

ГЛОБАЛЬНЫЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КРИЗИС: МИФЫ И РЕАЛЬНОСТЬ

УДК 551.461
ББК 26.221(99)

К.А. Клеванный, А.С. Аверкиев

ВЛИЯНИЕ РАБОТЫ КОМПЛЕКСА ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ОТ НАВОДНЕНИЙ НА ПОДЪЕМ УРОВНЯ ВОДЫ В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА*

Работа комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений при прогнозировании угроз наводнения приведет к дополнительному подъему уровня к западу от КЗС. Представлены результаты математического моделирования подъемов уровня воды в восточной части Финского залива при особо опасном и катастрофическом наводнении при условиях, когда КЗС остается открытым и когда он закрывается на период наводнения. Для моделирования использовался программный комплекс CARDINAL и созданная на его основе модель Балтийского моря BSM6.

Ключевые слова:

Комплекс сооружений защиты Санкт-Петербурга от наводнений, морской уровень, наводнение, Финский залив, штормовой нагон.

Подъемы уровня воды в восточной части Финского залива вызывают наводнения в Санкт-Петербурге и затопление берегов и населенных пунктов на побережье. В конце 2009 г. было практически завершено строительство комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС), начатое в 1980 г. (еще не вступил в строй туннель под судопропускным сооружением С-1 и участок кольцевой дороги по южному участку КЗС). Создается автоматизированная система предупреждения угрозы наводнений, основанная на метеорологическом прогнозе и прогнозе колебаний уровня Балтийского моря с заблаговременностью до 48 часов. При прогнозе наводнения КЗС будет закрываться в соответствии с разработанным планом (в настоящее время существует временный регламент управления КЗС).

Закрытие водо- и судопропускных сооружений, предотвращая наводнения на побережье Невской губы и в Санкт-Петербурге, вызовет дополнительное увеличение подъема уровня в пунктах на побережье залива к западу от КЗС. Вели-

чина этого дополнительного подъема и ее распределение вдоль побережья не исследовались. В [5] приведены результаты исследований по расчетам максимальных высот подъемов различной обеспеченности при естественных условиях (без КЗС) и в проектных (с закрытым КЗС), которые использовались при разработке Технического проекта КЗС. Расчеты выполнялись по одномерной модели Финского залива. Наличие закрытого КЗС моделировалось переносом восточной границы расчетной области. Получено, что у о. Котлин увеличение уровня при наличии закрытого КЗС при наводнении различной обеспеченности составляет 10%, в створе Озерки – Шепелево 7,5–8,5%, в створе Приморск – Старое Гарколово (Сосновый Бор) – 6,5%, в створе Выборг – Усть-Луга – 5,5%, в створе о. Мощный – Усть-Нарва – 3% и только в створе о. Гогланд влияние КЗС не было обнаружено. В [7] рассчитано увеличение подъема уровня при наводнении 7(19) ноября 1824 г. – наивысшего в истории города (421 см БС, обеспеченность 0,35% или один

* Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № 14.740.11.0201) по направлению «Океанология».

раз в 285 лет), при закрытии КЗС во время наводнения по сравнению с расчетом при открытом нестроеном КЗС. Как известно, в течение примерно 15 лет, начиная с 1990 г., КЗС оставался в нестроеном состоянии с почти постоянной площадью сечения отверстий около 14900 м² вместо 9610 м² по проекту. Использовалась модель Невской губы и восточной части Финского залива с открытой границей в створе Шепелево – Озерки, на которой задавался ход уровня, неизменный в двух вариантах расчета. Увеличение уровня в Большой Ижоре составило 7 см (2%), в Горской – 6 см (1,7%), в Сестрорецке – 3 см (0,85%), в Зеленогорске уровень не изменился. Как видно из [5] и из полученных ниже результатов, использование неизменного граничного условия привело в [7] к некоторому занижению влияния закрытия КЗС.

