УДК 551.461 + 551.468

© *А. С. Аверкиев*
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
asav@rshu.ru

ОСОБЕННОСТИ ШТОРМОВЫХ НАГОНОВ В ФИНСКОМ ЗАЛИВЕ, ФОРМИРУЕМЫХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫМИ ЦИКЛОНАМИ, ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ КОМПЛЕКСА ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ОТ НАВОДНЕНИЙ

Представлены результаты моделирования подъемов уровня в Финском заливе при прохождении экстремальных и реально наблюдавшихся циклонов над Балтийским морем. В модели Балтийского моря, воспроизводящей штормовые нагоны, разработан блок аналитического задания поля атмосферного давления при прохождении интенсивных наводненческих циклонов. Это позволяет воспроизводить широкий спектр траекторий и параметров опасных циклонов и вызываемых ими колебаний уровня воды в Финском заливе. В численных экспериментах учтен режим работы Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС). Показано, что при закрытии КЗС в Невской губе возникает локальный наклон уровня, который может достигать опасных значений. Результаты моделирования сравниваются с данными наблюдений за уровнем в Финском заливе и Невской губе во время наводнений осенью 2011 и 2013 гг. Несмотря на то, что наводнения в Санкт-Петербурге практически предотвращены, более тщательный анализ модельных расчетов и прогнозов и учет особенностей конкретных циклонов позволят маневрировать затворами КЗС наиболее оптимальным образом.

Ключевые слова: штормовые нагоны, циклоны, моделирование, Комплекс защитных сооружений.

Эффективное предупреждение и минимизация последствий опасных и катастрофических природных явлений, таких как тайфуны, тропические ураганы, штормовые нагоны и наводнения, в настоящее время выполняется с помощью гидродинамических моделей. Многочисленные исследования, основанные как на наблюдениях, так и на численных экспериментах, показывают, что значительные колебания уровня и наводнения решающим образом определяются полями ветра и атмосферного давления и формированием длинной волны при прохождении интенсивных циклонов. Численные эксперименты на известной гидродинамической модели BSM6 (Baltic Sea Model, версия 6) были направлены на выяснение вопроса о подъемах уровня в разных частях Финского залива и Невской губы при задании экстремальных параметров циклонов над Балтийским морем и при максимальных градиентах и скорости ветра. Именно такие условия приводят к особо опасным подъемам уровня и наводнениям в Финском заливе. В последние два года остро встает вопрос о возможных дополнительных подъемах уровня и особенностях наводнений в восточной части Финского залива в условиях проектного функционирования КЗС. Выявленные особенности наводнений при расчетах на модели BSM6 в Невской губе и вне КЗС в восточной части Финского залива для экстремальных случаев и на примере сильных наводнений последних лет подтвердились данными наблюдений во время наводнений 2011 и 2013 гг.

Идеализированная модель полей давления. Значительные подъемы уровня в Балтийском море и в Финском заливе вызывают быстрые, глубокие и «компактные» циклоны. Назовем их «активные» циклоны, хотя в метеорологии показателем активности ци-

клона служит отношение количества осадков, выпавших при прохождении циклона к скорости падения давления, а интенсивным называется циклон, давление в центре которого ниже 970 ГПа [1]. Модельные эксперименты для изучения влияния отдельных параметров таких циклонов (скорость и траектория движения, минимальное давление в центре, максимальный градиент и максимальный ветер, расстояние от центра до зоны максимального ветра и др.) на высоту подъемов уровня дают наглядные и достаточно точные результаты [2], если поле давления в окрестности такого циклона задано аналитически. Впервые такое аналитическое задание поля давления для идеализированного циклона (тайфуна) с круговыми изобарами было предложено в [3]

$$P_a^{'}(r) = P_\infty - \frac{\Delta P}{\sqrt{1+\left(\frac{r}{r_T}\right)^2}}, \tag{1}$$

где $P_a^{'}$ — давление на расстоянии r от центра циклона $x_c(t)$, $y_c(t)$; P_∞ — давление за пределами циклона; ΔP — разность между P_∞ и давлением в центре циклона; r_T — расстояние от центра циклона до радиуса максимальной скорости ветра («компактность» циклона).

В работах [2, 4] было показано, что активные циклоны над Балтийским морем действительно часто имеют близкие к круговым изобары, и радиус максимального градиента давления и ветра четко выражен на приземных картах. Кроме того, в [4] были предложены и реализованы в численных экспериментах усовершенствования формулы (1). Во-первых, введена зависимость ΔP от времени в виде:

$$\Delta P(t) = \Delta P_0 \exp\left(-\left[\frac{t-T_0}{\Delta T}\right]^2\right). \tag{2}$$

Во-вторых, учтено усиление градиента давления и ветра на холодном фронте:

$$P_a(x,y,t) = P_a\left[1-\gamma_1 \exp\left(-\frac{|\vec{r}-r_T|}{r_T}\right)\exp\left(-\gamma_2\frac{\alpha-\alpha_0}{\alpha_2-\alpha_1}\right)\right]. \tag{3}$$

Здесь T_0 — момент времени, когда давление в центре минимальное, а разность ΔP_0 — максимальна; ΔT — параметр, определяющий скорость углубления и заполнения циклона; γ_1 — коэффициент, определяющий интенсивность холодного фронта; γ_2, α_1 и α_2 — коэффициенты, определяющие ширину и положение этого фронта в циклоне; $\alpha_0 = (\alpha_2+\alpha_1)/2$, $\alpha = \mathrm{arctg}[(x_c - x)/(y_c - y)]$, $x_c > x$, $y_c > y$ (холодный фронт расположен к юго-западу от центра циклона. Для этих коэффициентов на основе анализа синоптических карт были получены следующие значения: $\gamma_1 = 0.005$, $\gamma_2 = 3.0$, $\alpha_1 = 10° r / r_T \frac{\pi}{180}$, $\alpha_2 = \alpha_1 + 40° \frac{\pi}{180}$.

