер пространственного распределения приземного атмосферного давления и ветра над Японским морем в 00 ч ВСВ 29 августа привел к небольшому (5–15 см) понижению уровня моря в северной его части. Это фиксировалось как по материалам наблюдений, так и по результатам численного моделирования. В то же время у побережья п-ова Корея наблюдалось повышение уровня моря (до 30 см). В результате возник наклон сгонно-нагонной поверхности уровня моря в направлении с юго-запада на северо-восток (рис. 3).

В зал. Петра Великого штормовой нагон начал формироваться после 12 ч ВСВ 29 августа (рис. 1), когда центр тайфуна находился еще над Тихим океаном. При этом наибольший подъем уровня Японского моря происходил в зал. Петра Великого и у прилегающего к нему побережья КНДР (рис. 3).

В 12 ч 30 августа тайфун Лайонрок пересек северную часть о-ва Хонсю и вышел на акваторию Японского моря. Приземное атмосферное давление в центре тайфуна, который перешел в стадию сильного тропического шторма, повысилось до 972 гПа, скорость ветра уменьшилась до 60 узлов (31 м/с) [2].

Так как движение тайфуна на север было заблокировано охотоморским антициклоном, в дальнейшем тайфун, трансформировавшийся во внетропический циклон, перемещался на северо-запад, непосредственно в район зал. Петра Великого. В 18 ч ВСВ 30 августа тайфун достиг побережья Приморского края, что вскоре привело к формированию максимума нагона в Посете, Владивостоке и Находке. И в этой ситуации результаты численного моделирования свидетельствуют о локализации наибольших величин штормового нагона в зал. Петра Великого.

В 00 ч ВСВ 31 августа бывший тайфун Лайонрок и циклон, возникший над Японским морем, объединились в область низкого приземного атмосферного давления (рис. 3), которая затем переместилась на материк и стала быстро заполняться. Величина штормового нагона начала уменьшаться (рис. 3), и явление вскоре прекратилось.

Результаты численных экспериментов хорошо согласуются с данными наблюдений над уровнем моря в береговых пунктах. Поэтому можно сделать заключение, что отмеченная ранее особенность формирования максимальных значений штормового нагона, вызванного тайфуном Лайонрок, именно в зал. Петра Великого является вполне закономерным следствием аномального характера траектории движения тайфуна над акваторией Японского моря.

Другая особенность исследуемого штормового нагона в зал. Петра Великого – его очень большая величина по сравнению с другими нагонами, зарегистрированными в этом районе в течение многолетнего периода времени (рис. 4). Экстраполируя теоретическую функцию распределения максимальных годовых величин штормовых нагонов во Владивостоке в область малых вероятностей, можно определить, что нагон, вызванный тайфуном Лайонрок, является экстраординарным событием повторяемостью приблизительно 1 раз в 250 лет. Следует отметить, что такие экстремальные нагонные явления в последние десятилетия наблюдались и на других участках побережья дальневосточных морей, например в Холмске и Корсакове [3, 11]. Вопрос о причинах столь большой интенсивности нагона представляет особый интерес, так как понижение приземного атмосферного