Ввод в эксплуатацию КЗС и интенсификация строительства на побережье восточной части Финского залива свидетельствует об актуальности исследования влияния закрытия сооружений при наводнениях на дополнительный подъем уровня воды.

Расчеты выполнялись с помощью программного комплекса CARDINAL [4; 8], который был создан на основе гидродинамической модели Балтийского моря BSM6 [9]. Модель основана на уравнениях мелкой воды, записанных в криволинейных гранично-зависимых координатах. Средний шаг сетки – 3670 м, максимальный – 19 км и минимальный 110 м в судопропускном отверстии С-2.

Эта модель успешно работает в оперативном режиме в Санкт-Петербургском центре

по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СПб ЦГМС-Р). Прогнозы ветра и атмосферного давления поступают из модели HIRLAM Шведского гидрометеорологического института (SMHI). До декабря 2007 г. они поступали один раз в сутки, затем до апреля 2008 г. – два раза в сутки, а в настоящее время – четыре раза в сутки. Прогнозы расходов воды через Датские проливы поступают один раз в сутки из Федерального управления по навигации и гидрографии в Гамбурге (BSH). Эта автоматизированная система прогноза наводнений работает в ЦГМС-Р с декабря 1999 г. За период работы системы произошло 17 наводнений (подъем уровня на водомерном посту (в/п) «Горный институт» выше 160 см БС), из них по разным причинам были пропущены 4 (прогностический уровень менее 160 см). Пример оправдавшегося прогноза наводнения 11 ноября 2001 г. приведен на рис. 1.

После утачивания приема данных HIRLAM, а также введения различных усовершенствований в модель Балтийского моря ошибки прогнозов уменьшились. Последние наводнения были предсказаны практически точно: 3 февраля 2008 г. фактический уровень был 198 см, прогностический – 193 см, ошибка во времени наступления пика – 15 минут. 16 ноября 2008 г. фактический уровень был 186 см, прогностический – 184 см, ошибка по времени – 28 минут.

С помощью этой модели Балтийского моря нами были рассчитаны дополнительные подъемы уровня в восточной части Финского залива за счет полного закрытия всех водопропускных и судопропускных сооружений КЗС при двух наводнениях:

1) наводнения 9 января 2005 г., когда уровень во в/п «Горный институт» достигал 239 см БС и 2) экстремальном катастрофическом наводнении [6] с высотой подъема в С.-Петербурге 486 см (при открытом КЗС, заданном в проектном состоянии).

В первой серии модельных экспериментов была воспроизведена ситуация 9 января 2005 г., когда наблюдалось особо опасное наводнение (наиболее сильное после наводнения 30 ноября 1999 г.) с мак-

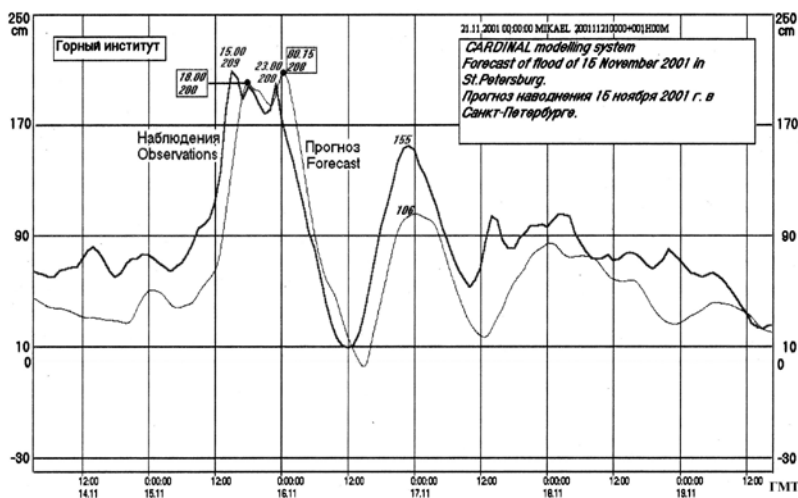


Рис. 1. Оперативный прогноз и фактический временной ходы уровня на в/п «Горный институт» 14–19.11.2001 г. Расчет выполнялся с ветровым коэффициентом $C_D = (0.63 + 0.11) \cdot 10^{-3}$

