

И. В. Новикова, С. Мостаманди, К. Г. Рубинштейн

**РЕЗУЛЬТАТЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ ДЕТАЛИЗАЦИИ
ПРИЗЕМНОГО ВЕТРА И ПРИЗЕМНОГО ДАВЛЕНИЯ
НАД СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТЬЮ РОССИИ
(РЕГИОН БАЛТИЙСКОГО МОРЯ) ДЛЯ РАСЧЕТА НАВОДНЕНИЙ**

Введение

С учетом географического положения Санкт-Петербурга и постоянно существующей опасности невских наводнений разработка надежных методов прогнозирования наводнений — чрезвычайно актуальная задача.

Прогноз наводнений зависит от двух основных составляющих:

- 1) прогноза синоптической ситуации над Балтикой,
- 2) прогноза ее влияния на уровень воды в Финском заливе и в Неве.

Задача данной работы — прогноз синоптической ситуации при помощи региональной гидродинамической модели MM5 (США) (Mesoscale Model, version 5, см. <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/>) и анализ полученных результатов динамической детализации.

При анализе результатов использованы синоптические карты, фактические данные скорости и направления ветра, приземного давления, данные уровня воды по четырем метеостанциям (Кронштадт, Выборг, Озерки, Хельсинки).

Для сравнения результатов прогнозов по модели MM5 проанализирован также прогноз синоптической ситуации при помощи региональной модели скандинавских стран HIRLAM (см. <http://hirlam.org>).

Для расчета прогноза уровня воды в Финском заливе и в Неве использована модель CARDINAL¹ (<http://webcenter.ru/~klevanny/>).

1. Невские наводнения: причины и механизмы

Невские наводнения представляют собой крайне сложное явление. В их возникновении и развитии участвуют многочисленные метеорологические и гидрологические факторы. Значение каждого фактора и их комбинации меняются от одного случая наводнения к другому.

¹ Coastal ARea Dynamic INvestigation Algorithm.

При наводнении циклоны, фронты и связанные с ними поля давления и ветра обуславливают быстрые деформационные колебания уровня воды. В зависимости от синоптических условий колебания уровня могут принимать вид либо длинной перемещающейся волны, либо приближаться к виду стоячей волны (сейше). Эти волны при распространении по Финскому заливу изменяются под влиянием формы береговой линии и ветра в момент прохождения волны. Обычно при наводнениях происходит сложение различных видов колебаний уровня, т. е. на волну сейшеобразного характера накладывается перемещающаяся длинная волна.

В Финском заливе нарастание волн усиливается ветровым нагоном.

На колебания уровня воды, вызванные этими явлениями в устье, также оказывают влияние сток Невы и приливные колебания [1].

Наиболее очевидные и ярко выраженные метеорологические явления, приводящие к резкому подъему воды при невских наводнениях, это сильный ветер западного направления, противоположный течению Невы. Как правило, при наводнениях он сопровождается циклонами, траектории которых проходят над центральной Балтикой и Финским заливом. Циклоны, как области низкого атмосферного давления, проходя над морем, вызывают повышение уровня воды, как бы «всасывая» ее в центре низкого давления. В середине Балтики высота такой волны держится в пределах 30—50 см, а скорость ее свободного распространения составляет 40—60 км/ч. Если направления движения циклона и длинной волны совпадают, то эта волна может сохранить и даже увеличить свою высоту, получая постоянную подпитку энергии от циклона.

Наиболее благоприятные условия для ветровых нагонов создаются в тех случаях, когда наряду с ростом западной составляющей скорости ветра в Финском заливе значительно падает давление и уровень воды увеличивается по направлению от входа в Финский залив к его вершине.

Модель прогноза уровня воды в Финском заливе К. А. Клеванного представляет собой замкнутую систему уравнений мелкой воды, одно из преимуществ которых — сравнительно доступная гидрологическая информация, необходимая для их численного интегрирования, и двумерное уравнение переноса примесей в криволинейных координатах. Исходная система уравнений, без уравнения переноса примесей, приведена в работе [2]. Программная реализация модели CARDINAL использована в работе как основной механизм прогноза уровня воды [3, 4]. Программа имеет удобный и многофункциональный пользовательский интерфейс. Использование метода криволинейных координат позволяет достичь высокого разрешения сетки в важных областях и получать более точные решения, чем при использовании прямолинейных сеток.

2. Детализация прогноза ветра и давления над северо-западом России при помощи региональной гидродинамической модели MM5

Успешность гидродинамического прогноза уровня воды при прогнозировании невских наводнений в высокой степени зависит от надежности прогноза атмосферных параметров.

