

Анализ штормового нагона на побережье Приморского края в августе — сентябре 2016 г., вызванного тайфуном Лайонрок, с использованием гидродинамического моделирования*

К. А. КЛЕВАННЫЙ^{1,†}, О. В. СОКОЛОВ², С. О. РОМАНСКИЙ²

¹ООО “Кардинал-софт”, Санкт-Петербург, Россия

²Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Владивосток, Россия

[†]Контактный e-mail: kklevannyu@mail.ru

С использованием метода гидродинамического моделирования проведен анализ штормового нагона на побережье Приморского края в августе — сентябре 2016 г., вызванного воздействием тайфуна Лайонрок. Основой моделирования являются программный комплекс CARDINAL и численная модель Японского моря. Входные поля давления и ветра для океанографической модели задавались по данным оперативной региональной прогностической модели атмосферы WRF-ARW. Приводятся результаты сопоставления расчетных и наблюдаемых данных об уровне моря. Сделан вывод о возникновении штормового нагона на побережье заливов Петра Великого и Посыета в результате длительного действия штормового ветра восточного направления и вызванного им потока вод в сторону побережья. В открытой части моря получено поднятие уровня за счет понижения давления.

Ключевые слова: штормовой нагон, тайфун Лайонрок, математическое моделирование, программный комплекс CARDINAL, Японское море.

Библиографическая ссылка: Клеванный К.А., Соколов О.В., Романский С.О. Анализ штормового нагона на побережье Приморского края в августе — сентябре 2016 г., вызванного тайфуном Лайонрок, с использованием гидродинамического моделирования // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24, № 2. С. 78–89.

DOI: 10.25743/ICT.2019.24.2.007.

Введение

Южные районы Дальнего Востока России и в особенности Приморский край в летне-осенний период подвержены воздействию тропических циклонов (ТЦ) в стадии тайфунов. За последние 40 лет на Приморский край вышло 11 тайфунов: Ирвинг (август 1979 г.), Джуди (июль 1989 г.), Робин (июль 1990 г.), Мелисса (сентябрь 1994 г.), Талас (сентябрь 2011 г.), Болавен (август 2012 г.), Санба (сентябрь 2012 г.), Халонг (июль 2014 г.), Чан-хом (июль 2015 г.), Гони (август 2015 г.) и Лайонрок (сентябрь 2016 г.). Тропические циклоны представляют опасность для жизни и здоровья людей, приводят

*Title translation and abstract in English can be found on page 89.

© ИВТ СО РАН, 2019.

к разрушениям жилой и хозяйственной инфраструктуры, в основном под воздействием паводковых явлений, связанных с большим количеством выпадающих осадков. Кроме того, воздействие оказывают сильные и ураганные ветры, высокая влажность, резкие перепады давления и штормовые нагоны.

Целью настоящей статьи является анализ штормового нагона на побережье Приморского края в августе — начале сентября 2016 г., вызванного воздействием тайфуна Лайонрок.

1. Материалы и методы исследования

Исследование штормового нагона, вызванного ТЦ Лайонрок, проводилось с использованием гидродинамического моделирования. Основой моделирования являлись программный комплекс CARDINAL и численная модель Японского моря. Поля давления и ветра для океанографической модели задавались по данным оперативной региональной прогностической модели атмосферы Weather Research and Forecasting (WRF).

Негидростатическая модель WRF широко применяется в целях краткосрочного прогнозирования погоды и моделирования атмосферных процессов различного пространственно-временного масштаба. В настоящей работе расчет ежедневных полей приземного ветра и давления проводился на основе оперативной технологии численного краткосрочного прогноза погоды “Хаб-15” [1], разработанной в ДВНИГМИ на базе модели WRF с ядром Advanced Research WRF (ARW) версии 3.4.1 [2]. Область расчета модели с центром в г. Хабаровске покрывает территорию примерно между $30\text{--}70^\circ$ с. ш. и $100\text{--}180^\circ$ в. д. сеткой с горизонтальным разрешением 15×15 км. В качестве начальных данных и на боковых границах использовались прогнозы оперативной модели Global Forecasting System (США) от сроков 0 и 12 ч Всемирного согласованного времени (BCB); информация на внешней границе области расчета обновлялась каждые 3 ч. Для целей, поставленных в работе, данные моделирования за период с 27 августа по 4 сентября 2016 г. сохранялись через каждый час в проекционной системе Ламберта. Расчеты динамики вод выполнялись с помощью программного комплекса CARDINAL [3, 4] по модели Японского моря (рис. 1) в основном в двумерной постановке по уравнениям мелкой воды. Для проверки выполнен также расчет в трехмерной постановке.

В двумерной постановке [5] имеем

$$\mathbf{U}_t + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \frac{\mathbf{U}}{H} = -gH\nabla\zeta - \frac{H}{\rho_0} \nabla P_a + \mathbf{f} \times \mathbf{U} + \nabla(K\nabla\mathbf{U}) + C_D \frac{\rho_a}{\rho_0} \mathbf{W} |\mathbf{W}| - f_b \frac{\mathbf{U} |\mathbf{U}|}{H^2}, \quad (1)$$

$$\zeta_t + \operatorname{div} \mathbf{U} = 0. \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{U} = (U, V)$ — вектор удельного расхода воды (полный поток); $H = h + \zeta$ — толщина слоя воды; h — глубина воды от нулевого уровня, отсчитывается вертикально вниз; ζ — уровень свободной поверхности, отсчитывается от нулевого уровня вертикально вверх; g — ускорение свободного падения; ρ_0 — плотность воды; P_a — атмосферное давление; \mathbf{f} — параметр Кориолиса; K — коэффициент горизонтального турбулентного обмена; \mathbf{W} — вектор горизонтального ветра на высоте 10 м; C_D — ветровой коэффициент; ρ_a — плотность воздуха; f_b — коэффициент придонного трения; $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$.