Далее, в работах [2, 4, 5] представлены результаты численных экспериментов по изучению влияния перечисленных параметров идеализированного циклона на экстремальные значения уровня в Финском заливе и в других пунктах на побережьях Балтики.

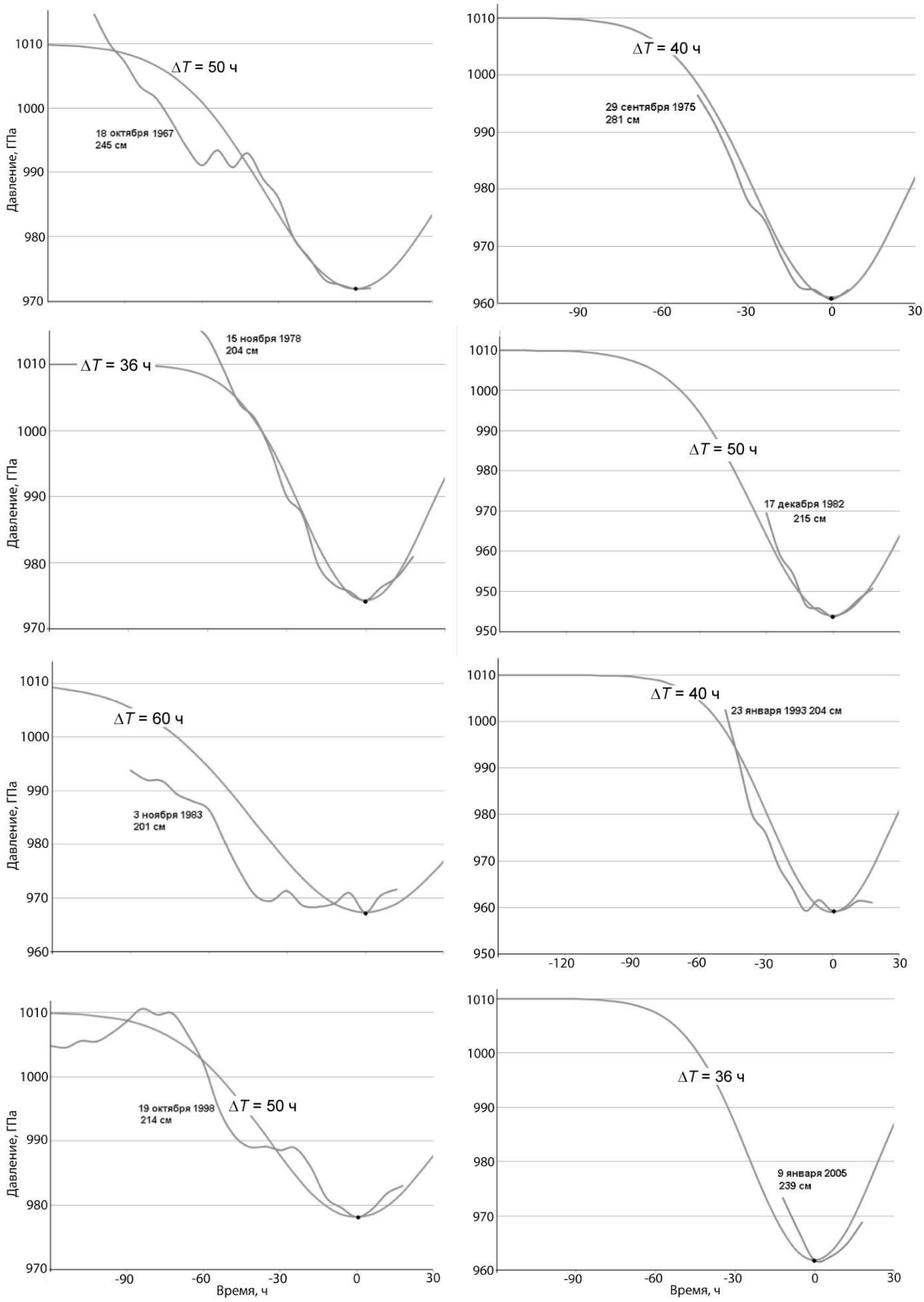

Рис. 1. Временной ход давления в центре восьми наводненческих циклонов и аппроксимация этого хода с помощью зависимостей (1), (2) при P_∞ = 1010 ГПа.

P_0 — абсолютное минимальное давление в центре циклона;

ΔT — искомый параметр (получен в пределах 35—60 ч).

Так, в [2] получено, что высота подъема уровня монотонно растет с увеличением параметра ΔT, поэтому важна корректная оценка этого параметра. Перед выполнением ряда численных экспериментов в [5] был рассмотрен ход давления в центре 8 глубоких циклонов (рис. 1), вызвавших наводнения в Санкт-Петербурге выше 2 м [6], и проведена аппроксимация этого хода формулами (1)—(3). Видно, во-первых, что формулы хорошо аппроксимируют временной ход давления в центре циклонов и, во-вторых, за верхнюю оценку ΔT можно принять значение 50 ч.