Качество прогноза метеорологических параметров и уровня воды в этом сложном регионе в большой степени связано с деталями орографии, точностью описания свойств и конфигурации водной поверхности. Как правило, глобальные прогностические модели не позволяют описать эти свойства достаточно точно, и поэтому для прогноза используются региональные модели с высоким пространственным разрешением в этой области, а из глобальных моделей получают начальные и граничные условия. Поэтому мы эти расчеты называем «детализацией» крупномасштабного прогноза.

В качестве начальных и граничных условий использованы данные реанализа. Эксперименты проведены для двух принципиально различных случаев нагона: 1) зимой (3—11 января 2005 г.) и 2) летом (20—22 июня 2002 г.). В течение обоих периодов над Финским заливом проходили мощные циклоны, которые вызвали сильный ветровой нагон и как следствие — повышение уровня воды в Неве более 1 м.

Прогностическим регионом модели MM5 является северо-западная область России. Сетка с пространственным шагом 18 км вложена в сетку с пространственным шагом 54 км. Модель HIRLAM имеет пространственное разрешение 22 км.

Прежде чем анализировать прогноз синоптической ситуации, рассмотрим результаты расчета нагонов за эти сроки. На рис. 1 приведены фактические уровни воды и результаты расчетов по модели CARDINAL для вариантов расчета по давлению и ветру из моделей MM5 и HIRLAM. Видно, что 21 июня 2002 г. при помощи модели CARDINAL и метеорологического прогноза по модели MM5 практически идеально удалось воспроизвести амплитуду подъема воды, а по фазе подъем прогнозировался на несколько часов раньше, чем наблюдалось.

Прогноз уровня по данным модели HIRLAM описал только 80 % амплитуды, а сдвиг фазы сравним с аналогичным по данным MM5.

В зимнем нагоне отмечены две сильные волны (8 и 10 января 2005 г.), фазы которых прогнозировались по обоим моделям вполне удачно, а амплитуды в прогнозах по данным обеих моделей завышены, особенно 10 января. Причем завышение по данным MM5 составляло около 30 %, а по данным HIRLAM — 20 %.

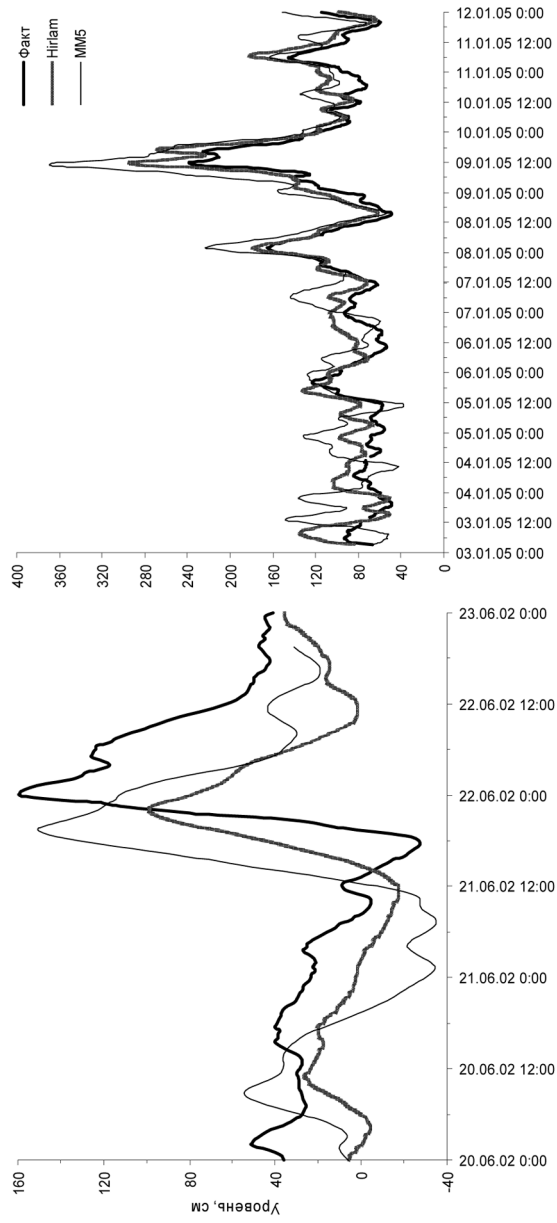


Рис. 1. Уровень воды (см) в реке Неве 20—22 июня 2002 г. (слева) и 3—11 января 2005 г. (справа).
 Результаты расчета по модели CARDINAL с метеорологическими прогнозами из MM5 и HIRLAM
 и по данным наблюдений.