В трехмерной постановке решаются уравнения в гидростатическом приближении

$$\mathbf{v}_t + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + w \mathbf{v}_z = -g\nabla\zeta - \frac{1}{\rho_0} \nabla P_a + \mathbf{f} \times \mathbf{v} + \nabla(K\nabla\mathbf{v}) + (k\mathbf{v}_z)_z, \quad \operatorname{div} \mathbf{u} = 0$$

с граничными условиями на поверхности и на дне

$$\rho_0 k \mathbf{v}_z|_{z=\zeta} = \rho_a C_D \mathbf{W} |\mathbf{W}|, \quad w|_{z=\zeta} = \frac{d\zeta}{dt},$$

$$\rho_0 k \mathbf{v}_z|_{z=-h} = -\rho_0 f_b \mathbf{v} |\mathbf{v}|, \quad w|_{z=-h} = -(h_x u + h_y v)|_{z=-h},$$

на твердых боковых границах ставится условие скольжения

$$\mathbf{v}_n = 0, \quad K \frac{\partial \mathbf{v}_\tau}{\partial n} = -f_b \mathbf{v}_\tau |\mathbf{v}|, \quad (3)$$

где $\mathbf{u} = (\mathbf{v}, w)$, $\mathbf{v} = (u, v)$, u, v — горизонтальные компоненты вектора скорости, w — ее вертикальная компонента; k — коэффициент вертикального турбулентного обмена, он определяется по k — ε -модели турбулентности [6].

Уравнения преобразуются к криволинейным гранично-зависимым координатам [7]

$$\xi = \xi(x, y), \quad \eta = \eta(x, y), \quad \sigma(x, y, z, t) = \frac{z+h}{H}, \quad \tau = t$$

с якобианом преобразования

$$J_* = \frac{\partial(x, y, z)}{\partial(\xi, \eta, \sigma)} = (x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi) H = JH, \quad 0 < J_* < \infty,$$

и к контравариантным составляющим скорости, при использовании которых значительно упрощаются граничные условия на боковых границах. В криволинейных координатах уравнения (1), (2) приобретают вид

$$\begin{aligned} & P_t + \frac{gH}{J} (g_{22} \varsigma_\xi - g_{12} \varsigma_\eta) + f_b \frac{P|\mathbf{U}|}{H^2} = \\ & = -\frac{1}{J} \left\{ \left(\frac{P^2}{H} \right)_\xi + \left(\frac{PQ}{H} \right)_\eta + \frac{y_\eta Q + y_\xi P}{JH} (x_{\xi\eta} P + x_{\eta\eta} Q) - \frac{x_\xi P + x_\eta Q}{JH} (y_{\xi\eta} P + y_{\eta\eta} Q) \right\} - \\ & \quad - \frac{H}{\rho_0} \left(y_\eta \frac{\partial P_a}{\partial x} - x_\eta \frac{\partial P_a}{\partial y} \right) + \frac{f}{J} (g_{22} Q + g_{12} P) + \\ & \quad + \frac{K}{J^2} (g_{11} P_{\eta\eta} + g_{22} P_{\xi\xi} - 2g_{12} P_{\eta\xi}) + C_D \frac{\rho_a}{\rho_0} (y_\eta w_{(x)} - x_\eta w_{(y)}) |\mathbf{W}|, \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & Q_t + \frac{gH}{J} (g_{11} \varsigma_\eta - g_{12} \varsigma_\xi) + f_b \frac{Q|\mathbf{U}|}{H^2} = \\ & = -\frac{1}{J} \left\{ \left(\frac{Q^2}{H} \right)_\eta + \left(\frac{PQ}{H} \right)_\xi + \frac{x_\xi P + x_\eta Q}{JH} (y_{\xi\eta} Q + y_{\xi\xi} P) - \frac{y_\eta Q + y_\xi P}{JH} (x_{\xi\eta} Q + x_{\xi\xi} P) \right\} - \\ & \quad - \frac{H}{\rho_0} \left(x_\xi \frac{\partial P_a}{\partial y} - y_\xi \frac{\partial P_a}{\partial x} \right) - \frac{f}{J} (g_{11} P + g_{12} Q) + \\ & \quad + \frac{K}{J^2} (g_{11} Q_{\eta\eta} + g_{22} Q_{\xi\xi} - 2g_{12} Q_{\eta\xi}) + C_D \frac{\rho_a}{\rho_0} (x_\xi w_{(y)} - y_\xi w_{(x)}) |\mathbf{W}|, \quad (5) \end{aligned}$$

$$\varsigma_t + \frac{1}{J} (P_\xi + Q_\eta) = 0,$$

где $P = y_\eta U - x_\eta V$, $Q = x_\xi V - y_\xi U$ — контравариантные компоненты расхода; $g_{11} = x_\xi^2 + y_\xi^2$, $g_{22} = x_\eta^2 + y_\eta^2$, $g_{12} = x_\eta x_\xi + y_\eta y_\xi$ — метрические коэффициенты; $w_{(x)}$, $w_{(y)}$ — компоненты вектора скорости ветра.

Так как коэффициент турбулентного обмена определяется эмпирически и достаточно приближенно, в (4), (5) опущены диссипативные члены со вторыми и третьими производными метрических коэффициентов. При решении уравнений в трехмерной постановке также используются уравнения мелкой воды для расчета уровня. В этом случае придонное трение находится из уравнений в трехмерной постановке.