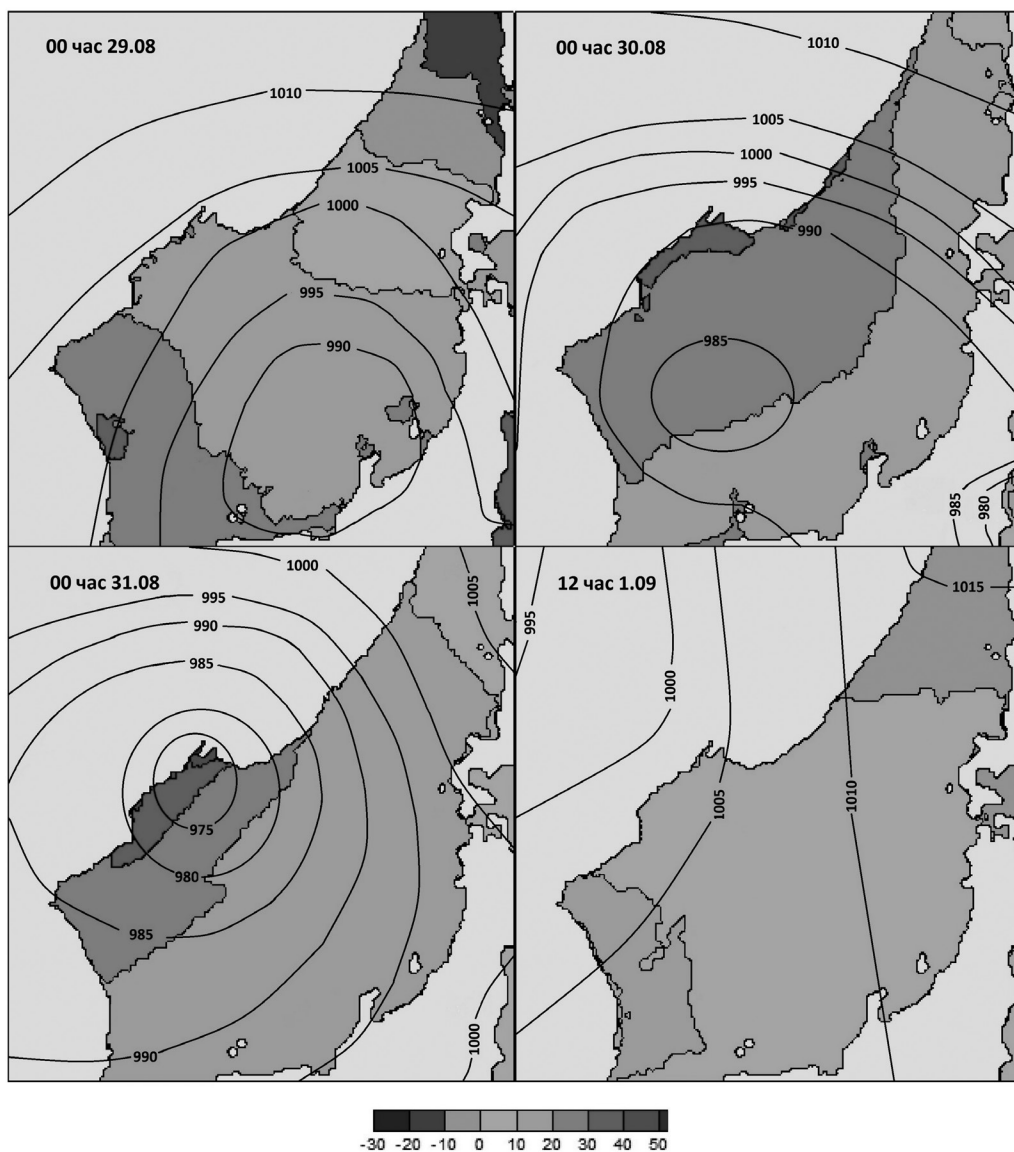


Рис. 3. Рельеф сгонно-нагонной поверхности уровня Японского моря, рассчитанный по численной модели, и пространственное распределение приземного атмосферного давления (гПа), приведенного к уровню моря

давления и скорость ветра во время тайфуна Лайонрок не были экстраординарными. Их величина не превышала значений, наблюдавшихся во время других тайфунов, которые не вызвали столь значительного подъема уровня моря (табл. 2).

По данным измерений на автоматизированных метеорологических комплексах Посет, Владивосток и Находка Приморского УГМС, минимальное приземное атмосферное давление, приведенное к уровню моря, при прохождении тайфуна Лайонрок составляло 971–974 гПа, максимальная скорость ветра без учета порывов не превышала 7–9 м/с. По сведениям, опубликованным в «Ежемесячном гидрометеорологическом бюллетене ДВНИГМИ», максимальная скорость ветра над акваторией Японского моря в радиусе 350 миль достигала всего 15–25 м/с [2].

Рассмотрим возможные причины аномально большой величины штормового нагона в зал. Петра Великого, вызванного тайфуном Лайонрок.