Оценка максимального перепада давления ΔP_0 в глубоких циклонах приведена в [4], где за максимальное было принято значение перепада в 50 ГПа (от 1010 до 960 ГПа).

В табл. 1 приведены значения параметра r_T, полученные из анализа синоптических карт для семи глубоких циклонов. При заданном ΔP_0 наиболее опасны компактные циклоны, в которых градиент давления максимален на меньшем расстоянии от центра. Для расчетов было взято минимальное из приведенных значение r_T равное 200 км (циклон Erwin, 09.01.2005).

Таблица 1

Радиусы максимального давления и максимального ветра в нескольких интенсивных циклонах, наблюдавшихся над регионом Балтийского моря

Дата	28.10.2006	20.01.2007	04.01.2012	10.01.2007	11.01.2007	24.11.2008	09.01.2005
r_T, км	450	450	420	360	270	250	200

В [2, 4] на основе численных экспериментов было показано, что наибольшие подъемы уровня в восточной части Финского залива вызывают циклоны, движущиеся со скоростью примерно 50 км/ч на восток (или восток—северо-восток) к северу от Финского залива на расстоянии от оси залива, равном радиусу максимального ветра в циклоне r_T (при r_T = 200 км это примерно 61.5°с.ш.) В [6] приведены оценки скорости движения 23 циклонов, вызвавших подъемы уровня воды в Санкт-Петербурге свыше 2 м на основе анализа синоптических карт, и показано, что их средняя скорость составляла 63 км/ч, что близко к наиболее опасной скорости в наших экспериментах.

Для расчетов подъемов и понижений уровня воды использовалась модель Балтийского моря — BSM6, созданная с помощью программного комплекса CARDINAL (Coastal ARea Dynamic INvestigation ALgorithm, алгоритм исследования динамики прибрежной зоны) — это программа для моделирования длинноволновой динамики и распространения загрязняющих веществ в произвольной акватории и использующая систему уравнений мелкой воды в двумерной постановке и полную систему уравнений в гидростатическом приближении для трехмерных условий [7, 8]. Модель (версии от BSM3 до BSM6) с декабря 1999 г. по настоящее время работает в Санкт-Петербургском центре по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с региональными функциями (СПб ЦГМС-Р) в автоматическом режиме для прогноза уровня воды в Санкт-Петербурге. При оперативных расчетах колебаний уровня по модели Балтийского моря BSM6 [9] с использованием данных атмосферной модели HIRLAM (High Resolution Local Area Model) наилучшие результаты получены при использовании для коэффициента сопротивления морской поверхности, определенного для скорости по формуле Банке-Смита, [10]

$$C_D = (0.63 + 0.066U_{10})10^{-3},$$

где U_{10} — скорость ветра на стандартном уровне измерений 10 м.

В большинстве представленных численных экспериментов использовалось такое задание касательного напряжения на поверхности. Временной ход уровня в численных экспериментах фиксировался в нескольких пунктах, включая Сосновый Бор (ЛАЭС), Выборг, Кронштадт, Санкт-Петербург (водомерный пост — «в/п Горный институт») и др., пред-

ставленных на врезке рис. 2. В расчетах [5] и более поздних учитывалось современное состояние КЗС Санкт-Петербурга при открытых и закрытых водопропускных и судопропускных сооружениях.

Исследования влияния закрытия КЗС на подъемы уровня в Невской губе Финском заливе. Рассмотрим, как может повлиять на значительные и максимальные подъемы уровня в восточной части Финского залива работа КЗС Санкт-Петербурга от наводнений.

В [5] была сделана оценка влияния закрытия КЗС на дополнительный подъем уровня в восточной части Финского залива при экстремальном наводнении, связанный с закрытием затворов КЗС.

На рис. 2 приведены результаты расчета, когда КЗС закрывается на период наводнения (параметры циклона — экстремальные). Закрытие всех створов задано в момент повышения уровня у судопропускного сооружения С-1 выше 1 м, открытие — при спаде и при выравнивании уровня по обе стороны от КЗС.

Максимальные подъемы уровня в пунктах за пределами КЗС достигали 550—580 см, (примерно такие же значения наблюдались в расчетах и в Санкт-Петербурге при открытом КЗС). Закрытие привело в модельных расчетах к дополнительному подъему уровня в пунктах за пределами КЗС на 10—16 см. Из данных расчета, представленных на рис. 2 видно также, что при закрытом КЗС в акватории Невской губы происходит накопление воды за счет стока р. Невы. Этот результат был ожидаем, т. к. расход р. Невы хорошо известен, но важной особенностью является формирование наклона (или перепада) уровня до 1.5 м при нагоне от КЗС до стрелки Васильевского острова, где находится в/п Горный институт, т. е. на расстоянии в 25 км (ср. кривые *1* и *2*, рис. 2). Это оказывается дополнительным опасным следствием длительного закрытия КЗС.

