

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФГБОУ ВПО  
«Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ)

---

На правах рукописи  
УДК 551.509.68:551.501.86

**Мостаманди Мохаммад Сулейман Вахидулла**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ВЕТРА И ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ  
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ШТОРМОВЫХ  
НАГОНОВ**

25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2013

Диссертации выполнена в ФГБОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет»

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, профессор Смышляев Сергей Павлович
Научный консультант:	кандидат физико-математических наук, доцент Анискина Ольга Георгиевна
Официальные оппоненты:	Доктор технических наук, профессор Кулешов Юрий Владимирович
	кандидат географических наук, доцент Аверкиев Александр Сергеевич
Ведущая организация:	Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова

Защита диссертации состоится 30 мая 2013 года в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д212.197.01 при Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, дом 98, ауд.308

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета

Автореферат разослан 30 апреля 2013 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук, доцент

 **В.Кашлева**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы.**

Штормовой нагон – это волна, длина которой в сотни и тысячи раз превышает глубину водоема и при взаимодействии с берегами приводящая к опасному подъему уровня. Основным фактор, приводящий к штормовому нагону – сильный ветер. Успешность гидродинамического прогноза нагона зависит от прогноза атмосферных параметров и от степени детального описания орографии, батиметрии и конфигурации акватории

Петербург – город наводнений и, естественно, что эта тема является актуальной. Животрепещущие вопросы, – какой высоты, с какой вероятностью и когда будет следующее наводнение – возникают постоянно. И эти вопросы не сняты с повестки дня несмотря на завершение строительства комплекса сооружений защиты С. Петербурга от наводнений.

Петербургские наводнения – едва ли не первая научная проблема отечественной гидрометеорологии, прошедшая все стадии исследований – от визуальных наблюдений, описаний, измерений и накопления фактов до раскрытия причин явления и его прогноза на основе математической теории.

Отсчет уровня воды ведется от среднего многолетнего положения водной поверхности Балтийского моря у Кронштадта, принятого в нашей стране за исходный горизонт измерения высот на суше и глубин на морях. Этот горизонт именуется «нулем Кронштадтского футштока (0 КФ)» или «нулем Балтийской системы высот (0 БС)».

До 1982 года высоты наводнений в Ленинграде отсчитывались от ординара у Горного института, показывающего средний многолетний уровень воды в Неве в этом месте. Этот ординар выше 0 КФ на 11 см. За низшую высоту наводнений была принята отметка 150 см выше ординара.

В дальнейшем наводнениями считались подъемы воды на 91 см БС, опасными наводнениями – подъёмы воды от 161 до 210 см над 0 БС, особо опасными – от 211 до 299 см БС, катастрофическими – свыше 300 см БС.

Учитывая уникальность географического расположения Петербурга и, вследствие этого, постоянно существующую опасность невских наводнений, разработка надежных и, что не менее важно, заблаговременных методов прогнозирования была и остается чрезвычайно актуальной задачей. Однако такая задача в принципе выполнима лишь при комплексном подходе, когда в расчет принимаются не какие-то отдельные механизмы и предикторы, а оценивается их индивидуальный и суммарный вклад в процессы опасных подъемов в дельте Невы.

### **Цель диссертационного исследования.**

Повышение качества гидродинамического прогноза нагонных волн за счет учета вклада мелкомасштабных процессов в формирование полей ветра и давления, создающих потенциал для возникновения наводнений, и ассимиляции данных наземных и спутниковых наблюдений.

Для выполнения поставленных целей в диссертационной работе сформулированы и решены следующие задачи:

- Выбор модели для прогноза штормовых нагонов, приводящих к затоплению суши,
- Разработка и практическая реализация методологии использования атмосферной гидродинамической модели для управления моделью прогноза штормовых нагонов,
- Оптимизация атмосферной гидродинамической модели с целью учета мелкомасштабных процессов, выбора шагов по времени и пространству,
- Настройка гидродинамической модели атмосферы с целью получения полей ветра и давления и их дальнейшего использования в модели штормовых нагонов,
- Улучшение качества прогноза полей ветра и давления за счёт ассимиляции гидродинамической моделью атмосферы спутниковых данных (GPS/GLONAS) и данных наземных метеостанций, не входящих в международный обмен,
- Улучшение качества прогноза штормовых нагонов за счёт ассимиляции данных наблюдений атмосферной гидродинамической моделью.