Таблица 2

**Максимальные величины штормовых нагонов во время тайфунов
в береговых пунктах, расположенных на побережье зал. Петра Великого**

Тайфун	Дата	Величина нагона (см) в пунктах		
		Посьет	Владивосток	Находка
Ирвинг	18.08.1979 г.	34	36	48
Джуди	25–27.07.1989 г.	11	13	13
Робин	13.07.1990 г.	9	13	15
Мелисса	17–21.09.1994 г.	32	39	36
Талас	6.09.2011 г.	25	20	20
Болавен	29.08.2012 г.	26	25*	27
Санба	18.09.2012 г.	30	45*	36
Халонг	18.07.2014 г.	5	8	7
Чан-Хом	13.07.2015 г.	22	23	22
Гони	26.08.2015 г.	23	29	37
Лайонрок	30–31.08.2016 г.	63	73	68

*Во время тайфунов Болавен и Санба наблюдения над уровнем моря на АП Владивосток Приморского УГМС (бухта Золотой Рог) не осуществлялись. Для этих тайфунов приводятся значения максимальных величин штормовых нагонов по данным измерений ТОИ ДВО РАН вблизи северо-западного побережья Уссурийского залива [8].

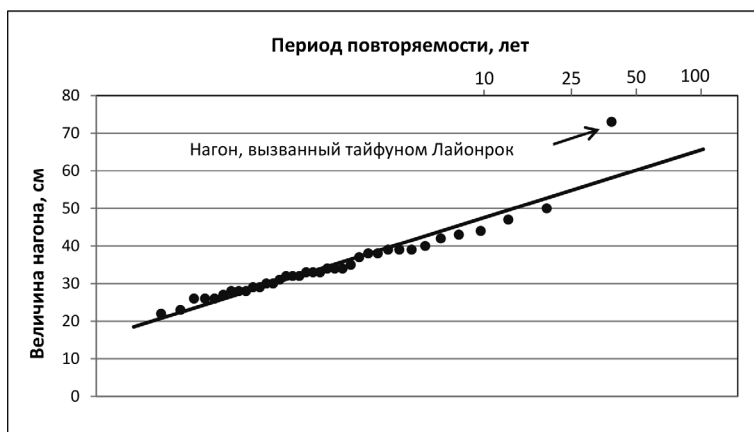


Рис. 4. Распределение максимальных годовых величин штормовых нагонов, наблюдавшихся во Владивостоке в 1977–1979, 1983–2016 гг., в соответствии с двойным экспоненциальным законом (эмпирические вероятности превышения рассчитаны по формуле Вейбулла), и его аппроксимация первым предельным распределением

Можно предположить, что отмеченная особенность является следствием резонанса. В соответствии с формулой Праудмена [7], реакция уровня моря на движущееся барическое возмущение отличается от статической:

$$\xi = \frac{\bar{\xi}}{1 - U^2 / c^2},$$

где ξ – фактические изменения уровня моря; $\bar{\xi}$ – статические вариации уровня моря в соответствии с «законом обратного барометра» (например, уменьшению приземного атмосферного давления на 1 гПа соответствует подъем уровня моря приблизительно на 1 см [6, 7]); U – скорость перемещения барического образования над морем; $c = \sqrt{gh}$ – скорость распространения длинной волны в море (g – ускорение свободного падения, h – глубина моря).

Из формулы Праудмена следует, что чем ближе скорость движения барического образования к скорости длинной волны, тем больше величина отклика уровня моря на изменения атмосферного давления. При $U = c$ возникает резонанс Праудмена [7]. Если $U < c$, статические вариации уровня моря усиливаются динамическим эффектом, следовательно, подъем уровня увеличивается. Тем не менее в глубоких морях и океанах реакция уровня моря на изменения атмосферного давления близка к статической, так как скорость движения барических образований обычно на порядок меньше скорости перемещения длинных волн (в монографии [7] приводятся оценки этих скоростей – 8–20 и 100–250 м/с соответственно).