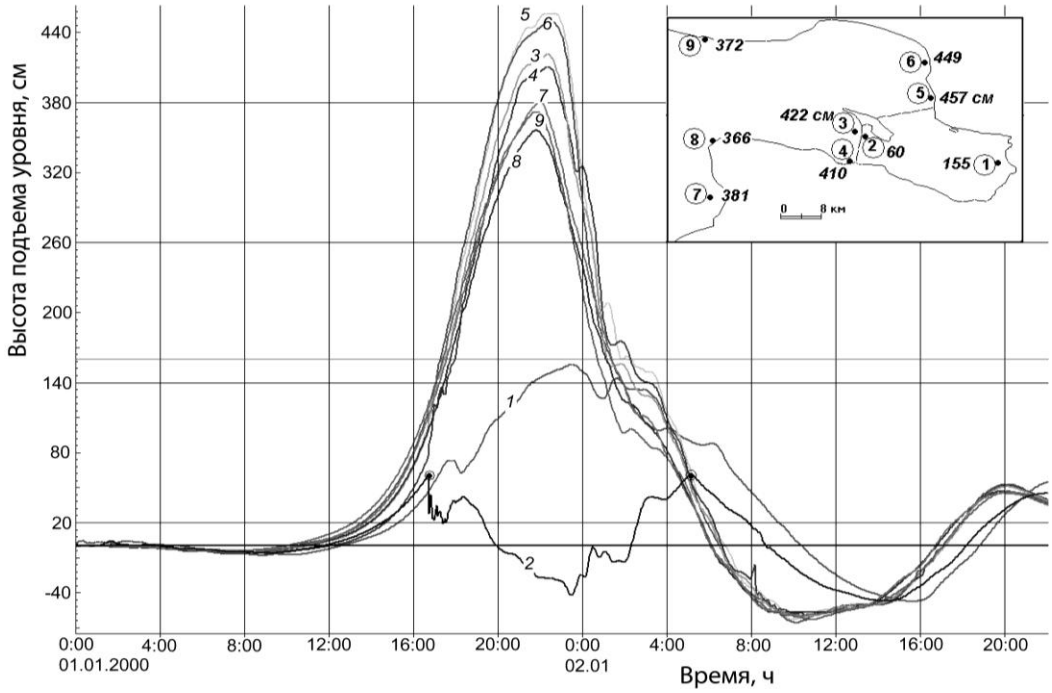

Рис. 2. Рассчитанный временной ход уровня в различных пунктах восточной части Финского залива при прохождении экстремального модельного циклона и при закрытом КЗС.
Приведены кривые для точек и пунктов, показанных на врезке: Горный институт (*1*), судопропускное сооружение С-1; Невская губа, внутри КЗС (*2*); судопропускное сооружение С-1, Финский залив, вне КЗС (*3*); южная оконечность «дамбы», вне КЗС (*4*); северная оконечность «дамбы», вне КЗС, пос. Александровский (*5*); г. Сестрорецк (*6*); г. Сосновый Бор (*7*); пос. Шепелево (*8*); пос. Озерки (*9*).

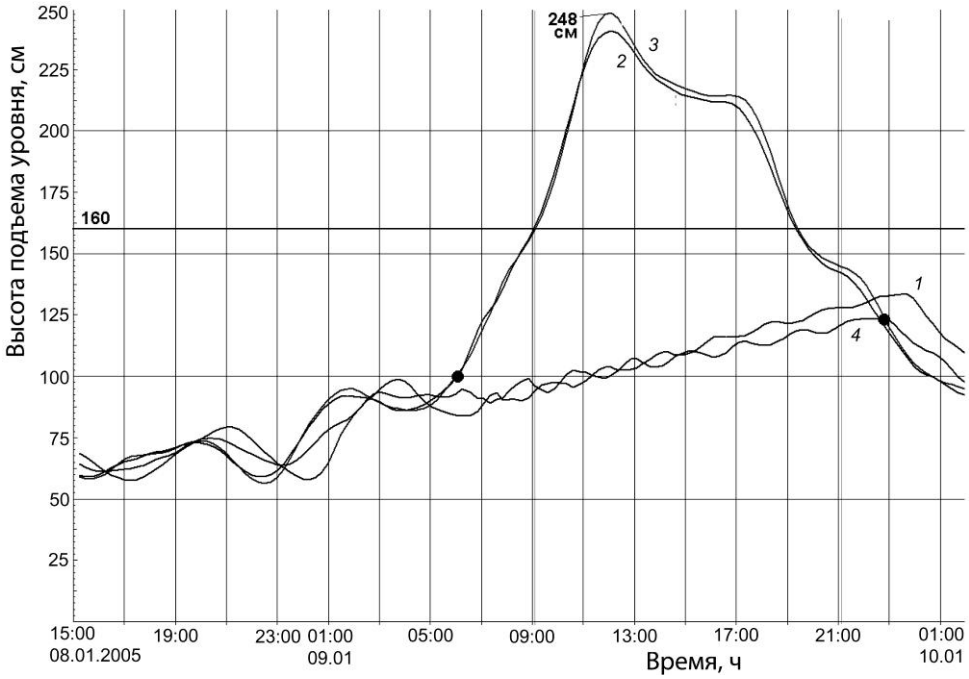

Рис. 3. Расчетный временной ход уровня на в/п Горный (*1*), у С-1 со стороны Финского залива (*2*), у Сестрорецка (*3*) и у С-1 со стороны Невской губы (*4*) при наводнении, аналогичном 09.01.2005.
КЗС в проектном состоянии и закрывается на период наводнения;
показаны моменты закрытия и открытия КЗС.

На рис. 3 приведены результаты моделирования подъема уровня в случае прохождения модельного циклона с параметрами, близкими к тем, что были в циклоне 09.01.2005, вызвавшем наибольший подъем уровня за последнее десятилетие. Видно, что внутри КЗС в Невской губе происходит подъем уровня, причем у судопропускного сооружения С-1 (кривая *4*) подъем на 20 см меньше, чем у Горного института (кривая *1*).