### **Научная новизна**

В процессе анализа проблемы, разработки новых методов, их сравнения с существующими подходами и применения для учета вклада мелкомасштабных процессов были получены следующие новые научные результаты:

- 1) Получены новые оценки влияния атмосферных условий на состояние акватории Балтийского моря и реки Невы;
- 2) Разработана новая методика ассимиляции спутниковых и синоптических данных мезомасштабной гидродинамической моделью,
- 3) Получены новые оценки качества воспроизведения атмосферных условий гидродинамической моделью WRF по данным метеостанций Северо-Запада Российской Федерации;
- 4) Получены новые оценки чувствительности качества прогноза невыхских наводнений к изменениям атмосферных условий;

### **Положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Метод использования гидродинамической модели высокого разрешения для описания мелкомасштабных процессов, способствующих возникновению нагонных наводнений
2. Методика ассимиляции синоптических и аэрологических наблюдений региональной гидродинамической моделью для улучшения прогноза метеорологических характеристик при решении прогностических задач.
3. Результаты численного моделирования метеорологических и гидрологических характеристик, позволяющие повысить качество прогнозов невыхских наводнений при совместном использовании

программного комплекса CARDINAL и гидродинамической модели WRF.

### **Обоснованность и достоверность результатов**

Обоснованность и достоверность результатов работы подтверждается строгой математической постановкой задачи, использованием многократно проверенных методов оценки прогностической значимости модели, использования сетевых метеорологических данных для формирования исходной информации о прогнозировании скоростей ветра и уровня воды и непротиворечивостью с результатами других, независимых исследований по данной тематике.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы заключается в том, что впервые продемонстрировано существенное влияние мелкомасштабных физических процессов на формирование нагонной волны, создающей потенциал для возникновения наводнений.

Научный интерес также представляет обзор существующих моделей, методик и формул, адаптированных и применимых для расчета скоростей ветра с учетом мелкомасштабных процессов.

Практическую ценность представляет созданная в процессе работы методика использования мезомасштабной гидродинамической модели с блоком ассимиляции данных для прогноза опасных явлений погоды.

Внедрение новой методологии расчета уровня невыхских наводнений за счет более полного пространственно-временного представления атмосферных условий позволит улучшить качество прогнозов и заблаговременность предупреждения населения.

### **Личный вклад автора**

Все положения, выносимые на защиту, основаны на результатах исследований, проведенных автором самостоятельно. Личный вклад автора заключается в постановке целей и формулировке задач исследований, обосновании выбора теоретических и расчетных методов решения поставленных задач, анализе полученных данных и их интерпретации. Автор непосредственно устанавливал и адаптировал гидродинамическую модель WRF к разным областям земного шара, разрабатывал методику ассимиляции данных спутниковых и синоптических наблюдений в гидродинамические модели, проводил исследования и обрабатывал данные численных экспериментов, составлял отчетную документацию, подготавливал материалы докладов и публикаций, формулировал выводы и заключения по работе, разрабатывал рекомендации для практического использования.

## **Апробация работы**

Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались:

на сессиях Ученого Совета и межкафедральных семинарах Российского государственного гидрометеорологического университета;

на XVI международной школы-конференции молодых ученых, москва-2012

на рабочих семинарах в Финском метеорологическом институте, Хельсинки (январь-2010, сентябрь-2010, апрель-2011);

на международном семинаре - International Workshop Flood Vulnerability and Flood Protection in Tidal and Non-Tidal Regimes: North and Baltic Seas - Deltares, Delft, The Netherlands(2009);

международном симпозиуме - International Workshop "Extreme water levels in the Eastern Baltic". St. Petersburg, Russia (2007);