Уравнения решаются на C -сетке Аракавы полунявным конечно-разностным методом с итерацией по нелинейности. Адвективная мода, сила Кориолиса и горизонтальный турбулентный обмен аппроксимированы явно, а гравитационная мода и придонное трение — неявно с использованием центрально-разностной аппроксимации пространственных производных и аппроксимации Кранка — Николсон по времени. Для решения уравнений применяется метод расщепления второго порядка точности. С помощью спектрального метода Фурье можно показать, что схема абсолютно устойчива и недиссипативна при опускании правой части: все три собственных числа матрицы перехода равны единице. Отсутствие схемной вязкости является положительным свойством схемы, так как искусственного затухания решения нет. Высокочастотные осцилляции, возникающие за счет ошибок аппроксимации при резких изменениях метрических коэффициентов, подавляются малыми слагаемыми — диссипативными членами типа $\nabla(K\nabla\mathbf{U})$. При учете правой части появляются ограничения на шаг по времени и присутствие диссипативных членов становится необходимым.

Аппроксимация выражения для горизонтального турбулентного обмена около границ требует экстраполяции соответствующих компонент потока за пределы расчетной области. Например, аппроксимируя $P_{\eta\eta}$ в точках $(i, 1)$ около границы $\eta = \text{const}$, надо экстраполировать P -компоненты, чтобы найти значения $P_{i,-1}$. Использование условия прилипания $P = 0$ на твердой границе может привести к плохой аппроксимации прибрежного пограничного слоя при расчетах на реальных, часто достаточно грубых сетках. Поэтому для твердых боковых границ вводится закон квадратичного трения (3), аналогичный придонному. Конечно-разностная аппроксимация для компонентов расхода за пределами сетки имеет следующий вид:

$$P_{i,-1} = \frac{P_{i,1}}{1 + \frac{f_b J}{KH\sqrt{g_{11}}}|\mathbf{U}|}.$$

Сетка строится эллиптическим методом Томпсона [8]. Координаты $x(\xi, \eta)$ и $y(\xi, \eta)$ находятся как решения двух эллиптических уравнений Лапласа

$$\xi_{xx} + \xi_{yy} = 0, \quad \eta_{xx} + \eta_{yy} = 0$$

или в новых переменных

$$g_{22}x_{\xi\xi} - 2g_{12}x_{\xi\eta} + g_{11}x_{\eta\eta} = 0, \quad g_{22}y_{\xi\xi} - 2g_{12}y_{\xi\eta} + g_{11}y_{\eta\eta} = 0,$$

где $x(\xi, \eta)$ и $y(\xi, \eta)$ заданы вдоль граничных координатных линий $\xi = \text{const}$ и $\eta = \text{const}$.

Ветровой коэффициент задавался по формуле Банке — Смита [9], коэффициент придонного трения — равным 0.0026, коэффициент горизонтального турбулентного обмена задавался по формуле $\gamma\Delta^{4/3}$, где $\gamma = 0.1 \text{ м}^{2/3} \cdot \text{с}^{-1}$, Δ — шаг сетки [10].

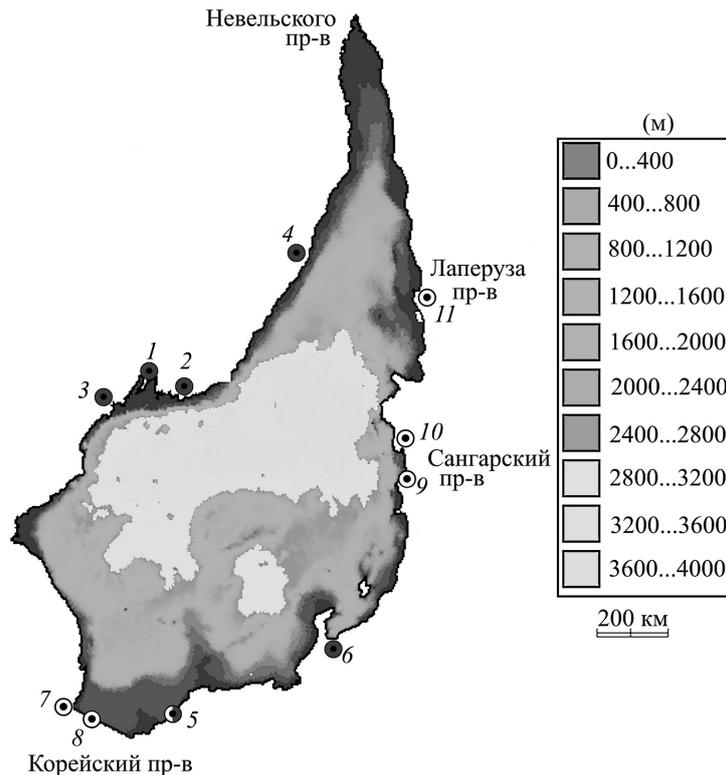


Рис. 1. Поле глубин в модели Японского моря: 1 — Владивосток, 2 — Находка, 3 — Посыет, 4 — Сосуново, 5 — Хамада, 6 — Тояма, 7 — Кванъян, 8 — Цусимахитакатсу, 9 — Симокита, 10 — Хакодате, 11 — Вакканай. Темные кружки — станции, использованные для сопоставления хода уровня, светлые — для задания граничных условий

Поле глубин задавалось по данным сайта NOAA [11] (рис. 1). Площадь акватории в модели 978 тыс. км², объем воды 1638 тыс. км³, средняя глубина 1673 м, максимальная глубина 3800 м. Расчетная сетка состоит из 205 × 437 узлов, средний шаг сетки 8.5 км, максимальный 30.5 км, минимальный 0.5 км.