Для подтверждения или опровержения этого важного экспериментального вывода, а также для уточнения значений возможных превышений уровня в открытой части Финского залива при закрытом КЗС, необходимы достоверные данные об уровне на нескольких участках КЗС внутри сооружений, на их внешней стороне, а также и за пределами КЗС в других пунктах на побережье Финского залива. КЗС был официально открыт в августе 2011 г., и за прошедшее время было предотвращено по крайней мере 4 наводнения. В период 2011—2012 г. таких доступных данных об уровне не было, а значения уровня на «традиционных» водомерных постах (Кронштадт и Горный институт) во время закрытия КЗС отражают уровень, сформированный в Невской губе, изолированной от нагона в заливе. В прилегающей к КЗС акватории со стороны Финского залива в курортном районе Лисий Нос—Александровский—Сестрорецк по проекту «Новый берег» намечен намыв 377 га островов под малоэтажный элитный жилой район и коммерческие объекты. Поэтому становится еще более важным фиксировать фактический уровень (в любое время, в том числе при закрытии КЗС) как в этом районе, так и еще в нескольких пунктах на побережье и в открытой части залива.

28 ноября 2011 г. закрытием всех сооружений КЗС было впервые предотвращено наводнение в С.-Петербурге. По прогностическому расчету CARDINAL-BSM6 к 7 ч ожидался подъем уровня до 171 см. Закрытие КЗС было завершено к 1 ч 28 ноября, а открытие было произведено около 10 ч 28 ноября. Данные о времени закрытия и открытия КЗС здесь и далее цитируются с официального сайта Дирекции КЗС [11], время московское. При закрытом КЗС со стороны Финского залива уровень по оценкам доходил до 195 см. Данных

по пунктам, расположенным с внешней стороны КЗС (пос. Александровский, Сестрорецк, м. Дубовский и др.) не было, но известно, что ночью они были залиты.

Более сложная ситуация возникла при двойном наводнении 26—27 декабря 2011 г., обусловленном прохождением циклона Quirin. По модели HIROMB (HIgh Resolution Operational Model for the Baltic Sea) Шведского Метеорологического и Гидрологического института (SMHI Swedish Meteorological and Hydrological Institute) [12] прогнозировались подъемы воды до 261 см в 17 ч 26 декабря и до 223 см в 17 ч 27 декабря (рис. 4).

Более детальная версия модели HIROMB (рис. 4) и модель BSM6 давали меньшие прогностические значения. В соответствии с прогнозом, КЗС необходимо было закрыть два раза. Первый раз КЗС был закрыт с 7 ч 26 декабря до 1 ч 27 декабря (рис. 4). Затем судопропускной канал С-1 был открыт и через него прошли суда. Это было правильным и необходимым решением, т. к. уровень в С.-Петербурге превысил отметку 160 см. В 9 ч 27 декабря КЗС снова был закрыт из-за подхода второй нагонной волны. Открыть КЗС стало возможным почти через сутки — утром 28 декабря. Вода в Невской губе поднялась к 7 ч 29 декабря до отметки 170 см на в/п Горный институт (рис. 4), т. е. фактически 309-е наводнение в С.-Петербурге предотвратить не удалось (за отметку наводнения принят уровень в 160 см БС). Сравнивая ход и максимальный подъем уровня в Кронштадте и на в/п Горный институт при закрытом КЗС, уже тогда можно было сделать вывод о том, что действительно создается нагон от «дамбы» к дельте Невы, т. к. уровень в Кронштадте был на 30—40 см ниже, чем у Горного института. Второй важный вывод заключался в том, что КЗС нельзя закрывать на длительный срок или закрывать заранее. Простой расчет показывает, что при скорости подъема уровня в замкнутой акватории примерно на 3 см в час за счет стока р. Невы, уровень поднимется, при закрытии КЗС на отметке 100 см на в/п Горный институт, до 160 см там же через 20 ч.

По косвенным оценкам, подъем уровня в пос. Александровский 26 декабря 2011 г. был примерно на 10 см меньше, чем при наводнении 9 января 2005 г., т. е. подъем оказался близким к прогнозируемому и весьма значительным. На следующий день 27 декабря подъем уровня был на 20—30 см меньше, чем 26 декабря.

29 октября 2013 г. закрытием КЗС было предотвращено наводнение, вызванное интенсивным и быстрым циклоном, который до этого привел к наводнениям в Великобритании и в Европейских странах (в средствах массовой его назвали «Святой Иуда», в европейском центре прогнозов — Christian). С 9 до 18 ч московского времени были закрыты все судо- и водопропускные сооружения Комплекса. По данным сотрудников Дирекции КЗС со стороны Финского залива пик подъема воды пришелся на 15 ч 45 мин и составил на В-5 216 см, на С-1 196 см. Скорость ветра на КЗС достигала 32 м/с. Также по оценкам специалистов КЗС, прогнозируемый подъем воды в Санкт-Петербурге мог бы составить 260 см Балтийской системы высот (БС) у Горного института. По прогнозу CARDINAL-BSM6 к 17 ч ожидался подъем уровня до 186 см БС. Это был пример успешного закрытия КЗС.

