

УДК 551.463.8

© П.Н.Андреев¹, А.Ю.Дворников², В.А.Рябченко², В.Ю.Цепелев¹, К.Г.Смирнов³, 2013

¹Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН

³Государственный океанографический институт им. Н.Н.Зубова, Санкт-Петербургское отделение
antony.spb@bk.ru

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ШТОРМОВЫХ НАГОНОВ В НЕВСКОЙ ГУБЕ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ЦИРКУЛЯЦИИ В УСЛОВИЯХ МАНЕВРИРОВАНИЯ ЗАТВОРАМИ КОМПЛЕКСА ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Трехмерная гидродинамическая модель Невской губы и восточной части Финского залива использована для воспроизведения штормовых нагонов в Невской губе в ноябре–декабре 2011 г., когда для предотвращения наводнения в Санкт-Петербурге потребовалось закрытие створов Комплекса защитных сооружений. Сравнение результатов расчетов с данными измерения уровня воды на гидрометеорологических станциях «Кронштадт» и «Горный институт» и скорости течений на автоматической донной станции у маяка «Толбухин» показало, что модель адекватно работает в экстремальных гидрометеорологических условиях.

Ключевые слова: штормовые нагоны, моделирование, Комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга.

В настоящее время в ФГБУ «Северо-Западное УГМС» ведутся работы по адаптации и внедрению в оперативное использование комплекса гидродинамических моделей для прогноза гидрологического и экологического состояния восточной части Финского залива и Невской губы. Для обеспечения надежной и эффективной работы Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС) разработана и функционирует система прогноза подъема воды (СППВ), которая в режиме реального времени обеспечивает мониторинг и прогноз уровня воды с передачей полной информации о нем в систему поддержки принятия решений (СППР) по управлению КЗС. СППВ строится как комплекс взаимодействующих гидродинамических моделей, усваивающих большой объем наблюдений о состоянии водной среды и атмосферы над ней. Основное назначение СППВ – оперативная выдача прогностических продуктов. Для выработки эффективных рекомендаций предусматривается расчет по набору возможных сценариев развития реальных ситуаций. Наряду с СППВ планируется разработать и внедрить в практику информационную систему экологического состояния (ИСЭС), которая будет предоставлять Управлению КЗС и другим юридическим лицам информацию об экологическом состоянии Невской губы и восточной части Финского залива.

Ядром обеих систем – СППВ и ИСЭС – является комплекс морских моделей (КММ). В настоящее время существуют две национальные модельные системы Балтийского моря и Финского залива, которые могут составить основу КММ, а именно:

- модельная система CARDINAL (Coastal Area Dynamics Investigation Algorithm) [1];
- комплекс моделей для оперативного прогноза состояния Финского залива, разработанный сотрудниками РГГМУ, СПбФ ИОРАН и СПб ЦГМС-Р.

В последний комплекс включены: атмосферная модель MM5 [2], модель Финского залива GULFOOS (the GULf of Finland Operational Oceanographic System) [3], модель

Невской губы NEVAM (NEVA Model), модель ветрового волнения SWAN (Simulating Waves Nearshore) [4], Санкт-Петербургская модель эвтрофикации Балтийского моря SPBEM (St.Petersburg Baltic Eutrophication Model) [5, 6]. В комплекс также входят базы данных наблюдений, блоки межмодельного обмена информацией, средства визуализации и архивации результатов. Для задания атмосферных воздействий и граничных условий на открытой границе моря используются две зарубежные модели: атмосферная – HIRLAM (HIgh Resolution Local Area Model) [7] и морская – HIROMB (HIgh Resolution Operational Model for the Baltic Sea) [8].

В настоящей статье рассматривается возможность использования внутри модельного комплекса трехмерной гидродинамической модели NEVAM как инструмента, позволяющего уточнить и детализировать прогноз гидродинамического состояния в восточной части Финского залива, а особенно в Невской губе и окрестностях КЗС.

Для верификации модели NEVAM наряду с данными гидрометеорологических постов также привлекается архив измеренных гидрологических характеристик, накопленный в результате работы морской автоматической гидрометеорологической станции (МАГМС «Кронштадт»). МАГМС «Кронштадт» была установлена Санкт-Петербургским ЦГМС-Р на глубине 11 м, в точке с координатами ($60^{\circ}02.0' \text{с.ш.}$, $29^{\circ}32.0' \text{в.д.}$), находящейся на расстоянии 1 км к югу от маяка «Толбухин». Указанный архив содержит данные о параметрах волнения, уровне поверхности моря, профилях течений, придонных солености, температуре, растворенном кислороде и мутности за период с 13 ноября по 21 декабря 2011 г.