На открытых границах модели сначала задавался временной ход приливных колебаний уровня, полученный по программе ТРХО7.2 [12]. В дальнейших расчетах в качестве граничных условий для Корейского пролива использовались данные наблюдений в Кванъяне, Цусимахитакатсу и Хамаде (хотя последний пункт отстоит от пролива на 150 км), для Сангарского пролива — данные Симокита и Хакодате, для пролива Лаперуза — данные Вакканай на юге и ТРХО7.2 на севере. В точках, расположенных на линии открытой границы между этими пунктами, уровни задавались с помощью линейной интерполяции. В начальный момент задавались нулевые уровни и скорости. Временной шаг этих данных — один час.

2. Результаты

В третьей декаде августа 2016 г. над Японским морем наблюдался циклогенез, который вошел в свою наиболее активную фазу в конце декады: сильные дожди и штормовые ветры, обусловленные циклоном, зародившимся в Японском море, начались днем 29 августа. На мысах ветер достигал ураганной силы 30–33 м/с. Циклон приблизился

к южному побережью Приморья 30 августа, в крае продолжались сильные, местами очень сильные дожди [13].

Тропический циклон Лайонрок утром 30 августа находился у северо-восточного побережья о. Хонсю, косвенно повлияв на режим осадков в Приморском крае. Давление в центре тайфуна на этот момент было 965 гПа, максимальная скорость ветра, по данным карт Японского метеорологического агентства, составляла 33 м/с, с порывами 49 м/с, радиусы сильного и штормового ветров достигали соответственно 472 и 120 км. Затем тайфун пересек северную часть о. Хонсю и в 12 ч (время везде приведено к ВСВ) 30 августа вышел на Сангарский пролив в стадии сильного тропического шторма глубиной 972 гПа, максимальная скорость ветра составляла 31 м/с порывами 44 м/с. Поскольку усиливающийся охотоморский антициклон заблокировал движение тропического циклона на север, он повернул на северо-запад и над Японским морем трансформировался во внетропический циклон. В 18 ч циклон подошел к восточному побережью Приморского края с давлением в центре 974 гПа, максимальной скоростью ветра 15–25 м/с в радиусе 650 км. В 0 ч 31 августа произошло объединение южного циклона и бывшего ТЦ Лайонрок в обширную область низкого давления, которая, теряя мощь, переместилась на районы северо-восточного Китая [13].

Максимальная скорость ветра по расчету достигала 31.5 м/с в 11 ч 30 августа в районе Сангарского пролива. Во Владивостоке максимальная расчетная скорость ветра равнялась 15.3 м/с в 9 ч 29 августа, по наблюдениям — 17 м/с в 15 ч 1 сентября.

Расчетная гидрометеорологическая ситуация на 0 ч и на 15 ч 30 августа показана на рис. 2. В 0 ч тайфун с давлением в центре 965 гПа еще находился над Тихим океаном, скорость ветра достигала 35 м/с. В 15 ч тайфун находился над Японским морем, давление в его центре увеличилось до 972 гПа. Изолинии уровня в открытой части моря повторяют изобары; перепад уровня примерно соответствует статическому закону “обратного барометра” $\Delta\zeta = -\Delta P_a / (\rho_0 g)$.

В течение всего периода расчетов в части Японского моря, прилегающей к заливу Петра Великого, поток воды был направлен на запад, затем, следуя береговой линии, поворачивал на юго-запад, создав штормовой нагон с максимальным для центральной и южной частей Японского моря подъемом воды в Амурском заливе (до 60 см) и в районе залива Посьета (до 70 см) (рис. 3). Абсолютный максимум уровня получен в проливе Невельского — 170 см.

На рис. 4 сопоставлены расчетный и наблюдаемый временной ход уровня во Владивостоке, в Находке, заливе Посьет, Сосуново, Хамаде и Тояме. Статистические характеристики этого сравнения приведены в таблице. Первые двое суток расчета при сравне-

Статистические характеристики сопоставления расчетного и наблюдаемого временного хода уровня 29.08 — 03.09.2016

Название пункта	Рассеяние, см	Средняя абсолютная ошибка, см	Коэффициент корреляции	Расчетная/измеренная дисперсия, см
Владивосток	14	11	0.85	19/26
Находка	12	9	0.85	21/21
Посьет	10	8	0.89	22/21
Сосуново	15	11	0.76	10/22
Хамада	8	7	0.81	14/13
Тояма	8	7	0.56	9/9