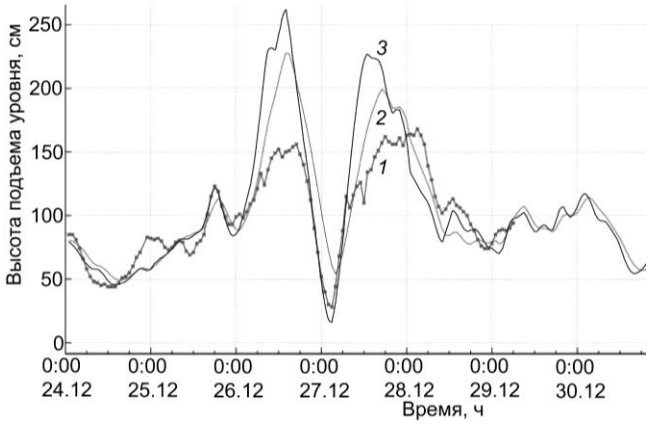

Рис. 4. Фактический (по данным СЗУГМС) и прогностический (по модели HIROMB) ход уровня в С.-Петербурге (в/п Горный) во время наводнения 26—27 декабря 2011 г. *1* — высота подъема уровня фактическая по данным СЗ УГМС; *2* — спрогнозированная по модели HIROMB с разрешением 1 мор. миля; *3* — спрогнозированная по модели HIROMB с разрешением 3 мор. мили.

В последнее время стали доступны данные об уровне вблизи судопропускных и водопропускных сооружений как внутри КЗС в Невской губе (НГ), так и на внешней стороне в сторону Финского залива (ФЗ). Теперь на примере подъема уровня (наводнения формально не было) 17 ноября 2013 г. можно показать, как сказалось длительное закрытие КЗС на ходе уровня в Невской губе и в восточной части Финского залива. В настоящее время данные об уровне можно найти на сайте СПУН — Системы предупреждения об угрозе наводнений в Санкт-Петербурге [13]. Комплексные фактические данные можно получить по наблюдениям на недавно установленной Санкт-Петербургским ЦГМС-Р морской автоматической гидрометеорологической станции (МАГМС «Кронштадт») в точке с координатами 60°02.0´с.ш., 29°32.0´в.д. к югу от маяка «Толбухин». Для верификации, представленной в модели [14], наряду с данными гидрометеорологических постов привлекался архив измеренных гидрологических характеристик, накопленный в результате работы этой станции, но в нашем случае использовались для анализа только данные постов с сайта СПУН [13].

Рассмотрим, как происходило маневрирование затворами 17 ноября 2013 г. По оценке Дирекции Комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга предотвратил в городе наводнение № 313, (несмотря на то, что фактические значения уровня не превосходили 160 см по БС). По прогнозу модели HIROMB максимальный подъем мог составить 156 см (по более ранней версии модели — до 170 см), по модели BSM6 — 151 см (рис. 5). Прогностические значения и ход уровня по новым версиям обеих моделей близки друг другу, но дирекции КЗС необходимо строго придерживаться прогноза, который официально дает Росгидромет, и в заключительных оценках, приводимых на сайте [11] после работы КЗС, ссылаться только на него.

Маневрирование затворами судопропускных сооружений началось в 2 ч, а в 3 ч комплекс был полностью закрыт. По материалам Дирекции КЗС все мероприятия прошли по плану, в штатном режиме. КЗС оставался закрытым в течение всего дня, т. к. угроза подъема воды в акватории Невской губы сохранялась. Время открытия и закрытия отчетливо видны на графиках временного хода уровня в Санкт-Петербурге (рис. 5). Пик подъема воды со стороны Финского залива на судопропускном сооружении С-1 пришелся на период с 15 до 17 ч, и уровень воды составил 151 см. (рис. 6, *а*). Скорость ветра на КЗС достигала 25 м/с. Открытие судо- и водопропускных сооружений Комплекса началось в 20 ч 17.11.2013 г. Данные наблюдений за уровнем [13] показывают, что уровень в городе едва не достиг критической для наводнения отметки, т. е. закрытие КЗС было начато слишком рано (за 12—13 ч до прогностического максимума). Показательно, что максимальный подъем у Горного института с 16 до 19 ч составлял около 130 см (рис. 5, кривая фактических значений), а у С-1 в Невской губе — 97 см (рис. 6, *б*), т. е. дополнительный локальный нагон между КЗС и водомерным постом в городе составил более 30 см при ветре до 25 м/с. При более сильном или продолжительном ветре и более высоких подъемах уровня наклон может стать опасным и привести фактически к наводнению в городе при закрытом КЗС (при относительно умеренном среднем подъеме в целом в Невской губе). Это было продемонстрировано ранее на модельных расчетах [4], наблюдалось при наводнении 26—27 декабря 2011 г. и должно учитываться при маневрировании затворами и длительном закрытии КЗС.

Расчеты на моделях и наблюдения показывают, что время подъема уровня от отметки 100 см до максимума колеблется от 5 до 10 ч, и точный прогноз времени роста уровня становится весьма важным для безопасного маневрирования затворами КЗС. Модели BSM6 и HIROMB обеспечивают достаточно точный прогноз временного хода уровня, и на основе одного из прогнозов (наиболе точного) необходимо расчитывать маневрирование затворами КЗС. Численные эксперименты и наблюдения показывают, что наиболее опасные экстремальные циклоны смещаются со скоростью 50 км/ч и выше [2, 4], именно поэтому рост уровня от отметки 100 см до максимума составляет от 5 до 10—12 ч.