Перейдем к анализу приведенных результатов нагонов. Для этого рассмотрим корреляции фактических данных ветра и давления с результатами прогнозов по моделям, а также с данными реанализа в четырех пунктах наблюдений для двух периодов:

- 1) 20—22 июня 2002 г.,
- 2) 3—11 января 2005 г.

Из таблицы видно, что коэффициенты корреляции скорости ветра в летнем периоде на всех пунктах наблюдения, кроме станции Озерки, в прогнозах по модели MM5 несколько выше, чем в прогнозах по модели HIRLAM, и в обоих моделях заметно выше, чем в реанализе. Направление ветра в летний период в обоих прогнозах коррелирует с результатами наблюдений практически одинаково.

Сравнивая связи для зимнего периода, отметим, что корреляции скорости ветра в моделях очень близки друг к другу и также выше корреляции временного хода скорости ветра по данным реанализа. Однако они приблизительно на 10 % ниже, чем для летнего периода. Корреляция направления ветра для обеих моделей сравнима. У модели HIRLAM корреляция направления ветра несколько ниже, особенно для станции Озерки. Отметим также, что временной ход направления ветра в обоих периодах по данным реанализа воспроизведен не хуже, а для некоторых пунктов даже лучше, чем по обеим моделям.

В целом констатируем, что динамическая детализация улучшает временной ход скорости ветра, но не всегда улучшает его направление.

Судя по приведенным примерам, выскажем гипотезу о том, что близость временного хода скорости ветра к данным наблюдения в Кронштадте в большой мере определяет удачность воспроизведения фазы и амплитуды нагона (так как Кронштадт — наиболее близкий к устью

Коэффициенты корреляции модельных характеристик ветра с фактическими

Пункт	Скорость ветра			Направление ветра		
	MM5	HIR-LAM	Реанализ	MM5	HIR-LAM	Реанализ
20—22 июня 2002 г.						
Кронштадт	0,94	0,93	0,87	0,82	0,82	0,93
Выборг	0,86	0,85	0,85	0,87	0,88	0,84
Озерки	0,86	0,89	0,83	0,77	0,70	0,84
Хельсинки	0,92	0,87	0,59	0,72	0,72	0,85
3—11 января 2005 г.						
Кронштадт	0,85	0,82	0,77	0,69	0,47	0,77
Выборг	0,79	0,81	0,72	0,76	0,77	0,72
Озерки	0,86	0,82	0,80	0,66	0,46	0,80
Хельсинки	0,82	0,84	0,75	0,85	0,92	0,75

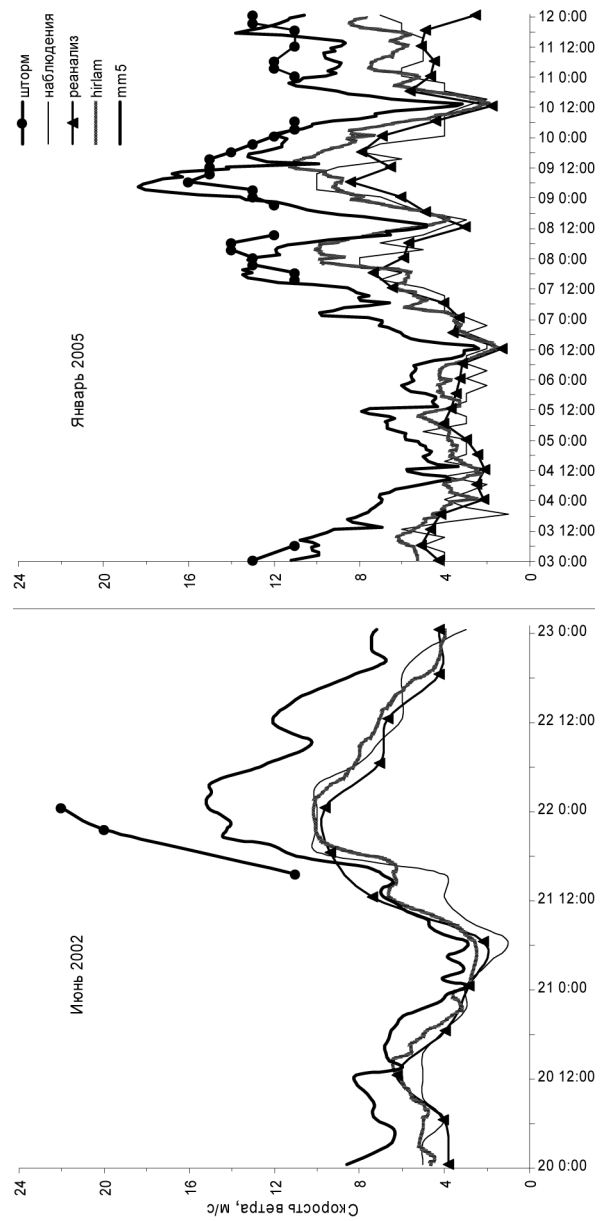


Рис. 2. Временной ход модуля скорости ветра для двух периодов:
 20—22 июня 2002 г. (справа) и 3—11 января 2005 г. (слева) в Кронштадте.
 Результаты прогноза по двум моделям, наблюдениям и реанализу.