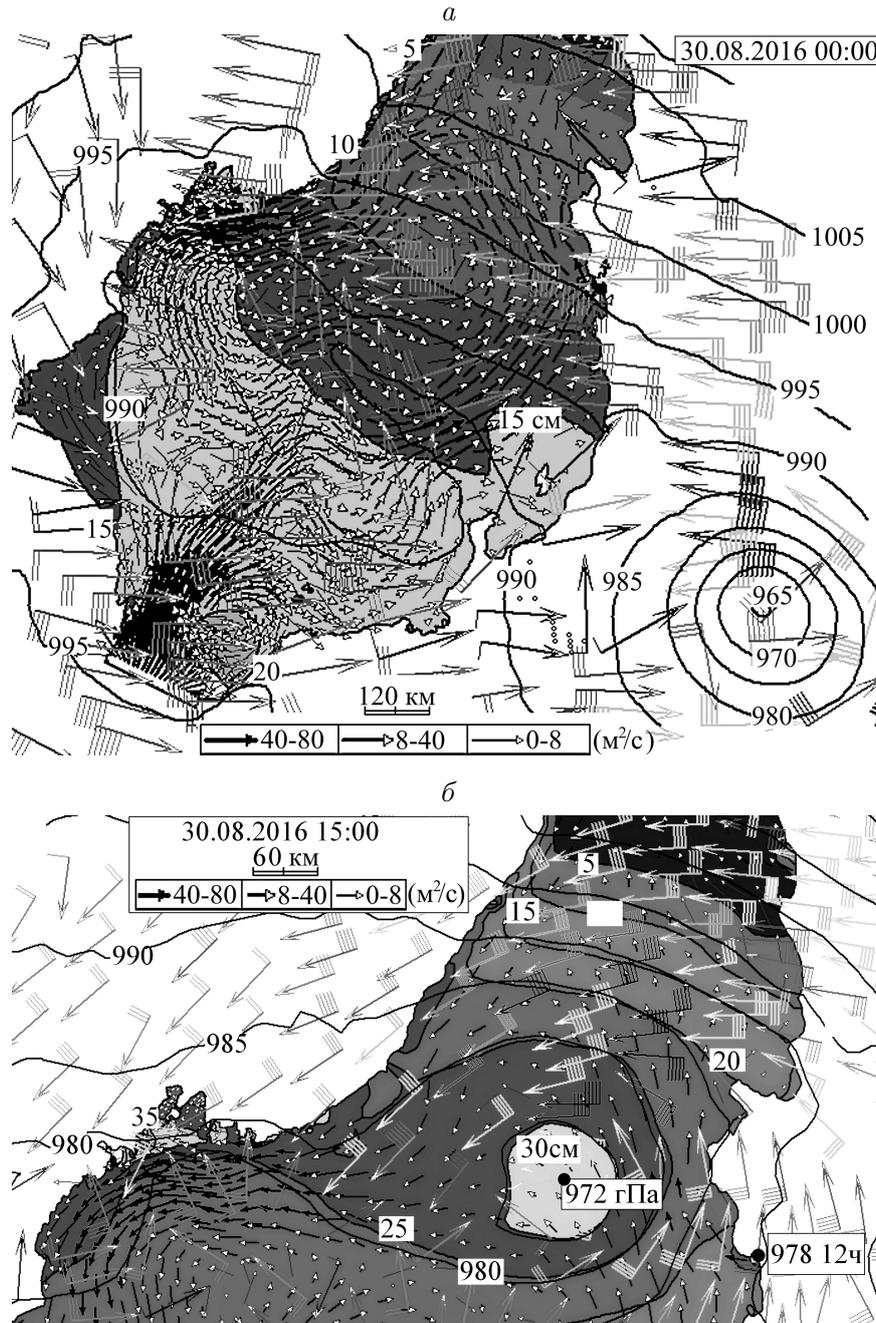


Рис. 2. Изобары (гПа), векторы ветра на 10 м перьями, изолинии уровня (см) и векторы удельных расходов ($\text{м}^2/\text{с}$) в 0 ч (а) и в 15 ч (б) 30.08.2016 г. Одна палочка пера вектора ветра соответствует 5 м/с

нии не учитывались. Расчетный ход уровня в целом соответствует данным наблюдений. Наименьшее рассеяние $S^2 = \frac{1}{N-1} [(s_i - \bar{s}) - (s_{\text{набл}_i} - \bar{s}_{\text{набл}})]^2$ получено для японских станций Хамада и Тояма (8 см), среди российских станций — это Посыет (10 см) и Находка (12 см). Наибольшая ошибка хода уровня получена для Сосуново (15 см). Для Владивостока рассеяние составило 14 см. Отметим, что в оперативной системе прогноза наводнений в Санкт-Петербурге [14], основанной на программе CARDINAL, модели Балтийского моря и метеорологической модели WRF, рассеяние находится в пределах 7 см.