Центр тайфуна Лайонрок вышел в Японское море вблизи г. Акита в 12 ч ВСВ 30 августа. В 18 ч ВСВ того же дня было зарегистрировано минимальное приземное атмосферное давление в Посьете, Владивостоке и Находке. В результате средняя скорость движения тайфуна над Японским морем составила 32 м/с.

Средняя глубина моря между г. Акита и зал. Петра Великого равна 2800 м, следовательно, скорость распространения длинной волны достигает 166 м/с.

Соотношение рассчитанных значений скоростей движения тайфуна и длинной волны соответствует ситуации увеличения подъема уровня моря в результате динамического эффекта. Правда, величина этого увеличения в соответствии с формулой Праудмена (наибольшие статические изменения уровня моря в тайфуне Лайонрок над Японским морем равны 40 см) не превышает 2 см.

Нельзя исключать возможность увеличения штормового нагона в результате локальных резонансных явлений. При скорости движения тайфуна 32 м/с резонанс Праудмена должен возникать при глубинах моря, близких к 100 м. Несмотря на то что ширина зоны таких глубин в районе зал. Петра Великого относительно невелика, наличие локальных резонансных эффектов в принципе возможно.

Не исключено также, что увеличение подъема уровня моря связано с резонансным возбуждением тайфуном длинных волн, например захваченных гравитационных краевых волн [1, 7]. Известно, что захваченные волны в северном полушарии распространяются только в одном направлении, оставляя берег справа [1]. При обычных траекториях движения тайфунов и глубоких циклонов для зал. Петра Великого это условие не выполняется. Ввиду аномальной траектории движения тайфуна Лайонрок возможность возникновения захваченных волн на участке побережья Преображение–Посьет существует.

Возможно, большая величина штормового нагона 29.08–2.09.2016 г. в зал. Петра Великого в какой-то мере является следствием аномального характера развития синоптического процесса. Как отмечалось ранее, когда тайфун Лайонрок находился над Тихим океаном, над Японским морем возник циклон. Под действием этого циклона в заливе началось повышение уровня моря. Подъем уровня моря, вызванный непосредственно тайфуном Лайонрок, происходил на фоне этого повышения.

Можно предположить, что некоторый вклад в увеличение уровня моря внесли атмосферные осадки, выпавшие в бассейнах реки непосредственно на акваторию Японского моря. Об этом свидетельствуют, например, данные, опубликованные в «Ежемесячном гидрометеорологическом бюллетене ДВНИГМИ»: за сутки 29 августа 2016 г. в Тернейском и Ольгинском районах выпало 105–107 мм осадков [2].

Тем не менее представляется, что влияние данного фактора не очень существенно.

Во-первых, подъем уровня моря во время многих тайфунов, вызвавших продолжительные интенсивные дожди, которые привели к катастрофическим наводнениям на реках Приморского края, был незначительным. При прохождении тайфуна Джуди (июль 1989 г.) были затоплены некоторые микрорайоны во Владивостоке и более 100 населенных пунктов в крае. За время тайфуна на южных и восточных предгорьях Сихотэ-Алия (т.е. в прибрежных районах Японского моря) выпало более 250–300 мм осадков [4]. При этом максимальная величина подъема уровня моря в зал. Петра Великого не превышала 13 см. Во время тайфуна Робин (июль 1990 г.) во Владивостоке за сутки выпало 244 мм

осадков. Несмотря на это, в бухте Золотой Рог уровень моря повысился всего на 13 см (табл. 2).

Во-вторых, даже во время тайфуна Лайонрок, когда в пос. Сосуново, расположенном в бассейне р. Светлая, за сутки выпало 289 мм осадков, подъем уровня воды в устье реки из-за прохождения дождевого паводка составил приблизительно 35 см (при площади водосбора реки 791 км²). Очевидно, что в прилегающих к устью реки районах открытого моря подъем уровня моря был значительно меньше.

Заключение

Штормовой нагон, наблюдавшийся 29.08–2.09.2016 г. в зал. Петра Великого во время прохождения над акваторией Японского моря тайфуна Лайонрок, является экстраординарным событием, повторяемость которого может быть 1 раз в 250 лет. По данным наблюдений над уровнем моря в береговых пунктах, продолжительность нагона составила почти 5 сут, максимальная величина нагона достигала 63–73 см.