на международном конференции - International Conference on Hydrometeorological safety and adaptation of the society to the extreme climate changes. Moscow, Russia (2006);

на международном семинаре - International Seminar Operational Management for St.Petersburg Flood Protection Barrier, Morzaschita, St.Petersburg.(2005);

на конференции - VI Russian Hydrological Congress Section 2 (2004)

на рабочей группе - 6th HIROMB Scientific Workshop St. Petersburg. Morzaschita (2003);

на международном конференции- Int. Conf. Flooding and Environmental Challenges for Venice ant its Lagoon: State of Knowledge 2003. Churchill College, Cambridge University, England (2003);

на международном семинаре-Third Study Conference on BALTEX, Mariehamn, Aland, Finland (2001);

на международном семинаре - International Workshop River Runoff: Minima and Maxima. St.Petersburg (2001).

## **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и 1 приложения. Общий объем работы составляет 112 страницы, 15 рисунков, 9 таблиц. Список использованной литературы содержит 97 наименований.

## **Основное содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации – необходимость прогнозирования влияния штормовых нагонов на подъем уровня воды в реках, в частности в Неве, сформулированы цель и задачи работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, обоснованы теоретическая новизна и практическая значимость работы, а также приводится краткое изложение содержания диссертации.

В первой главе приводятся оценки вклада отдельных механизмов в формирование нагонных наводнений на примере дельты Невы.

Невские наводнения представляют собой очень сложное явление. В их возникновении и развитии участвуют в разнообразном сочетании многочисленные метеорологические и гидрологические факторы. Значение каждого фактора и характер его сочетания с другими меняется от случая к случаю.

В относительно недавнем прошлом основным фактором, вызывающим невские наводнения, считали прохождение циклонов над центральной Балтикой и Финским заливом. Циклоны, проходя над морем, вызывают повышение уровня воды, как бы «всасывая» ее в центре низкого давления. Этому повышению уровня способствуют и ветровые потоки, направленные по касательной к центру циклона. В результате такого повышения уровня моря от циклона по акватории начинает распространяться длинная волна. В середине Балтийского моря высота такой волны колеблется в пределах от 30 см до 50 см, а скорость ее свободного распространения составляет 40 – 60 км/час. Если направление движения циклона и длинной волны совпадают, то эта волна сохраняет и даже увеличивает свою высоту, получая постоянную энергию от циклона.

Вторым фактором, увеличивающим высоту длинной волны, является её перестройка при вхождении в Финский залив с запада на восток за 7 – 8 часов, и наибольшей высоты она достигает в Невской губе и дельте Невы.

Вход в Финский залив широко открыт для проникновения длинных волн, а его вытянутая форма придает им линейную направленность. В трансформации длинных волн (изменении их длины и высоты) важную роль играет уменьшение глубины и площади поперечного сечения залива, (рисунок1).