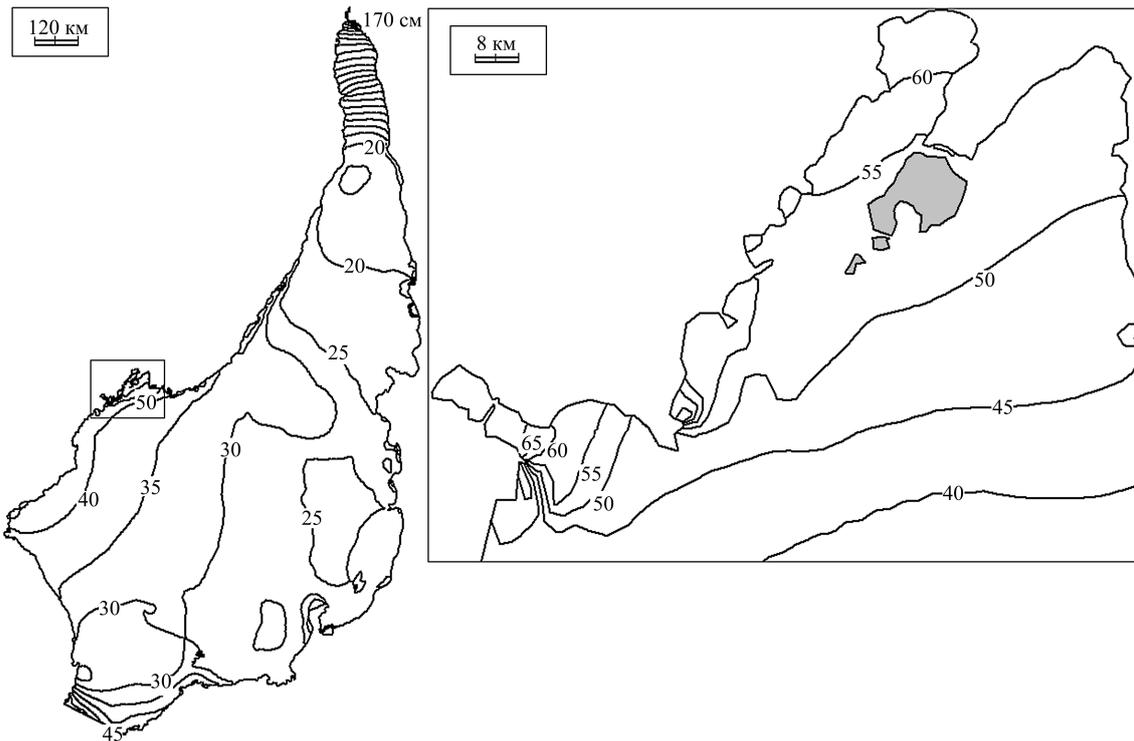


Рис. 3. Расчетные максимальные уровни за 27.08 — 04.09.2016, см

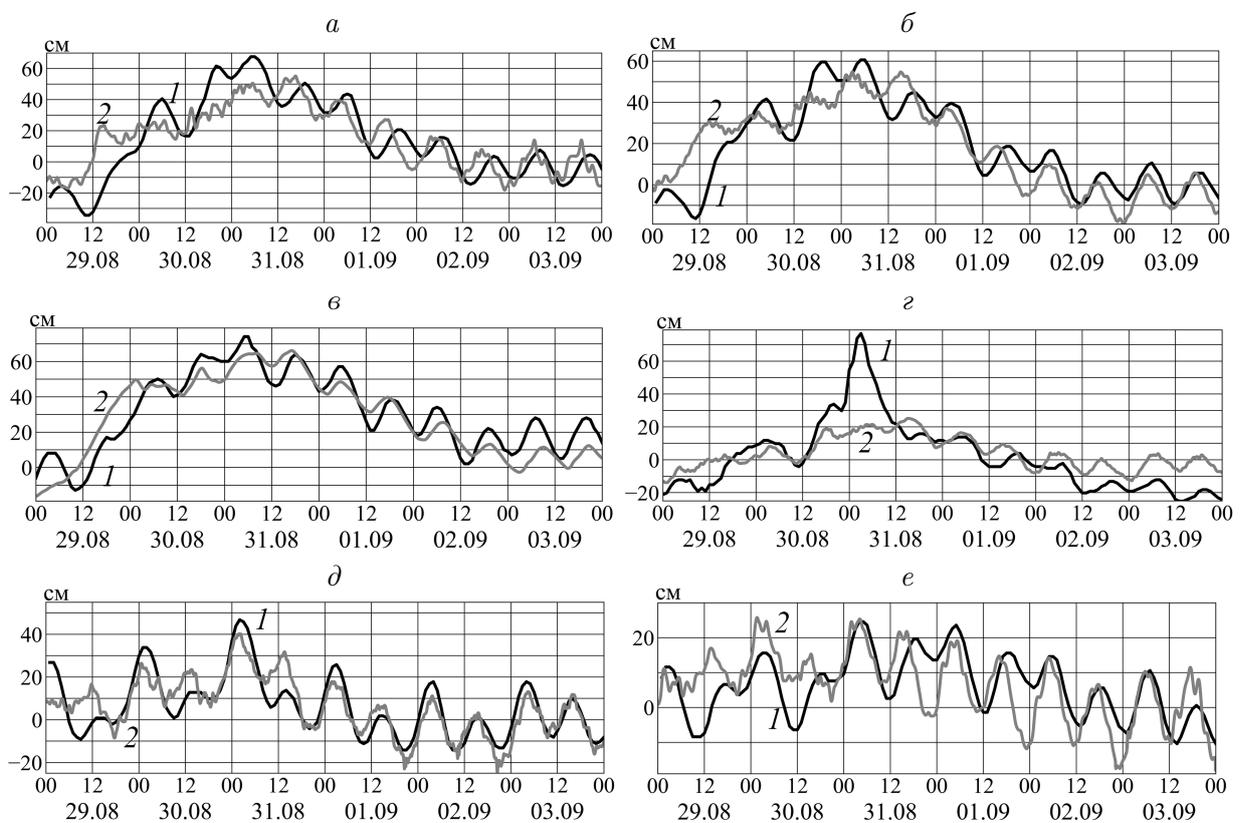


Рис. 4. Наблюденный (1) и расчетный (2) ход уровня во Владивостоке (а), в Находке (б), в заливе Посыет (в), в пунктах Сосуново (г), Хамада (д) и Тояма (е) за 29.08 — 03.09.2016

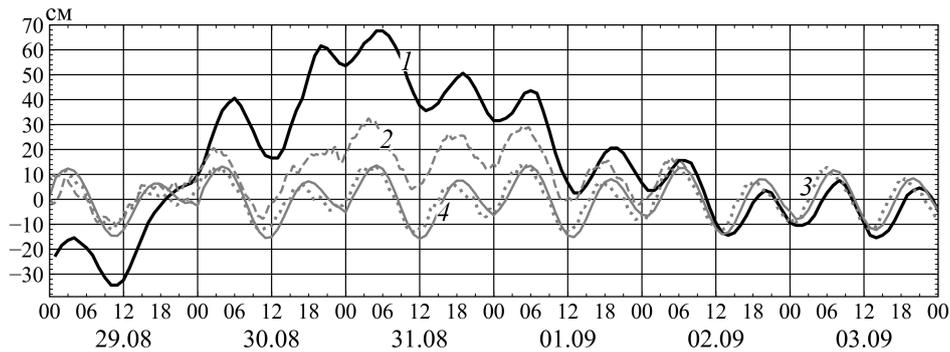


Рис. 5. Временной ход уровня во Владивостоке 29.08 — 03.09.2016: 1 — наблюдения, 2 — расчет без учета ветра, 3 — расчет без учета ветра и атмосферного давления, 4 — расчет приливных колебаний по программе TPXO7.2

На рис. 5 показано влияние ветра и градиентов атмосферного давления на подъем уровня во Владивостоке, который по данным наблюдений составил 110 см. Амплитуда приливных колебаний лежит в пределах 30 см, при этом расчетные значения, полученные без учета ветра и давления, хорошо согласуются с данными TPXO7.2.