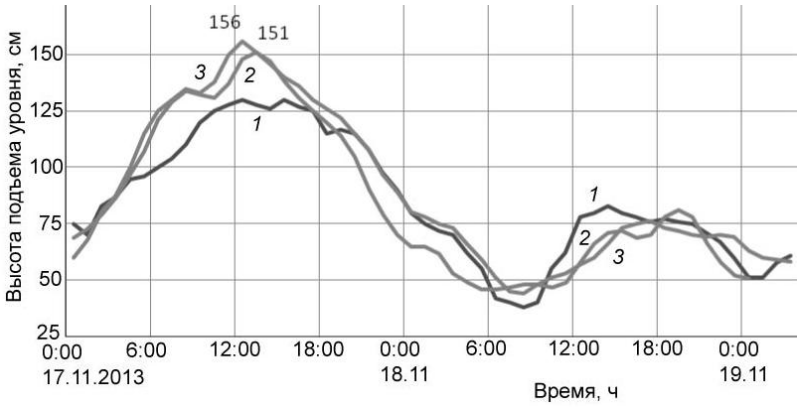

Рис. 5. Фактический (по данным ЦГМС-Р) и прогностический (по моделям BSM6 и HIROMB) ход уровня в Санкт-Петербурге (в/п Горный) во время наводнения 17 ноября 2013 г. и после него: *1* — факт; *2* — BSM6; *3* — HIROMB.

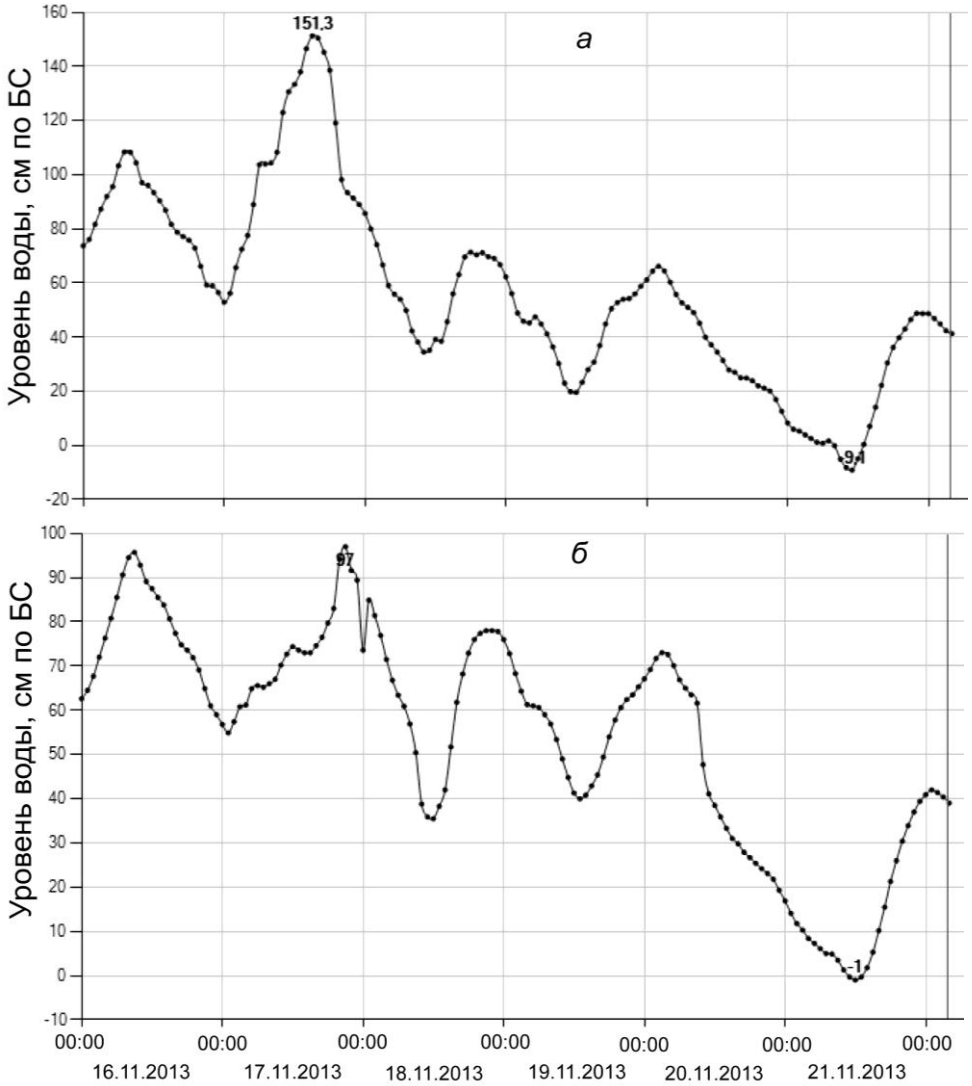

Рис. 6. Фактический (по данным СПУН [13]) ход уровня на КЗС у судопропускного сооружения С-1 со строны Финского залива (*а*) и со сторны Невской губы (*б*) во время наводнения 17 ноября 2013 г. и после него.

***

Модели Балтийского моря BSM6, HIROMB дают надежные результаты для прогноза значений уровня в Финском заливе. Проведенные численные эксперименты на модели BSM6 (программный комплекс CARDINAL) и полученные ранее результаты по расчету уровня в восточной части Финского залива при прохождении экстремального циклона и при закрытии КЗС [5] показали, что максимальный подъем уровня в таком случае будет наблюдаться в районе Горская—Сестрорецк и может составить до 580 см.