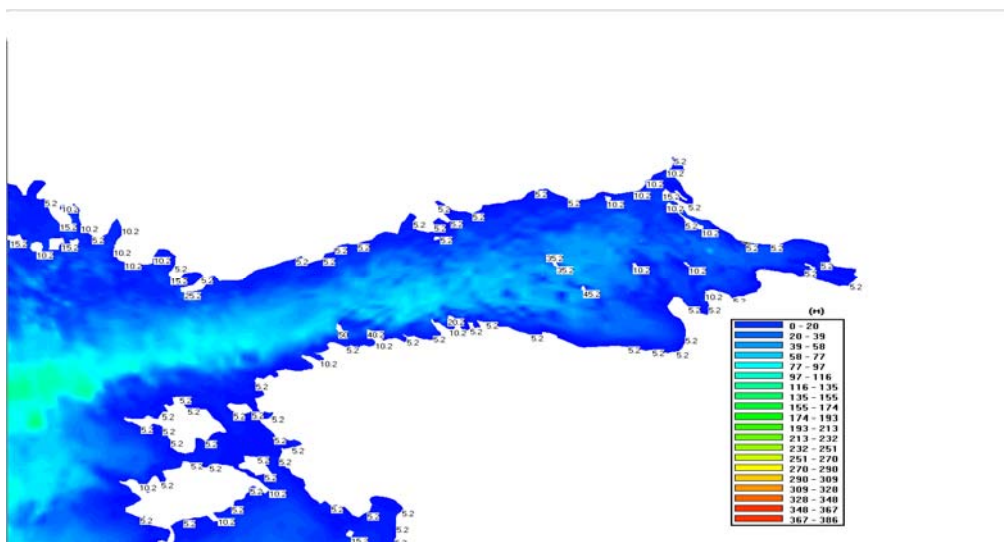


Рисунок 1 – Финский залив Балтийского моря

В результате, даже если длинная волна распространяется только под влиянием силы тяжести, последовательное уменьшение глубины приведет к тому, что ее лобовая часть (ветвь подъема) замедляет движение, а тыловая (ветвь спада) догоняет ее. В результате длина волны сокращается, а высота в устье Невы повышается до 200 – 250 см. Если же ее распространение сопровождается западным ветром, то высота подъема еще возрастает.

Третьим фактором, способствующим повышению уровня воды, является стоячая волна в Финском заливе, то есть сейшевое колебательное движение, которое возникает в результате «раскачивания» всей водной массы, причиной которого также может быть прохождение циклонов и длинных волн. Совпадение по фазе и направлению действия всех трёх факторов способно вызвать наибольшие подъёмы воды. Каждый из этих факторов может действовать в отдельности, но с существенно меньшим эффектом воздействия на высоту наводнения.

И всё же исходной первопричиной невских наводнений является атмосферная циклоническая деятельность, происходящая на границе раздела воздушных масс арктических и умеренных широт и приводящая к значительному усилению ветра, создающему нагон в сторону дельты Невы. Общее распределение по месяцам наводнений связано с сезонными изменениями траекторий движения циклонов в европейской части северного полушария. При этом сезонной закономерностью изменения траекторий циклонов является их смещение к северу в тёплую часть года и к югу – в холодную.

В зависимости от преобладающего вида колебаний выделяют три основных типа наводнений:

1. Вызываемые, в основном, длинной волной и сейшами с предварительным сейшеобразным раскачиванием уровня Балтики (при северном или юго-западном ветре), на которое накладывается влияние ветра и атмосферного давления над Финским заливом.

2. Вызываемые перемещающейся длинной волной и сейшами без предварительного раскачивания уровня моря; циклон проходит над Балтийским морем с юго-запада на северо-восток и выходит на Финляндию.

3. Связанные с резким усилением ветра в Финском заливе, которое вызвано развитием нового циклона, перемещающегося с запада на восток, или перемещением углубляющегося циклона с юга через Финский залив.

Далее рассматриваются синоптические условия невских наводнений. Делается вывод о том, что обычно наводнению сопутствует развитие западной формы циркуляции. При пересечении Балтийского моря по опасной траектории, циклон увлекает длинную волну к горлу Финского залива. Высота волны в горле залива не превышает 30 – 50 см, а скорость распространения гребня сравнима со скоростью движения циклона и составляет 40 – 70 км/ч.

Также рассматривается климатический аспект возникновения невских наводнений. Вероятность возникновения и прохождения через Балтику



«наводненческого» циклона осенью климатически возрастает. Август является первым месяцем «наводненческого периода», который заканчивается в январе. Февраль стал «наводненческим» месяцем лишь в конце 20 века. Известно всего одно наводнение, случившееся в феврале (22 февраля 1990 года), когда Нева поднялась на 2 метра выше ординара.

В заключение первой главы рассматриваются методы прогноза нагонных наводнений, демонстрируются преимущества гидродинамических методов прогноза и обосновывается важность корректного численного прогноза атмосферных метеорологических условий и, прежде всего, полей ветра и давления для улучшения качества гидродинамического прогноза нагонных наводнений.