Описание модели NEVAM. Модель NEVAM является усовершенствованной версией трехмерной гидродинамической модели Невской губы и восточной части Финского залива [9] и основана на трехмерной модели общей циркуляции океана Принстонского университета (Princeton Ocean Model, POM) [10], использующей в качестве вертикальной σ -координату. Отличительной чертой моделей с σ -координатой является гладкое представление топографии дна. Это обеспечивает лучшее (по сравнению с уровенными и изопикническими моделями) описание динамики течений в придонном пограничном слое. Достаточно хорошо σ -модели описывают также термодинамические эффекты, обусловленные нелинейностью уравнения состояния. Поэтому эти модели хорошо подходят для моделирования течений в шельфовой зоне океанов, мелководных окраинных и внутренних морях и эстуариях рек. Дополнительное преимущество модели Принстонского университета состоит в описании вертикального и горизонтального турбулентного переноса на основе испытанных и надежных параметризаций соответственно Меллора и Ямады [11], а также Смагоринского [12].

В современной версии NEVAM исследуемая область выбрана так, чтобы адекватно описать процессы в Невской губе, и поэтому включает КЗС и узкую часть внешнего эстуария р.Нева (от о.Котлин примерно до меридиана Шепелевского маяка). Ее восточная граница (створ Невы) проходит по меридиану $30^{\circ}14'59'' \text{в.д.}$, западная – по меридиану $29^{\circ}30'04'' \text{в.д.}$ Криволинейная квазиортогональная сетка строится таким образом, чтобы обеспечить максимальное разрешение в Невской губе (в пределах района от створа Невы до КЗС). Число узлов сетки по X -координате (с запада на восток) равно 500, по Y -координате (с юга на север) – 318, число равномерно расположенных σ -уровней – 7. Другие параметры сетки даны в табл.1.



Рис.1. Схема Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС).
B1, B2, B3, B4, B5, B6 – водопропускные ворота КЗС; C1 и C2 – судопропускные каналы;
D1–D11 – части дамбы.

Таблица 1

Параметры расчетной сетки модели Невской губы

Параметры	Минимум	Максимум
Шаг по X-координате, м	47.4	368.5
Шаг по Y-координате, м	38.6	556.9
Глубина водоема, м	0.2	34.0

Таблица 2

Параметры отверстий КЗС (современное состояние)

Отверстие	Ширина*, м	Глубина, м	Число шагов сетки NEVAM
C1	200	16.0	4
C2	110	7.0	2
B1	336	2.5	5
B2	280	5.0	4
B3	280	2.5	2
B4	280	5.0	2
B5	280	5.0	2
B6	336	2.5	2

Современная конфигурация КЗС показана на рис.1. В табл.2 даны размеры действующих водопропускных и судопропускных сооружений КЗС по состоянию на конец лета 2011 г. Модельное представление водопропускных и судопропускных ворот КЗС соответствует этому состоянию. Модель позволяет открывать и закрывать ворота КЗС в процессе расчетов.

Модель циркуляции воды в Невской губе объединена с многокатегорийной моделью морского льда HELMI [13]. В этой модели лед делится на две основные категории: недеформированный и деформированный лед. В свою очередь, недеформированный лед делится на несколько подкатегорий, а деформированный на две – торосистый и наслоенный. Наслоенный лед существует при толщинах льда, меньших 17 см (так называемая

толщина переброски); при больших толщинах лед относится к категории торосистого. Эволюция каждой категории льда описывается уравнениями для концентрации (площади) и массы льда, причем эти уравнения решаются в лагранжевом пространстве толщины льда. В каждой категории она изменяется в результате адвекции, деформации и термодинамических процессов. Предполагается, что припайный лед существует в областях, где глубина водоема меньше заданного критического значения, равного 5 м. Потоки импульса, тепла и влаги на границах раздела лед–воздух и лед–вода параметризуются так же, как в [14].