Моделью не воспроизведен подъем уровня в Сосуново и существенно занижен подъем во Владивостоке, наблюдавшийся с полудня 30 августа до утра 31 августа. Был сделан ряд расчетов с различными параметрами: увеличение в два раза ветрового коэффициента, уменьшение шага расчета по модели Японского моря с 20 до 10 с, уменьшение шага метеоданных с трех часов до одного, использование различных версий WRF, использование в качестве условий на открытых границах данных наблюдений вместо приливных колебаний, полученных по программе TPXO7.2, расчет в трехмерной (баротропной) постановке, уменьшение в два раза коэффициента придонного трения. Однако существенного улучшения это не дало, при этом наибольшее влияние оказало изменение условий на открытых границах. Удалось только уменьшить рассеяние — наиболее важный статистический показатель — для Владивостока с 20 до 14 см. Мареограф Владивостока находится в бухте Золотой Рог, Сосуново — в устье реки Светлая в 500 м от берега, вероятно, здесь было влияние стока дождевых вод. Площадь бухты Золотой Рог 4 км². Дополнительный подъем уровня в бухте, не полученный при моделировании, составил около 30 см за 10 ч. Если весь сток в бухту в этот период из-за подпора оставался в ней, то для подъема уровня на 30 см достаточно притока всего в 33 м³/с.

Расходы воды через проливы носили знакопеременный характер, достигая 8.5 Sv в Корейском проливе, 4 Sv в Сангарском и 1.5 Sv в проливе Лаперуза.

Выводы и обсуждение

Разработанная модель Японского моря при задании полей давления и ветра по модели WRF-ARW в целом правильно описывает ход уровня при прохождении тайфуна Лайонрок. Получена структура течений в Японском море при прохождении этого тайфуна. Весь период расчета в акватории, прилегающей к заливам Петра Великого и Посьета, поток был направлен на юго-запад, что привело здесь у берегов к значительному подъему уровня (штормовому нагону). При выходе тропического циклона на акваторию получено поднятие уровня в открытой части моря, примерно соответствующее закону “обратного барометра”.

Вместе с тем не был смоделирован подъем уровня в Сосуново, существенно занижен подъем уровня во Владивостоке, наблюдавшийся с полудня 30 августа до утра 31 августа. Изменения различных параметров расчета (увеличение в два раза ветрового коэффициента, уменьшение временного шага расчета по модели Японского моря, уменьшение шага метеоданных с трех часов до одного, применение различных версий WRF, использование в качестве условий на открытых границах данных наблюдений вместо приливных колебаний, полученных по программе TPXO7.2, расчет в трехмерной (баротропной) постановке, уменьшение в два раза коэффициента придонного трения) существенного улучшения не дали, при этом наибольшее влияние оказало изменение условий на открытых границах.

Мареограф Владивостока находится в глубине длинной и узкой бухты Золотой Рог, в которую впадают река Объявления и весь сток с прилегающих сопок Владивостока. Измеритель уровня в Сосуново находится в устье реки Светлая в 500 м от берега. Вероятно, в обоих случаях локальное влияние на уровень оказали ветровой подпор со стороны моря и аномальный сток дождевых вод.

Благодарности. Авторы благодарят за предоставленные данные о ежечасных колебаниях уровня на корейских и японских станциях за период прохождения тайфуна главного научного сотрудника Корейского института океанологических наук и технологий доктора наук Ким Кён Ока (Kyeong Ok Kim).

Список литературы / References

- [1] **Вербицкая Е.М., Романский С.О.** Результаты испытаний краткосрочных оперативных прогнозов мезомасштабной модели WRF-ARW “ХАБ-15” в пунктах Дальневосточного региона России // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2016. № 43. С. 32–62.
Verbitskaya, E.M., Romanskiy, S.O. Test results of short-term operational forecasting of mesoscale model WRF-ARW “HAB-15” in the points of Russian Far East // Rezul'taty Ispytaniya Novykh i Uovershenstvovannykh Tekhnologiy, Modeley i Metodov Gidrometeorologicheskikh Prognozov. 2016. No. 43. P. 32–62. (In Russ.)
- [2] WRF-ARW users guide v. 3.4. Available at: http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.4/ARWUsersGuideV3.pdf (accessed 18.08.2018).
- [3] Hydrodynamic and water pollution computer program CARDINAL. Available at: <http://cardinal-hydrosoft.com> (accessed 18.08.2018).
- [4] **Клеванный К.А., Смирнова Е.В.** Использование программного комплекса CARDINAL // Журн. ун-та водных коммуникаций. 2009. № 1. С. 153–162.
Klevannyu, K.A., Smirnova, E.V. CARDINAL code guide // Zhurnal Un-ta Vodnykh Kommunikatsiy. 2009. No. 1. P. 153–162. (In Russ.)
- [5] **Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В.** Основные океанологические задачи теории мелкой воды. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 300 с.
Voltsinger, N.E., Pyaskovskiy, R.V. Main oceanographic problems of the theory of shallow water. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968. 300 p. (In Russ.)
- [6] **Launder, B.E., Morse, A., Rodi, W., Spalding, D.B.** Prediction of free shear flows — a comparison of the performance of six turbulence models // Proc. of the Conf. on Free Turbulent Shear Flows. Hampton, Virginia, USA, 1972. Washington, D.C.: NASA, 1973. P. 361–422.