Во **второй главе** даётся обзор существующих гидродинамических моделей для прогноза подъема уровня воды.

В настоящее время возможности выбора верифицированной математической модели для прогноза уровня в произвольной морской акватории достаточно широки. В данной работе рассмотрены 16 моделей.

Наиболее известными гидродинамическими моделями являются:

Модели фирма Deltares (Нидерландах),

Модели Датского гидрологического института (DHI),

Модели фирмы Hydraulic Research Wallingford (Великобритании),

Модель BSHmod Федерального управления по гидрографии (Гамбург, Германия),

Модель HIROMB Шведского метеорологического и гидрологического института (Норчепинг, Швеция),

Модель OAR3d, разработанная фирмой Ocean Applied Research Ltd (Канада),

Модель Балтийского моря, созданные с помощью комплекса CARDINAL (BSM2- BSM6) (Санкт-Петербург, Россия)

Модель HYBOS океанографической компании OCEANOR (Норвегии),

Модель совместной динамики льда и воды (ДГДМ) ААНИИ (Санкт-Петербург, Россия)

Модель SPBEM ААНИИ (Санкт-Петербург, Россия),

Модель Невской губы и восточной части Финского залива СПб Отдела ИО РАН NEWAM (Санкт-Петербург, Россия),

Модели Hansen, Wetehinen, OAAS (Финляндия),

Модель POM Принстонского университета (США).

Краткое описание этих моделей приводится в диссертационной работе. Обосновывается выбор модели BSM6 (автор К.А.Клеванный), созданной с помощью ПК CARDINAL, для достижения целей и решения задач настоящего диссертационного исследования. Для этой модели в работе приводится наиболее подробное описание.

Далее во второй главе описываются требования, принципы и подходы к выбору атмосферной модели численного прогноза погоды для управления гидродинамической моделью прогноза уровня и волнения Балтийского моря.

Очевидно, что успешность гидродинамического прогноза уровня Балтийского моря и его волнения в сложном регионе в значительной степени зависит от надежности прогноза атмосферных параметров и, прежде всего, направления и скорости ветра и давления. Как правило, глобальные прогностические модели не позволяют описать эти свойства с достаточной точностью, а потому используются региональные модели с высоким пространственным разрешением, в которых из глобальных моделей получают начальные и граничные условия. В данном диссертационном исследовании рассматривались атмосферные региональные модели HIRLAM, HIRLAM-FORCE, WRF и COSMO. Приводится основная информация об этих моделях для оценки целесообразности их использования совместно с моделью гидродинамической моделью уровня Балтийского моря. Модели различаются методами решения уравнений гидродинамики атмосферы, разрешающими способностями сеток и методами параметризации физических процессов.

В заключение второй главы обосновывается необходимость проведения экспериментальной проверки целесообразности использования различных атмосферных моделей для управления гидродинамической моделью прогноза штормовых нагонов, путем проведения модельных экспериментов.

Результаты численных экспериментов по выбору лучшей атмосферной модели для управления гидродинамической моделью прогноза уровня воды в Северо-Западном регионе описываются в третьей главе. По результатам проведенных модельных экспериментов обосновывается выбор гидродинамической мезомасштабной модели WRF. В процессе адаптации данной модели к области интегрирования и решаемой задаче были проведены численные эксперименты по выбору лучшей модификации модели. Анализ значимости различных факторов, определяющих качество прогноза ветра и давления у поверхности земли показал, что наибольшее влияние на данные параметры оказывает параметризация процессов в пограничном слое атмосферы (ПСА).