206 симумом в Санкт-Петербурге 239 см. Оно было вызвано прохождением над Финским заливом циклона «Egwin». Это наводнение в списке 307 петербургских наводнений делит по высоте места с 29-го по 31-е. Его обеспеченность среди максимальных годовых уровней около 7% или один раз в 15 лет. Во время этого наводнения были превышены

абсолютные максимумы уровня за весь период наблюдений в большинстве пунктов Финского и Рижского заливов: Выборг – 207 см, Хамина – 197 см, Хельсинки – 151 см, Таллин – 155 см, Пярну – 275 см [6]. Центр циклона прошел лишь немного севернее Финского залива, и зона максимальных ветров пришлось на Псковскую область,

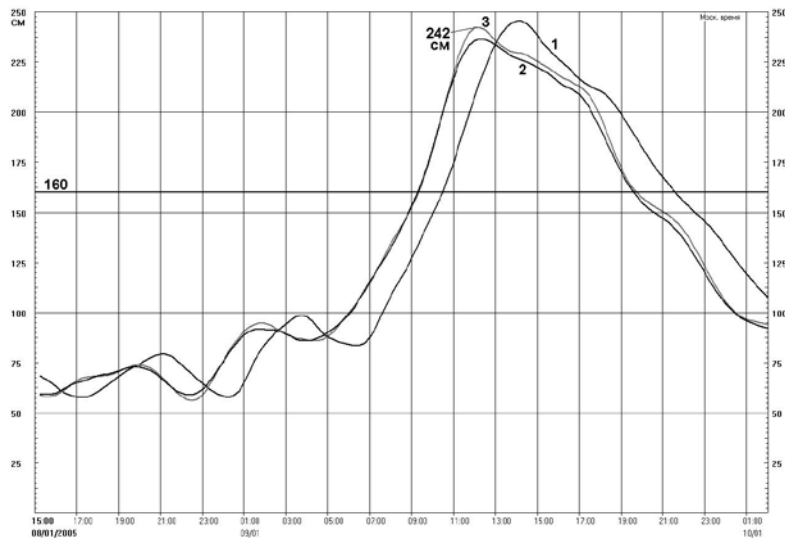


Рис. 2. Расчетный временной ход уровня на в/п «Горный институт» (1), у С-1 со стороны Финского залива (2) и у Сестрорецка (3) при наводнении 9 января 2005 г. КЗС в проектном состоянии остается открытым во время наводнения. Время московское.