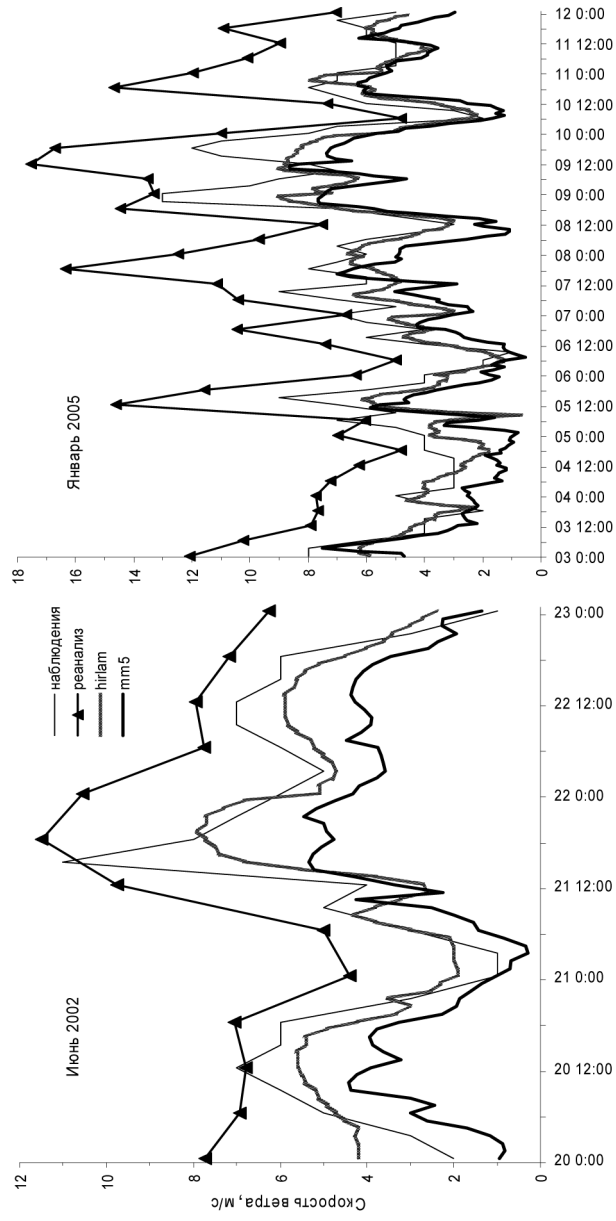


Рис. 3. Временной ход модуля скорости ветра (м/с) для двух периодов:
 20—22 июня 2002 г. (справа) и 3—11 января 2005 г. (слева) в Хельсинки.
 Результаты прогноза по двум моделям, наблюдениям и реанализу.