В гидродинамических моделях прогноза погоды хорошее описание процессов в ПСА имеет решающее значение для надлежащего прогнозирования суточного цикла, ветра в нижних слоях атмосферы, конвекции, влияния сложного рельефа местности, а также времени и места развития конвекции. Связь атмосферной процессов с поверхностью льда, водной и земной поверхностью происходит именно через процессы в пограничном слое. В основном атмосферная турбулентность возникает из-за сдвига ветра и силы плавучести в форме крупных вихрей. Крупные вихри – это вихри соизмеримые с высотой пограничного слоя, т.е. имеющие диаметр от нескольких сотен до 3000 метров. Этот диапазон размера вихрей называется энерго-содержащим диапазоном. Вихри несут кинетическую энергию турбулентности (КЭТ), которая черпается из осреднённого течения за счет турбулентного трения между слоями среды и распространяется по пространству путём конвекции и диффузии. Перераспределение энергии турбулентности по направлениям осуществляется за счёт пульсаций давления, а диссипация кинетической

энергии пульсаций скорости, то есть переход ее в теплоту, происходит под действием молекулярных напряжений.

Атмосферные модели с горизонтальным разрешением более нескольких сотен метров не могут явно разрешить крупномасштабные турбулентные вихри. В этих моделях надо турбулентные потоки описываются параметрически. В идеале, эти уравнения следует решать как прогностические. Однако, система прогностических уравнений для турбулентных потоков содержит больше неизвестных, чем уравнений. Это приводит к необходимости параметризовать несколько членов уравнения, как функции от известных или решаемых переменных. Невозможность замыкания уравнений для турбулентных потоков без параметризации некоторых членов носит название проблемы замыкания.

В мезомасштабных моделях прогноза и климатических моделях атмосферы, для замыкания наиболее популярны два следующих приближения:

- 1) «Локальные» замыкания, основанные на турбулентной диффузии;
- 2) «Нелокальные» замыкания.

В модели турбулентной диффузии (часто называют моделью К-теории), турбулентный поток адиабатически постоянной величины  $a$ , пропорционален ее градиенту :

$$\overline{w'a'} = -K_a \frac{d\bar{a}}{dz} \quad (1)$$

где  $K_a$  – коэффициент турбулентности

Главный вопрос в том, как выразить  $K_a$  через известные величины. Для этого в мезомасштабных и глобальных моделях обычно используют одно из следующих приближений:

1. Замыкание первого порядка, в котором  $K_a$  определяется через вертикальный сдвиг и статическую устойчивость, или путем задания  $a$ .
2. Замыкания порядка 1.5 или КЭТ замыкание, в котором турбулентная энергия считается из прогностического уравнения для КЭТ, а  $K_a$  определяется из полученной энергии и некоторого масштаба длины
3. К-профиль, в котором определенный профиль  $K_a$  применяется для диагностически определённой высоты турбулентного слоя. Этот метод предполагает, для различных типов ППС, использование измерений и численных экспериментов для определения профиля коэффициентов вихревой диффузии, соответствующих наблюдаемым потокам и градиентам.

В численных экспериментах по адаптации выбранной мезомасштабной атмосферной модели к задаче настоящего диссертационного исследования было исследовано 8 параметризаций пограничного слоя атмосферы. В третьей главе даётся короткая характеристика всех рассмотренных параметризаций, анализируются их достоинства и недостатки. Для выполнения численных

экспериментов была создана область интегрирования с шагом по пространству 10 км и 40 уровнями по вертикали. Шаг интегрирования по времени 60 с. Численный эксперимент выполнялся для двух периодов с 1 по 30 июля 2011 года и с 1 по 31 декабря 2011 года. В качестве боковых и начальных условий были использованы данные ре-анализа NCEP с 6 часовым интервалом. Для оценки качества прогноза были использованы данные с 118 наземных и 5 аэрологические станции. Так как выходные параметры схемы параметризации процессов приземного слоя являются начальными и граничными условиями для блока параметризации пограничного слоя, то не все параметризации приземного слоя совместимы с параметризацией пограничного слоя. Выполнялось 15 серий численных экспериментов (в каждой серии 61 эксперимент) с различными комбинациями параметризации приземного и пограничного слоя.

Проведено статистическое сравнение результатов расчетов по модели WRF с использованием различных схем параметризации планетарного пограничного слоя с натурным наблюдениями. В целом статистические показатели всех экспериментов близки друг к другу. Тем не менее, по результатам проведенных экспериментов выбран наилучший набор параметризации процессов приземного и пограничного слоя с точки зрения получения наилучших результатов при совместном использовании адаптированной атмосферной модели и модели прогноза штормовых нагонов.