Площадь водообмена между Невской губой и Финским заливом для южной и северной частей КЗС составляет соответственно 13 097.5 и 4 140 м². Таким образом, площадь водообмена для северной части дамбы заметно меньше (около 24 % площади суммарного водообмена), чем площадь водообмена в ее южной части. Как видно из табл.2, число шагов сетки, приходящееся на отверстия дамбы, как правило, не меньше двух, что позволяет достаточно хорошо описывать течения в отверстиях (водопропускных воротах и судопропускных каналах) КЗС.

Постановка численного эксперимента. Для испытания модели NEVAM был выбран период времени с экстремальными гидрометеорологическими условиями. Как правило, такие условия в Невской губе возникают осенью и в начале зимы.

В ноябре–декабре 2011 г. наблюдались три штормовых нагона воды в Невской губе, когда для предотвращения наводнения в Санкт-Петербурге потребовалось закрытие створов КЗС. Первый нагон произошел 27–28 ноября. Створы сооружений были закрыты с 23 ч московского времени 27 ноября до 12 ч 28 ноября. Второй и третий нагоны проследовали в связке один за другим 26–28 декабря при прохождении обширного циклона. Створы сооружений были закрыты с 6 ч 26 до 0 ч 27 декабря. В третий раз створы сооружений были закрыты с 10 ч 27 до 6 ч 28 декабря. Таким образом, в рассматриваемом периоде были отмечены три наводнения на р.Неве с максимальными уровнями воды по гидрологическому посту Горный институт 142, 156 и 169 см выше ноля Кронштадтского футштока.

С учетом гидрометеорологической обстановки в указанный промежуток времени, а также в период накопленных данных натурных наблюдений при помощи модели NEVAM был выполнен ретроспективный расчет на 45 сут с 13 ноября по 28 декабря 2011 г.

В качестве начальных условий были взяты поля температуры и солёности по данным модели HIROMB [8]. На открытых боковых границах задавались: на западной границе – ежечасные значения уровня, температуры и солёности по данным HIROMB, на восточной границе – постоянная во времени температура (+3°C) и распределенный по рукавам сток р.Невы. Для его расчета (Q) использовалась эмпирическая зависимость, связывающая Q (в м³/с) с уровнем воды в Ладожском озере:

$$Q = 0.6321 \eta^2 + 39.86 \eta + 1138.4, \quad (1)$$

где η – уровень воды (в см) в пункте Петрокрепость в истоке Невы.

На границе с атмосферой были заданы ежечасные поля основных метеорологических параметров (давление, температура, относительная влажность, скорость и направление ветра, облачность, количество осадков), рассчитанные по модели HIRLAM [7].

Результаты расчетов и сравнение с данными наблюдений. Особый интерес представляет воспроизведение моделью гидрологических параметров вблизи гидрологических постов Кронштадт и Горный институт, в районе маяка Толбухин, расположенного на расстоянии 10 км к западу от КЗС (точка постановки МАГМС «Кронштадт»), а также непосредственно около створов КЗС.

На рис.2 (см.цв.вклейку) представлены пространственные распределения уровня и скоростей течений для случая закрытых и открытых створах ворот КЗС. При закрытых воротах в условиях штормового нагона было отмечено усиление течений (до 1 м/с) вдоль дамбы со стороны Финского залива, а также повышение уровня (10–20 см) у северной части дамбы (рис.2, а). При понижении уровня на западной границе и открытых воротах избыточный объем воды, накопленный в Невской губе, устремляется через водопропускные ворота В4–В6 обратно в залив в направлении, противоположном направлению ветра (рис.2, б). При этом интенсивность течений в Невской губе заметно ослабевает. Следует отметить, что ветер 27–28 декабря менялся слабо как по силе, так и по направлению.

Сравнение рассчитанных и измеренных значений уровня. На рис.3 представлены наблюдаемые и рассчитанные по модели значения уровня вблизи гидрологических постов Кронштадт и Горный институт. Следует отметить, что модельные результаты хорошо согласуются по фазе с данными натурных наблюдений в течение всего анализируемого периода (13 ноября–28 декабря 2011 г.), а в ноябре существует неплохое согласие и по абсолютным значениям уровня. Однако в декабре последние оказались заниженными относительно наблюдаемых, причем недооценки в обоих пунктах приблизительно равны, что свидетельствует о заниженных значениях уровня на открытой западной границе, которые задавались на основании результатов расчетов по модели HIROMB.