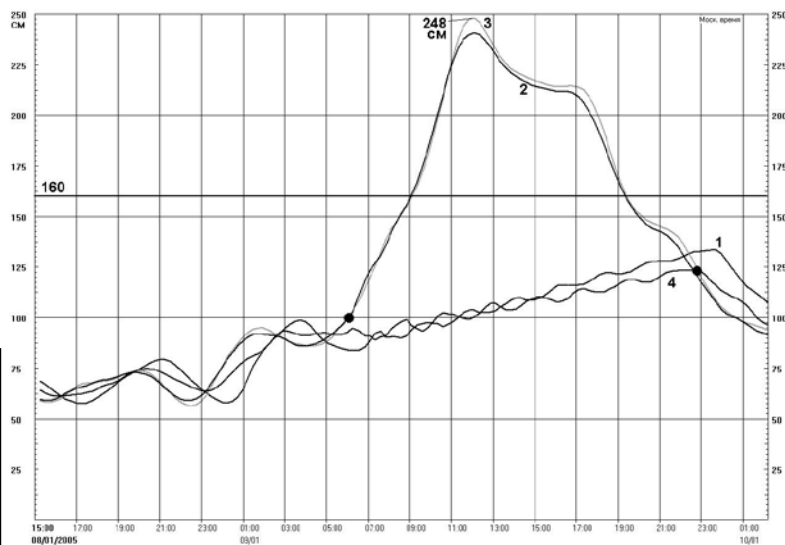


Рис. 3. Расчетный временной ход уровня на в/п «Горный институт» (1), у С-1 со стороны Финского залива (2), у Сестрорецка (3) и у С-1 со стороны Невской губы (4) при наводнении 9 января 2005 г. КЗС в проектном состоянии закрывается на период наводнения. Показаны моменты закрытия и открытия КЗС. Время московское.

что спасло Санкт-Петербург от 4-го за его историю катастрофического наводнения.

В модели BSM6 задавалось поле атмосферного давления и ветра из модели NIRLAM. В соответствии с задачей данной работы КЗС задавался в проектном состоянии, хотя в 2005 г. КЗС еще строился. Ветровой коэффициент задавался по формуле Банке-Смита $C_D = (0,63 + 0,066) \cdot 10^{-3}$. В первом расчете водопропускные сооружения КЗС оставались открытыми весь период наводнения, во втором они «закрывались» при подъеме уровня у С-1 (основное судопропускное сооружение КЗС) до отметки 1 м (в 06:20 МСК 9 января по расчету) и открывались при спаде уровня в заливе в момент его выравнивания по обе стороны от КЗС у С-1 (в 22:40 МСК 9 января). Эти условия закрытия и открытия КЗС, определенные в Техническом проекте, в настоящее время уточняются. На рис. 2, 3 показаны временные ходы уровня в некоторых пунктах при открытом и закрытом КЗС. При закрытом КЗС виден подъем уровня в Невской губе за счет стока Невы.

На рис. 4 приведены изолинии уровня в восточной части Финского залива в момент максимума уровня у

Горской, т.е. непосредственно перед КЗС, при условии, что открыты все сооружения КЗС, а на рис. 5 – при условии закрытия КЗС. Отличия небольшие. Максимальный уровень в обоих случаях находится к северу от Сестрорецка.

На рис. 6 показано распределение максимумов уровня вдоль побережья восточной части Финского залива при этом наводнении при открытом КЗС (знаменатель) и при закрытом (числитель). Показана также абсолютная разность уровней.

Максимальное приращение уровня получено в районе Горской – 7 см (3%). По мере удаления от КЗС это приращение уменьшается. На южном берегу максимальные значения и приращения меньше, чем на северном. Влияние закрытия КЗС еще прослеживается у о. Гогланд, расположенного в 145 км от КЗС. Здесь произошло увеличение уровня на 2 см (1%). Отметим, что в Санкт-Петербурге уровень в первом случае возрастал до 245 см (фактически по в/п «Горный институт» – 239), т.е. до особо опасного «наводнения» значения, а при закрытом КЗС – не превысил бы 134 см с учетом накопления воды в период закрытия (с 06:20 до 22:40 МСК) за счет стока р. Невы.

Вторая серия экспериментов выполнена для «экстремального» модельного циклона и соответствующего поля атмосферного давления и ветра. В [1] на примере циклона «Erwin» показано, что идеализированный циклон с концентрическими изобарами, заданными аналитически, может приближенно аппроксимировать реальные поля давления и ветра. При выбранных экстре-

мальных (но наблюдавшихся в северо-западном регионе) характеристиках такого модельного циклона в [1; 2; 6] было исследовано влияние трассы и скорости его перемещения на подъемы уровня в восточной части Финского залива. Было принято, что давление в центре такого циклона равно 960 гПа, максимальная скорость ветра – 36–38 м/с на расстоянии 200 км от центра циклона (зона максимального градиента давления), скорость смещения центра циклона 14 м/с (50,4 км/час), минимум давления в центре циклона («максимальная