- [7] **Вольцингер Н.Е., Клеванный К.А., Пелиновский Е.Н.** Длинноволновая динамика прибрежной зоны. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 272 с.
Voltsinger, N.E., Klevannyu, K.A., Pelinovskiy, E.N. Long-wave dynamics of the coastal zone. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. 272 p. (In Russ.)
- [8] **Thompson, J.F., Warsi, Z.U.A., Mastin, C.W.** Numerical grid generation. Foundation and application. New York: Elsevier North-Holland, 1985. 502 p.
- [9] **Smith, S.D., Banke, E.G.** Variation of the sea-surface drag coefficient with wind speed // Quarterly J. of the Royal Meteorological Soc. 1975. Vol. 101. P. 665–673.
- [10] **Okubo, A., Ozmidov, R.V.** Empirical dependence of the coefficient of the horizontal turbulent diffusion in the ocean on the scale of the phenomenon in question // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 1970. Vol. 6, No. 5. P. 534–536.
- [11] NOAA. National Centers for Environmental Information. Grid extract. Available at: <https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/wcs-client> (accessed 18.08.2018).
- [12] The OSU TOPEX/Poseidon Global Inverse Solution TPXO. Available at: <http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html> (accessed 18.08.2018).
- [13] Ежемесячный гидрометеорологический бюллетень ДВНИГМИ. Тропические циклоны. Разд. V. 2016. № 8. Адрес доступа: http://ferhri.org/images/stories/ferhri/Bulletins/Bul_2016/8/2016.08_ch5_typhoon.pdf (дата обращения: 18.08.2018).
Monthly hydrometeorological bulletin of FERHRI. Tropical Cyclones. Pt V. 2016. No. 8. Available at: http://ferhri.org/images/stories/ferhri/Bulletins/Bul_2016/8/2016.08_ch5_typhoon.pdf (accessed 18.08.2018). (In Russ.)
- [14] **Klevannyi, K.A., Kolesov, A.M., Mostamandi, M.-S.V.** Predicting the floods in St. Petersburg and the eastern part of the gulf of Finland under conditions of operation of the flood prevention facility complex // Russ. Meteorology and Hydrology. 2015. Vol. 40, No. 2. P. 115–122.

Поступила в редакцию 19 ноября 2018 г.

Analysis of storm surge generated by typhoon Lionrock on the coast of Primorski Krai in August — September 2016 using the numerical modelling

KLEVANNYY, KONSTANTIN A.^{1,*}, SOKOLOV, OLEG V.², ROMANSKIY, STANISLAV O.²

¹Limited Liability Company “Cardinal-Soft”, St Petersburg, 195256, Russia

²Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok, 690091, Russia

*Corresponding author: Klevannyi, Konstantin A., e-mail: kklevanny@mail.ru

The main goal of the work is the analysis of storm surges on the coast of Primorski Krai in August–September 2016 caused by typhoon Lionrock. This study is conducted using hydrodynamic modelling. The basis of modelling is the program CARDINAL and numerical model of the Sea of Japan built on shallow water equations in two-dimensional space. Input pressure and wind fields for the oceanographic model are simulated by operational regional forecasting model WRF-ARW. In general, the numerical model of the Sea of Japan with the mentioned input pressure and wind fields simulate well variations of sea level during the passage of typhoon Lionrock. The scheme of simulated sea currents is obtained.

During the whole period of calculation the direction of a flow on the area of Peter the Great Gulf and Posyet Bay was southwest and it is led to a significant sea level rising alongshore of these bays. When the typhoon came to the Sea of Japan the sea level was rising in the open part of the sea due to drop of atmospheric pressure. However, the rise in the level at Sosunovo was not modelled and the rise in the level in Vladivostok, observed from the noon on August 30 until the morning of August 31, was significantly underestimated. Tuning the model (doubling of wind coefficient, decreasing of time step, decreasing of meteorological values assimilation time step from three to one hour, use of different variants of WRF model, use of observed data on the open boundaries instead of simulated data of TPXO v. 7.2) has not changed results significantly. The tide-gauge of Vladivostok is located in the long and narrow Zolotoi Rog Bay, into which the Ob'yasnenie River and the entire runoff from the adjacent hills of Vladivostok flow. The tide-gauge in Sosunovo is located at the mouth of the Svetlaya River, 500 m from the sea shore. Probably, in both cases, local effect on the level was due to locking discharge of rivers by wind and the anomalous flow of rainwater.

Keywords: storm surges, typhoon Lionrock, mathematical modelling, program system CARDINAL, Sea of Japan.

Cite: Klevannyy, K.A., Sokolov, O.V., Romanskiy, S.O. Analysis of storm surge generated by typhoon Lionrock on the coast of Primorski Krai in August — September 2016 using the numerical modelling // Computational Technologies. 2019. Vol. 24, No. 2. P. 78–89. (In Russ.) DOI: 10.25743/ICT.2019.24.2.007.

Acknowledgements. The authors would like to thanks Dr. Kyeong Ok Kim (principal scientist at Korea Institute of Ocean Science and Technology) for the hourly sea level observations of Korean and Japanese stations during the passage of typhoon Lionrock.

Received November 19, 2018