В **четвёртой главе** описываются численные эксперименты по прогнозу невыходных наводнений с помощью BSM6(ПК CARDINAL) с использованием в качестве управляющего атмосферного блока разных гидродинамических моделей без ассимиляции и с ассимиляцией данных измерений на постах гидрологических наблюдений.

В этой же главе выполнена оценка точности прогнозов уровня Балтийского моря при помощи модели BSM-6 с использованием для прогноза метеорологических полей атмосферных моделей HIRLAM, FORCE, COSMO, WRF. Численные эксперименты проводились в оперативном режиме в период с 23 августа по 30 сентября 2011г.

При выполнении расчетов происходила запись колебаний уровня моря в С.-Петербурге и Приморске, где, как и на в/п Горный, установлен автоматизированный уровнемер. Для сопоставления с данными наблюдений вычислялись значения следующих статистических характеристик – дисперсия, средняя абсолютная ошибка, средняя квадратичная ошибка, коэффициент корреляции между расчётным и измеренным значением.

Расчеты для каждой модели выполнялись в двух вариантах – с ассимиляцией данных наблюдений уровня моря на в/п Горный институт и без нее. При ассимиляции перед началом каждого расчета все поле уровня Балтийского моря изменялось на постоянную величину, равную половине ошибки прогноза уровня у Горного института на момент начала расчета. Ранее, изменение поля уровня делалось на всю величину ошибки, но при этом в

большинстве случаев после каждого расчета знак ошибки менялся на противоположный.

Расчеты выполнялись с шагом по времени 180 с учетом адвективных членов, при задании условия скольжения на твердых боковых границах, коэффициент горизонтального турбулентного обмена задавался по закону «4/3» с параметром 0.03. Ветровой коэффициент вычислялся по формуле Банке-Смита. Коэффициент придонного трения – 0.0026. Учитывались расходы через Датские проливы. При расчетах использовались метеорологические данные за первые шесть часов каждого прогноза, которые поступали каждые 6 часов.

Для ассимиляции данных метеонаблюдений использовалась вариационная методика 3D-Var.

Задача усвоения в общем виде формулируется следующим образом: необходимо найти такую коррекцию состояния атмосферы  $\vec{\delta x}$ , чтобы анализ состояния атмосферы  $\vec{x}_a$

$$\vec{x}_a = \vec{x}_b + \vec{\delta x} \quad (2)$$

был как можно ближе к вектору истинного состояния атмосферы  $\vec{x}_t$ . Здесь  $\vec{x}_b$  – вектор фоновой оценки.

Основная цель системы ассимиляции – подготовить качественную оценку начального состояния атмосферы с помощью минимизации функционала качества

$$J(x) = J^b + J^o \quad (3)$$

где  $J^b$  и  $J^o$  - составляющие функционала качества за счет фона и наблюдения, соответственно, определяемые по формулам

$$J^b = \frac{1}{2} (x - x^b)^T B_N^{-1} (x - x^b), \quad (4)$$

$$J^o = \frac{1}{2} (y - y^o)^T O^{-1} (y - y^o), \quad (5)$$

где  $B_N^{-1}$  ошибка фона предыдущего прогноза, рассчитанная по формуле

$$B_N^{-1} = \overline{x^b x^{bT}} \approx A (x^{24} - x^{12}) (x^{24} - x^{12})^T, \quad (6)$$

$O_N^{-1}$  - диагональная матрица ковариаций ошибок наблюдений.

Фоновое значение ( $x_b$ ) это априорная оценка состояния атмосферы. В качестве фоновой информации могут использоваться:

- а) климатические данные;
- б) результаты предыдущего усвоения (анализа)
- в) результаты численного прогноза, выполненного с помощью модели атмосферы по предыдущему анализу.