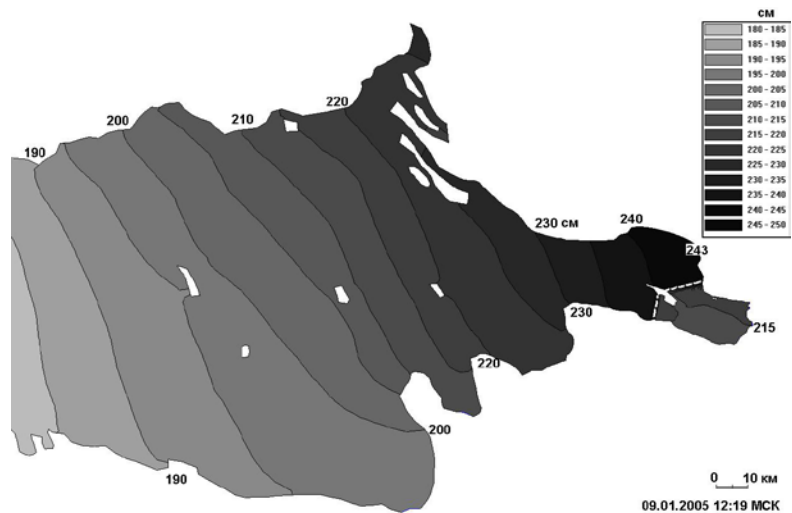


Рис. 4. Изолинии уровня при наводнении 9 января 2005 г. в момент максимума уровня у Горской. КЗС открыт во время наводнения.

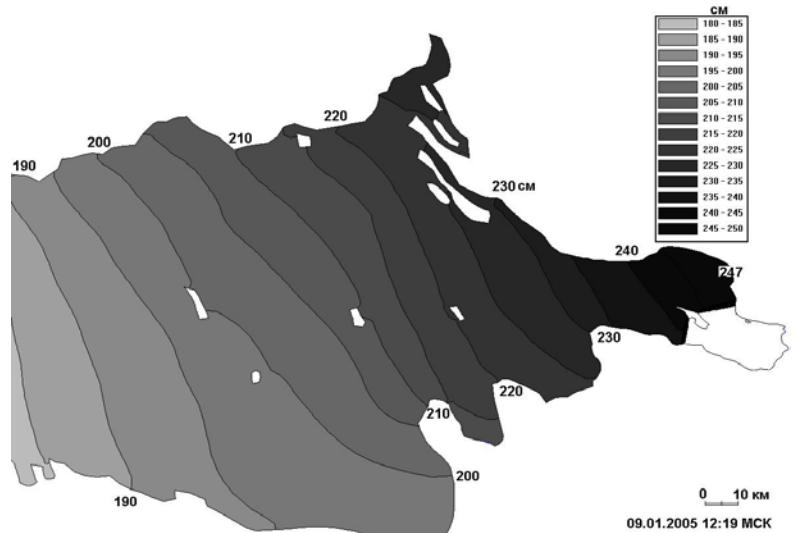


Рис. 5. Изолинии уровня при наводнении 9 января 2005 г. в момент максимума уровня у Горской. КЗС закрыт в 06:20 МСК – момент перехода уровня у С-1 со стороны Финского залива через отметку 100 см.

глубина») достигается, когда центр находится в 200 км к северо-западу от Санкт-Петербурга. Наиболее опасная траектория циклона – вдоль 61,5° с.ш. с запада на восток с небольшой северной составляющей. При задании таких параметров и траектории циклона подъем уровня в восточной части Финского залива достигает максимальных значений: до 590 см в Санкт-Петербурге при открытом КЗС в проектом состоянии [6]. Примерная оценка показывает, что обеспеченность такого подъема крайне мала – менее 0,01% (один раз в 10 тыс. лет) – значения, используемого при проектировании наиболее важных гидротехнических сооружений. Нами задавалось движение циклона с запада на восток без северной составляющей, при этом подъем уровня в Санкт-Петербурге при открытом КЗС достиг отметки 486 см. Обеспеченность такого наводнения согласно [5] равна примерно 0,08% (один раз в 1250 лет). Ветровой коэффициент задавался, как и ранее, по формуле Банке-Смита.