В целом модель показала хорошую согласованность модельного и фактического уровней в ситуации наводнений при закрытия створов КЗС. В случае 25–28 декабря отмечается занижение модельного уровня при третьем штормовом нагоне. Максимальное отклонение составило 74.6 см (табл.3) и произошло 27.12.2011 в 22:00 МСК в пункте Горный институт. Следует отметить, что информация о времени закрытия ворот КЗС на этот период неточна. Фазовый сдвиг в начале суток 27 декабря (рис.3, з) скорее всего обусловлен неточным заданием момента времени закрытия створов КЗС в модельном расчете.

О качестве расчета уровня позволяют судить приведенные статистические характеристики (табл.3). Как видно из таблицы, фактические и прогностические значения уровня воды хорошо коррелируют друг с другом в обоих пунктах. Отрицательное значение систематической ошибки говорит о том, что модель в среднем занижает значения уровня.

Сравнение рассчитанных и измеренных скоростей течений на МАГМС «Кронштадт». Для анализа скоростей течений использованы временные ряды ежечасных измеренных и рассчитанных значений скорости течений в точке МАГМС «Кронштадт». На рис.4 (см.цв.вклейку) приведены графики сопоставления временного хода модуля и направления рассчитанной и наблюдаемой скорости течений. Между ними существуют заметные различия как по модулю, так и по направлению. Более правильное представление о степени соответствия рассчитанных и наблюдаемых скоростей течения дают статистические оценки вероятностных характеристик данных наблюдений и результатов расчета, согласно которым закономерности изменчивости натурных и модельных данных довольно близки. Так, приведенные на рис.5 (см.цв.вклейку) плотности распределения $f(|V|, \varphi^\circ)$ скорости течения V по данным измерений и расчета показывают хорошее совпадение по направлению максимумов плотности, хотя при этом значения модуля измеренной скорости для всех максимумов распределения на 5–7 см/с превышают значения модуля рассчитанной скорости.