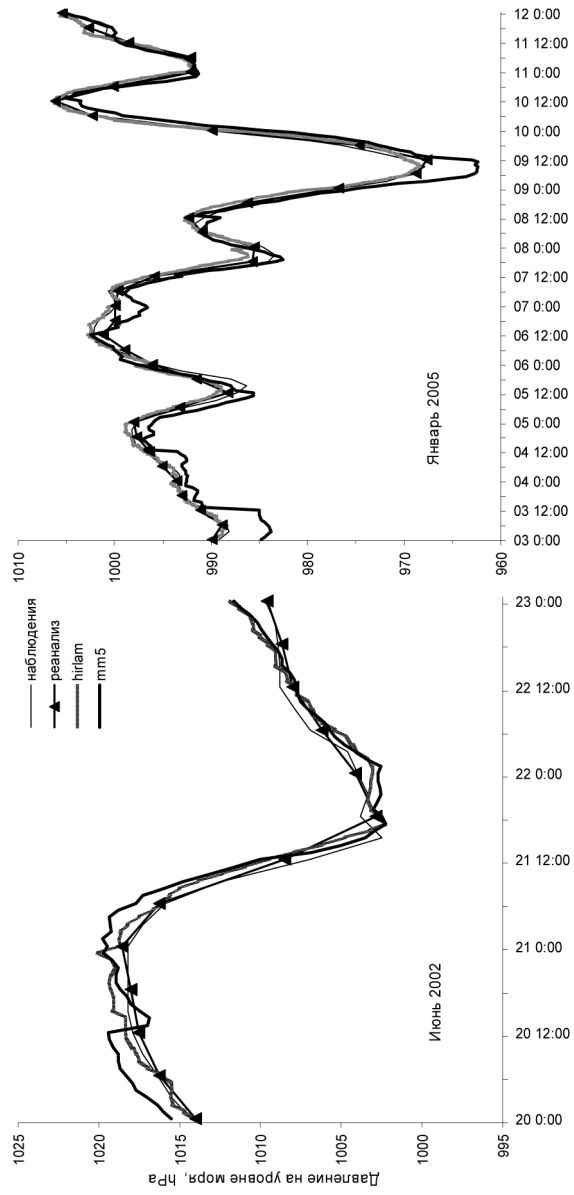


Рис. 4. Временной ход приземного давления для двух периодов:
 20—22 июня 2002 г. (справа) и 3—11 января 2005 г. (слева) в Кронштадте.
 Результаты прогноза по двум моделям и наблюдениям.

Невы пункт, расположенный прямо напротив него, все остальные пункты расположены дальше на северном берегу Финского залива). Эту гипотезу предстоит проверить в дальнейшем на большом статистическом массиве данных.

На рис. 2 приведен временной ход модуля скорости ветра для г. Кронштадт в двух периодах прогноза наводнения. Заметно, что для обоих периодов по прогнозу модели ММ5 сила ветра над Кронштадтом была больше, чем по другим моделям. Для летнего периода прогноз был близок к наблюдаемым порывам. В зимний период ветер в момент нагона превосходил порывы. Как видно на рис. 1, это и привело к прогнозу чересчур большого нагона. Отметим также, что реанализ в обоих примерах описал наименьшие, хотя и близкие значения скорости.

Для анализа качества воспроизведения крупномасштабного поля скорости ветра рассмотрим его временной ход в наиболее удаленной точке — Хельсинки — для обоих периодов прогноза (рис. 3). Заметно, что для обоих примеров наиболее сильный ветер воспроизведен в реанализе. Он превосходил данные наблюдений в 2—3 раза. Наименьшие значения модуля ветра воспроизведены моделью ММ5.

Для полной картины воспроизведения моделями крупномасштабного барического поля рассмотрим прогноз хода давления для обоих периодов (рис. 4). Ход давления при прохождении циклона над регионом в момент наводнения летом и по фазе, и по значениям был близок к данным наблюдений, а зимой в прогнозе по данным модели ММ5 был предсказан заметно более глубокий циклон для срока 00 ч 9 января 2005 г., что и послужило, скорее всего, причиной прогнозирования заметно большей высоты нагона. При этом отметим, что ход давления в обоих прогнозах предсказан близко к результатам наблюдений. По результатам реанализа он ближе к данным наблюдений, чем по прогнозам региональных моделей.

Выводы

1. По результатам прогнозов региональных моделей, или другими словами путем динамической детализации метеорологического процесса с пространственным разрешением порядка 20 км возможно описать фазу и амплитуду наводнений при помощи гидродинамической модели [4] близко к результатам наблюдений.

2. Динамическая детализация полей ветра позволяет заметно приблизить прогнозные значения фазы и амплитуды наводнения к результатам наблюдений.

3. Динамическая детализация полей приземного давления при помощи модели MM5 не всегда приводит к улучшению результатов. В частности, в случае прохождения над акваторией глубокого циклона модель чрезмерно увеличила депрессию, и тем самым прогнозная высота подъема уровня при наводнении оказался заметно выше фактического.

Работа выполнена при частичной поддержке грантами INTAS 03—51—5296, РФФИ 03—05—64312, 05—05—08018—ОФИ, 06—05—64104, NATO ESP CLG 981842.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермоленко Н. А. Статистическая оценка работы модели BSM-5 в оперативной практике СЗУГМС за период 16.01.2004—31.03.2005 гг. // Дипломная работа Н. А. Ермоленко. — СПб.: Изд. РГГМУ, 2005.
2. Клеванный К. А. Моделирование длинноволновых процессов в геофизической гидродинамике // Автореферат дис. док. физ.-мат. наук. — СПб.: 1999.
3. Клеванный К. А., Матвеев Г. В. Справочник пользователя программы CARDINAL. — СПб., 1994.
4. Klevanny K. A., Matveyev V. G., Voltzinger N. E. An integrated modeling system for coastal area dynamics // Intern. J. for Numerical Methods in Fluids. — 1994. — Vol. 19. — P. 181—206.