Результаты расчетов по модели с заданием такого циклона при проектом состоянии КЗС в случаях, когда КЗС остается открытым и когда его сооружения закрываются в соответствии с существующим Техническим проектом, представлены на рис. 7. Максимальный подъем на побережье залива будет в районе Горская–Сестрорецк и при открытом КЗС составит 577 см, при закрытии на период наводнения – 604 см. Увеличение подъема уровня – 27 см или 4,5%. По мере удаления от КЗС подъемы уровня и степень

влияния КЗС уменьшаются. Как и в случае наводнения 2005 г., величина подъемов и увеличение уровня за счет закрытия КЗС больше на северном побережье, чем на южном. На меридиане о. Гогланд влияние КЗС для обеих побережий залива исчезает.

Максимальный уровень для этого наводнения при закрытом и открытом КЗС получен в районе между Горской и Солнечным. В отличие от наводнения 9 января 2005 г., при этом наводнении при открытом КЗС

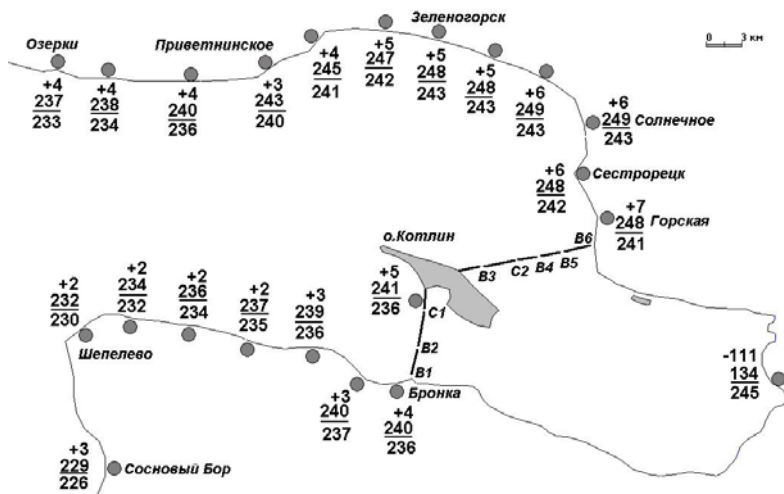


Рис. 6. Распределение максимумов уровня (см) вдоль побережья восточной части Финского залива при наводнении 9 января 2005 г. при открытом КЗС (знаменатель) и при закрытом (числитель). Показана также абсолютная разность уровней

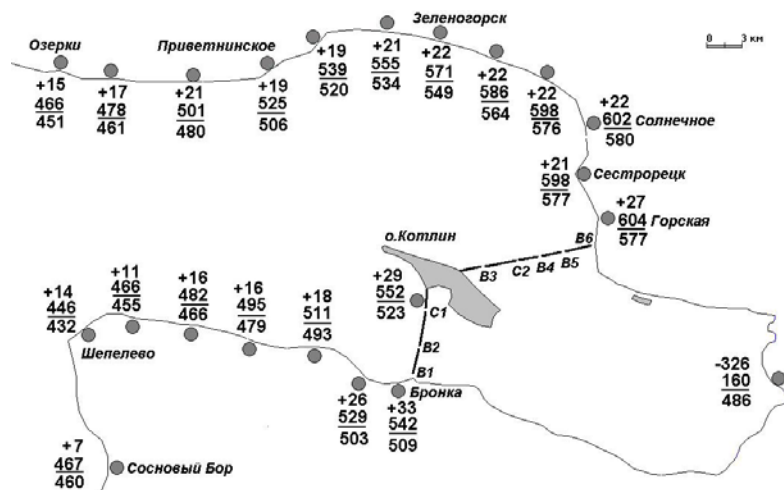


Рис. 7. Распределение максимумов уровня (см) вдоль побережья восточной части Финского залива при экстремальном катастрофическом наводнении при открытом КЗС (знаменатель) и при закрытом (числитель). Показана также абсолютная разность уровней.