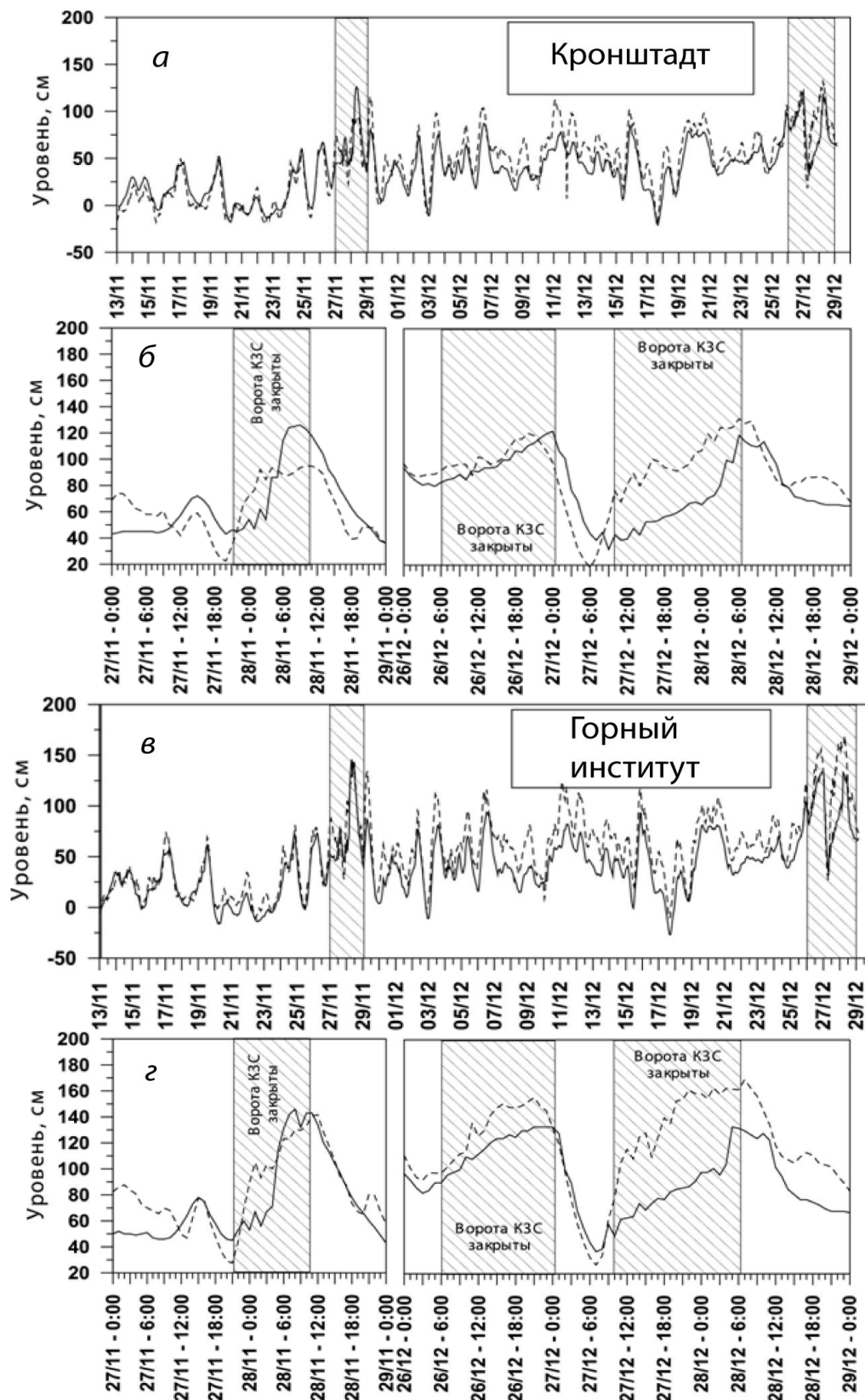


Рис.3. Наблюдаемые и рассчитанные значения уровня в пунктах Кронштадт и Горный институт с 13 ноября по 28 декабря 2011 г. (а, в), для случаев наводнений с 27 по 29 ноября и с 26 по 29 декабря 2011 г. (б, г).

Сплошная линия – результат наблюдений, штриховая – расчет NEVAM.

Таблица 3

**Статистические характеристики уровня воды
в пунктах наблюдений Кронштадт и Горный институт**

Характеристика	Горный институт	Кронштадт
$(H_{\text{п}} - H_{\text{ф}})_{\text{min}}$	-74.6	-53.4
$(H_{\text{п}} - H_{\text{ф}})_{\text{max}}$	19.2	49.0
$\hat{\delta}$	-15.3	-6.4
δ	16.6	12.4
σ	20.6	15.6
r	0.93	0.91
N	1026	1058

Примечание. Ошибки прогноза: δ – средняя абсолютная, σ – средняя квадратическая, $\hat{\delta}$ – средняя арифметическая (систематическая); r – коэффициент корреляции между прогностическими и фактическими значениями величины; разность прогностического и фактического значений: $(H_{\text{п}} - H_{\text{ф}})_{\text{min}}$ – минимальная, $(H_{\text{п}} - H_{\text{ф}})_{\text{max}}$ – максимальная; N – размер выборки.

Таблица 4

**Параметры изменчивости измеренной и модельной скорости течений,
рассчитанные по методу [15]**

Источник данных	Средние значения				$ V _{\max}$	Среднеквадратичные отклонения (СКО)					$r_{\text{изм}}$
	V_1	V_2	$ V $	$\varphi,^\circ$		I_1	λ_1	λ_2	χ	$\alpha,^\circ$	
	см/с			см/с							
Модель	3.58	1.10	3.8	17	42.4	12.4	9.6	7.8	0.806	91	3.3
Наблюдения	5.32	5.29	7.5	45	31.1	10.4	8.6	5.9	0.682	129	1.4

Примечание. V_1 и V_2 – проекции вектора скорости течения на меридиан и параллель соответственно; $|V|$ и φ – модуль и направление скорости течения; $|V|_{\text{max}}$ – максимальное значение модуля скорости течения; I_1 – квадратный корень из математического ожидания скалярного произведения центрированных векторов анализируемой скорости течения (линейный инвариант); λ_1 и λ_2 – дисперсии проекций вектора скорости течений; $\chi = \lambda_2/\lambda_1$; α – угол поворота, определяющий ориентацию большой оси эллипса дисперсии; $r_{\text{изм}}$ – коэффициент изменчивости.