Было показано, что при прохождении экстремальных циклонов превышение уровня на побережье Финского залива за пределами КЗС при закрытии всех водопропускных и судопропускных сооружений КЗС по сравнению с открытым Комплексом не превысит 20—30 см, а при «средних наводненческих» циклонах не превысит 10—15 см. На расстоянии 200 км к западу от КЗС влияние закрытия Комплекса на подъем уровня практически не скажется. Фактические данные наблюдений за уровнем [13] в разных пунктах на КЗС и вблизи него (данные ЦГМС-Р по пунктам Озерки, Шепелево и др.) подтвердили этот вывод.

В Невской губе внутри КЗС происходит накопление воды за счет стока р. Невы. На модельных расчетах было показано, что в пределах акватории Невской губы внутри КЗС может создаваться значительный наклон уровня за счет ветрового нагона. Этот вывод подтвержден данными наблюдений во время наводнений 2011 и 2013 гг. При этом у КЗС уровень может быть относительно низким, в то время как западный ветер создаст нагонный подъем уровня в дельте р. Невы у Санкт-Петербурга до 1.5 м. Имея в виду общий подъем уровня в Невской губе при закрытом КЗС, этот дополнительный нагонный подъем может быть опасен и должен быть учтен при оперативных мероприятиях.

References

1. *Vyazilova N. A.* On extreme cyclone activity in the North Atlantic. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2012, 11, 5—17 (in Russian).
2. *Averkiev A. S., Klevannyy K. A.* Calculation of extreme water levels in the eastern part of the Gulf of Finland. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2009, 34(11), 741—747.
3. *Miyazaki M., Ueno T., Unoki S.* Theoretical studies of the surges off the Japan coast. Numerical methods for calculation of storm surges. *Gidrometeoizdat*, 1964, 116 p. (in Russian).
4. *Averkiev A. S., Klevannyy K. A.* A case study of the impact of cyclonic trajectories on sea-level extremes in the Gulf of Finland. *Continental Shelf Research*, 2010, 30(6), 707—714.
5. *Klevannyy K. A., Averkiev A.* Influence of the St. Petersburg Flood Protection Barrier on the water level rise in the eastern Gulf of Finland. *Obschestvo. Sreda. Razvitiye*, 2011, 1, 204—209 (in Russian).
6. *Gordeeva S. M., Malinin V. N.* On typing cyclone trajectories, leading to Neva river floods. *Obschestvo. Sreda. Razvitiye*, 2012, 2, 187—193 (in Russian).
7. *Klevannyy K. A., Smirnova E. V.* Using software package CARDINAL. *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsiy*, 2009, 1, 153—162 (in Russian).
8. Hydrodynamic and Water Pollution Computer Program. URL: http://cardinal-hydrosoft.com (date of access: 01.09.2013) (in Russian).
9. *Klevannyy K. A., Mostamandy S. M. W.* Last results of flood forecasting in St.Petersburg // Intern. Workshop «Extreme water levels in the Eastern Baltic». *Russian State Hydrometeorological University. St.-Petersburg, Russia*, 2007, 29—30.
10. *Smith S. D., Banke E. G.* Variation of the sea-surface drag coefficient with wind speed. *Quart. J. Royal Meteorolog. Soc.* 1975, 101(429), 665—673.
11. Directorate of St.Petersburg Flood Protection Barrier. URL: http://www.dambaspb.ru (date of access: 20.11.2013) (in Russian).
12. Web application of SMHI for the visualization of observations and forecasts for the sea. URL: http://produkter.smhi.se/OceanWeb/ (date of access: 19.11.2013)
13. The flood warning system. URL: http://spun.fkpkzs.ru/Hmc/Graphs (date of access: 22.11.2013) (in Russian).
14. *Andreev P. N., Dvornikov A. Yu., Riabchenko V. A., Tsepelev V. Yu., Smirnov K. G.* Storm surge simulation in the Neva Bay on the basis of three-dimensional model of circulation in terms of maneuvering gate of Flood Protection Barrier. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2013, 6 (4), 23—31 (in Russian).

Статья поступила в редакцию 04.12.2013 г.

A. S. Averkiev
Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia
asav@rshu.ru

STORM SURGE FEATURES IN THE GULF OF FINLAND FORMED BY EXTREME CYCLONES DURING OPERATION OF PROTECTION BARRIER OF ST.-PETERSBURG FROM FLOODS

The results of level rise simulation in the Gulf of Finland during the passage of the extreme and really observed cyclones over the Baltic Sea are presented. The analytical expression of atmospheric pressure field when passing intense cyclones was developed in the model of the Baltic Sea, which reproduces storm surges. This allows to simulate a wide range of trajectories and parameters of dangerous cyclones and resulting dangerous fluctuations in water level in the Gulf of Finland. Operation of St.-Petersburg Flood Protection Barrier was considered in the numerical experiments. It is shown that local level slope occurs in the Neva Bay under the closed Flood Protection Barrier and this slope can reach dangerous values. The simulation results are confirmed by level observations in the Gulf of Finland and in the Neva Bay during floods 2011 and 2013. These floods in St.-Petersburg were actually prevented. However, a more thorough analysis of the model calculations and the characteristics of specific cyclones will allow to carry out Protection Barrier gates maneuvers with most optimal way in the future.

Key words: storm surges, cyclones, modeling, Flood Protection Barrier.