подъем уровня за КЗС намного превышает подъем у Санкт-Петербурга, что связано с разными интенсивностями подъема уровня у КЗС со стороны Финского залива: 20 см/час 9 января 2005 г. и 100 см/час в экстремальном циклоне.

В результате моделирования двух наводнений с обеспеченностью 5% и 0,08% получена оценка степени влияния закрытия сооружений КЗС в период наводнения на увеличение подъема уровня воды в восточной части Финского залива.

Вблизи КЗС увеличение уровня не превосходит 3–5%. При наводнении с 5%-й обеспеченностью (наводнение 9 января 2005 г.) это составило 7 см, а при экстремальном катастрофическом наводнении с обеспеченностью 0,08% – 27 см. По мере

удаления от КЗС его влияние постепенно падает, но окончательно влияние его закрытия исчезает только в районе о. Гогланд, т.е. в 145 км от сооружений, что согласуется с результатами, представленными в [5].

Для случаев исследованных наводнений получено, что высоты подъёмов и степень влияния закрытия КЗС вдоль северного побережья восточной части Финского залива выше, чем вдоль южной его части.

При проектировании зданий и сооружений в прибрежной полосе восточной части Финского залива кроме полученного повышения уровня за счет закрытия КЗС необходимо учитывать и возможные повышения уровня воды, вызываемые с климатическими изменениями [3].

Список литературы:

- [1] Аверкиев А.С., Клеванный К.А. Определение траекторий и скоростей циклонов, приводящих к максимальным подъемам воды в Финском заливе // *Метеорология и гидрология*. – 2007, № 8. – С. 55–63.
- [2] Аверкиев А.С., Клеванный К.А. Расчет экстремальных уровней воды в восточной части Финского залива // *Метеорология и гидрология*. – 2009, № 11. – С. 59–68.
- [3] Гордеева С.М., Малинин В.Н., Малинина Ю.В. Современные колебания морского уровня в Кронштадте и их возможные изменения к концу столетия // *Общество. Среда. Развитие*. – 2010, № 3. – С. 251–256.
- [4] Клеванный К.А. Смирнова Е.В. Использование программного комплекса CARDINAL // *Журнал Университета водных коммуникаций*. – 2009, вып. 1. – С. 153–162.
- [5] Нежиховский Р.А. Вопросы гидрологии реки Невы и Невской губы. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 224 с.
- [6] Averkiev A. S., Klevannyu K. A. A case study of the impact of cyclonic trajectories on sea-level extremes in the Gulf of Finland // *Continental Shelf Research*. Vol. 30. – 2010, № 6. – P. 707–714.
- [7] Environment Impact Assessment Study for the Completion of the St.Petersburg Flood Protection Barrier. Technical Report of Nedeco // *WL|Delft Hydraulics*. – 2002, Z3194/001.
- [8] Klevannyu K.A., Matveyev V.G., Voltzinger N.E. An integrated modeling system for coastal area dynamics // *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. – 1994, Vol.19. – P. 181–206.
- [9] Klevannyu K.A., Mostamandi M.-S.W. Quality of water level forecasts in St.Petersburg with four times per day model runs / *Proc. International Workshop Flood Vulnerability and Flood Protection in Tidal and Non-Tidal Regimes: North and Baltic Seas*. –Deltares, Delft, The Netherlands, 2009. – P. 17–18.