Как видно из табл.4, средние значения характеристик вектора скорости течений по модельным данным заметно меньше, чем по данным измерений. Разброс значений скорости течения больше для модельных данных. Эллипс СКО (эллипс дисперсии) для последних менее вытянут, чем для данных измерений. В первом случае его большая ось ориентирована с востока на запад, тогда как в случае данных измерений – с юго-востока на северо-запад.

На рис.6 приведены графики функции распределения модуля скорости модельных и натурных данных. Видно, что в диапазоне 2–16 см/с повторяемость модельных данных несколько занижена, а выше 17 см/с – немного завышена по сравнению с повторяемостью данных измерений.

На рис.7 приведены линейные инварианты корреляционного тензора измеренной и модельной скорости течений. Видно, что при завышенной интенсивности модельных колебаний скорости структура процесса приблизительно одинакова, хотя в случае натурных данных наблюдаются высокочастотные колебания малой интенсивности, которые полностью отсутствуют в случае модельных данных. Радиус корреляции в обоих случаях примерно одинаков, вклад низкочастотной составляющей изменчивости несколько выше для модельных данных.

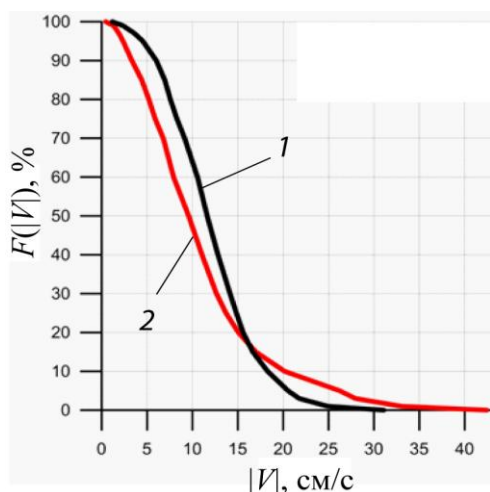


Рис.6. Функция распределения модуля скорости течений в месте установки МАГМС «Кронштадт» по данным измерений (линия 1) и модельным данным (линия 2).

Графики линейного инварианта тензора спектральной плотности $I_1(\omega)$ (рис.7) показывают, что измеренные и модельные данные содержат большой набор колебаний различной цикличности, из которых точно совпадают только два: при частоте $\omega = 0.013$ рад/ч (период около 20 сут, или 480 ч) и $\omega = 0.3$ рад/ч (период около 21 ч). При этом всюду интенсивность модельных колебаний выше, чем данных измерений, за исключением колебания с периодом 6 ч ($\omega = 1.05$ рад/ч), которое в модельном ряду отсутствует полностью.

Сделанные выводы о качестве воспроизведения поля скорости течений носят ограниченный характер по следующим причинам. Во-первых, станция измерений скорости течения не совпадает с узлом сетки модели и, во-вторых, данные измерений содержат много пропусков различной продолжительности: всего к обработке пригодно 830 ежечасных отсчетов прибора при общей длине ряда 1072 ч.

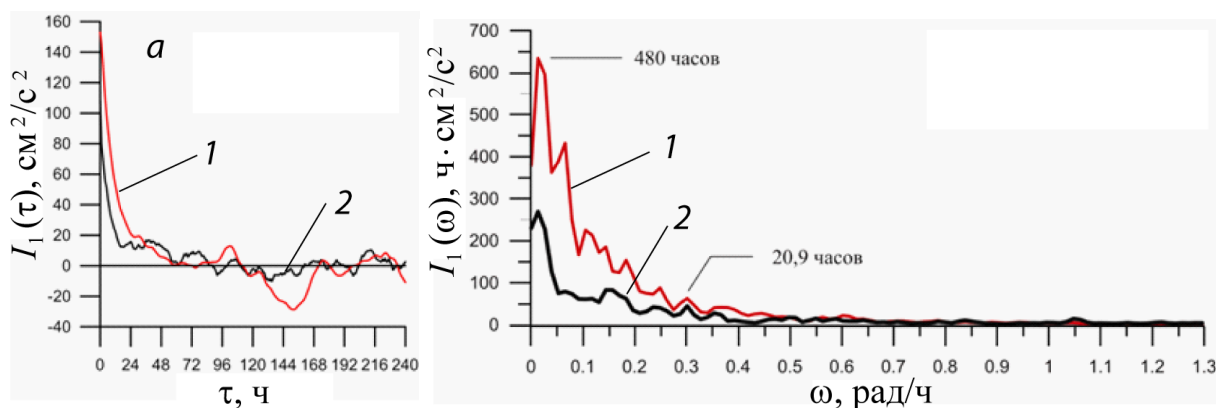


Рис.7. Линейный инвариант корреляционного тензора (а) и спектральной плотности скорости течения (б) в месте установки МАГМС «Кронштадт» по модельным данным (линия 1) и по данным измерений (линия 2).