Как свидетельствуют результаты численного гидродинамического моделирования явления, штормовой нагон был наиболее значительным в зал. Петра Великого и на прилегающем к нему побережье КНДР. Эта особенность объясняется необычным характером траектории движения тайфуна, который после выхода в Японское море несколько южнее Сангарского пролива перемещался в северо-западном направлении непосредственно в район зал. Петра Великого.

Аномально большая величина штормового нагона, вероятно, сформировалась из-за резонансных эффектов, которые могут быть также следствием уникальности траектории движения тайфуна. Некоторое влияние мог оказать специфический характер синоптического процесса: до выхода тайфуна Лайонрок в Японское море над акваторией моря возник циклон, вызвавший понижение приземного атмосферного давления и усиление ветра и, следовательно, подъем фонового уровня моря.

Проблемы объяснения причин формирования и эффективного прогнозирования экстраординарных нагонов на побережье дальневосточных морей пока далеки от разрешения. В основном это связано со сложностью происходящих процессов [8] и недостатком качественных данных гидрометеорологических наблюдений в штормовых условиях. Тем не менее возможность возникновения штормового нагона, вызванного тайфуном Лайонрок, была успешно спрогнозирована (с заблаговременностью более 48 ч) с использованием численного гидродинамического метода краткосрочного прогноза уровня моря, разработанного в ФГБУ «ДВНИГМИ» [5], который в настоящее время проходит оперативные (производственные) испытания. Абсолютно точно прогнозировалось время формирования максимума опасного природного явления, правда, величина нагона была несколько занижена по сравнению с реальной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герман В.Х., Левиков С.П. Вероятностный анализ и моделирование колебаний уровня моря. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 231 с.
2. Ежемесячный гидрометеорологический бюллетень ДВНИГМИ. – http://ferhri.org/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2016/8/2016.08_ch5_typhoon.pdf (дата обращения: 10.07.2017 г.).
3. Като Э., Любицкий Ю.В., Шевченко Г.В. Оценка экстремальных значений сгонно-нагонных колебаний уровня моря на юго-восточном побережье о. Сахалин // Колебания уровня в морях. СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. С. 111–128.
4. Кузин В.С. Обострение полярного фронта над Приморским краем, обусловившее катастрофическое наводнение в третьей декаде июля 1989 г. // Тр. ДВНИГМИ. 1993. Вып. 146. С. 173–181.
5. Любицкий Ю.В. Метод краткосрочного прогноза уровня моря на побережье и акватории Охотского и Японского морей и на восточном побережье полуострова Камчатка // Тр. ДВНИГМИ. 2017. Вып. 155 (в печати).

6. Любицкий Ю.В., Шевченко Г.В., Елисов В.В. Штормовые нагоны // Мировой океан. Т. 1. Геология и тектоника океана. Катастрофические явления в океане. М.: Науч. мир, 2013. С. 559–575.
7. Рабинович А.Б. Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 325 с.
8. Рогачев К.А., Шлык Н.В. Воздействие тайфуна Болавен на прибрежную циркуляцию вод залива Петра Великого // Изв. ТИНРО. 2013. Т. 173. С. 239–246.
9. Фирсов П.Б., Савельев А.В., Ковбас Ю.Д. Непериодические колебания уровня моря // Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 8. Японское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоздат, 2003. С. 269–312.
10. Фирсов П.Б. О механизме формирования штормовых нагонов в северной части Японского моря // Тр. ДВНИГМИ. 1988. Вып. 132. С. 3–21.
11. Шевченко Г.В. Статистические характеристики штормовых нагонов в южной части о. Сахалин // Изв. РГО. 1997. Т. 129, № 3. С. 94–107.
12. Foreman M.G.G. Manual for tidal heights analysis and prediction: Pacific Marine Science Report 77–10 / Inst. Ocean Sci. Patricia Bay. Victoria, B.C., 2004. 58 p.