На основе анализа результатов моделирования уровня и скорости течений с данными гидрометеорологических станций Кронштадт и Горный институт показано, что модель NEVAM в целом адекватно воспроизводит гидрологический режим в восточной части Финского залива и Невской губе при штормовых нагонах в условиях маневрирования затворами КЗС. Существующая систематическая ошибка прогноза уровня может быть откорректирована путем ассимиляции данных наблюдений или коррекции граничного условия на открытой западной границе модельной области.

Сопоставление статистических оценок вероятностных характеристик, рассчитанных для скорости течений, показало, что закономерности изменчивости натурных и модельных данных довольно близки, но сами данные измерений и моделирования заметно различаются между собой как по амплитуде, так и по фазе колебаний. Отметим хорошее

совпадение по направлению максимумов плотности распределения скорости течения, хотя при этом значения модуля измеренной скорости для всех максимумов распределения на 5–7 см/с превышают значения модуля рассчитанной скорости.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ 07-05-13590-офи_ц.

Литература

1. Klevanny K.A. et al. An integrated modelling system for coastal area dynamics // Intern. J. for numerical meth. in fluids. 1994. V.9. P.181–206.
2. PSU/NCAR Mesoscale Model (Pennsylvania State University. National Center for Atmospheric Research Mesoscale Model (known as MM5)). <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5-home.html>.
3. Карлин Л.Н. и др. Испытание оперативной океанографической системы при прогнозе гидродинамических характеристик в Финском заливе Балтийского моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2010. № 3(9). С.39–48.
4. Booij N. et al. A third-generation wave model for coastal regions. Part 1. Model description and validation // J. Geophys. Res. 1999. V.104, N C4. P.7649–7666.
5. Eilola K. et al. Eutrophication Status Report of the North Sea, Skagerrak, Kattegat and the Baltic Sea: A model study. Present and future climate // Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI): OCEANOGRAPHI. 2013. N 115. 50 p.
6. Neelov I.A. et al. A simulation of the Gulf of Finland ecosystem with a 3-D model // Proc. Estonian Acad. of Sci., Biology, Ecology. 2003. V.52(3). P.346–359.
7. HIRLAM (High Resolution Limited Area Modelling project). <http://hirlam.org>.
8. Funkquist L. HIROMB, an operational eddy-resolving model for the Baltic Sea // Bulletin of the Maritime Institute in Gdansk. 2001. V.28, N 2. P.7–16.
9. Ryabchenko V. et al. Modelling ice conditions in the easternmost Gulf of Finland in the Baltic Sea // Continental Shelf Research. 2010. V.30. P.1458–1471.
10. Blumberg A.F. et al. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model / Ed. N.Heaps. Three-dimensional Coastal Ocean Models // Amer. Geophys. Union. 1987. 208 p.
11. Mellor G.L. et al. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. of Geophys. and Space Phys. 1982. V.20. P.851–875.
12. Smagorinsky J. et al. Numerical results from a nine level general circulation model of the atmosphere // Monthly Weather Rev., 1965. V.93. P.727–768.
13. Haapala J. et al. 2005. A numerical study of open water formation in sea ice // J. Geophys. Res. 2005. V.110(C9). P.1–17; doi: 10.1029/2003JC002200. issn: 0148-0227.
14. Рябченко В.А. и др. Воспроизведение климатических изменений в Арктическом бассейне на основе модели циркуляции океана и льда без привязки к климатической солёности на поверхности океана // Тр. ААНИИ Т.446: Исследование изменений климата и процессов взаимодействия океана и атмосферы в полярных областях. СПб.: Гидрометеоздат, 2003. С.60–82.
15. Бельшиев А.П., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А. Вероятностный анализ морских течений. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 260 с.

Статья поступила в редакцию 05.04.2013 г.