В случае циклического использования варианта в) состояние атмосферы (расчетное) будет эволюционировать в соответствии с модельными данными. При этом эволюционный процесс будет периодически или непрерывно подправляться наблюдениями за фактическим состоянием атмосферы. В результате такой технологии генерируется последовательность анализов, с той или иной степенью успешности отражающих истинное состояние атмосферы на соответствующий момент времени (срок анализа). Такой подход соответствует современной концепции усвоения данных наблюдений и он используется в данной работе.

Классическая система 3D-VAR не учитывает разницу во времени. Для решения этой проблемы использовалась процедура первого приближения присвоенного времени (FGAT). Возможности FGAT позволяют более точно рассчитать инновационный вектор (наблюдения минус фоновые значения), и, следовательно, к более эффективному использованию наблюдений, когда их реальное время отличается от анализируемого.

Ковариационная матрица фоновых ошибок (5) позволяет отдельно определять вертикальные и горизонтальные корреляционные функции. Горизонтальные параметры фильтра зависят от вертикального собственного вектора. Вертикальные режимы получаются в результате разложения статистической модели прогноза ковариационной ошибки по естественным ортогональным функциям. Статистическая разница между 24-часовыми и 12-часовыми прогнозами и используется для определения фоновой ковариационной ошибки.

В настоящей работе используется "NMC-метод", в котором ошибка прогноза ковариации аппроксимируются с помощью разницы прогноза модели в 24 часа (например,  $T + 48 - T - 24$ ). При этом, проведенные эксперименты с моделью ECMWF указывают, что наилучшая статистика ошибок первого приближения может быть получена с помощью анализа циклонического ансамбля прогностических систем, основанного на флуктуациях.

В данной работе фоновая ошибка ковариационной матрицы рассчитывается не только в пространстве вектора состояния модели  $x$ :  $u, v, T, q, p_s$ , но и в качестве управляющей переменной в пространстве, связанном с моделью через пространство  $v$ . В качестве управляющей переменной преобразования  $U$ ,  $x = U v = U_p U_v U_h v$ . Составляющие этой формулы представляют различные этапы ковариационного моделирования:  $U_h$  – горизонтальная ковариация,  $U_v$  – вертикальная ковариация,  $U_p$  – многомерная ковариация.

Компоненты  $v$  выбраны так, что ошибка кросс-корреляции была пренебрежимо мала и это преобразует матрицу к блочно-диагональному виду. Последние достижения позволяют использовать потокзависимую ошибку прогноза ковариации в 3D/4D-Var посредством, например, сетки преобразований, анизотропных рекурсивных фильтров или формулировки пространства-наблюдения вариационной задачи.

Обычно используется стандартный NMC-метод, в котором флуктуация определяется разницей между двумя прогнозами (например, прогноз на 24 часа минус прогноз на 12 часов) проверка осуществляется так же. Климатическая оценка фоновой ошибки может быть получена путем усреднения таких различий в прогнозах в течение времени (например, один месяц). В любом подходе, конечным результатом является ансамбль модели флуктуаций векторов, из которых может быть получена оценка фоновой ошибки. В данной работе используется процедура расчета различий в прогнозах (ансамбль прогностических полей) основанная на флуктуациях

Каждый численный эксперимент с ассимиляцией включал в себя следующие этапы:

- Подготовка начальных данных, в качестве которых использовались данные реанализа NCEP/NCAR.
- Получение данных наблюдения за атмосферой с метеорологических станций. В данной работе использовались данные наблюдений на **105** метеорологических станциях, расположенных в Северо-западном регионе РФ, рисунок 2.
- Декодирование полученных данных в формат ASCII LITTLE\_R.
- Преобразование ASCII LITTLE\_R в 3DVAR OBSPROC File
- Запуск атмосферной модели и получение прогноза без ассимиляции.
- Запуск гидродинамической модели атмосферы с ассимиляцией данных наблюдений на метеорологических станциях.
- Подготовка данных наблюдения об
- Подготовка данных текущего прогноза gc.
- Генерация данных фоновых ошибок gen\_be

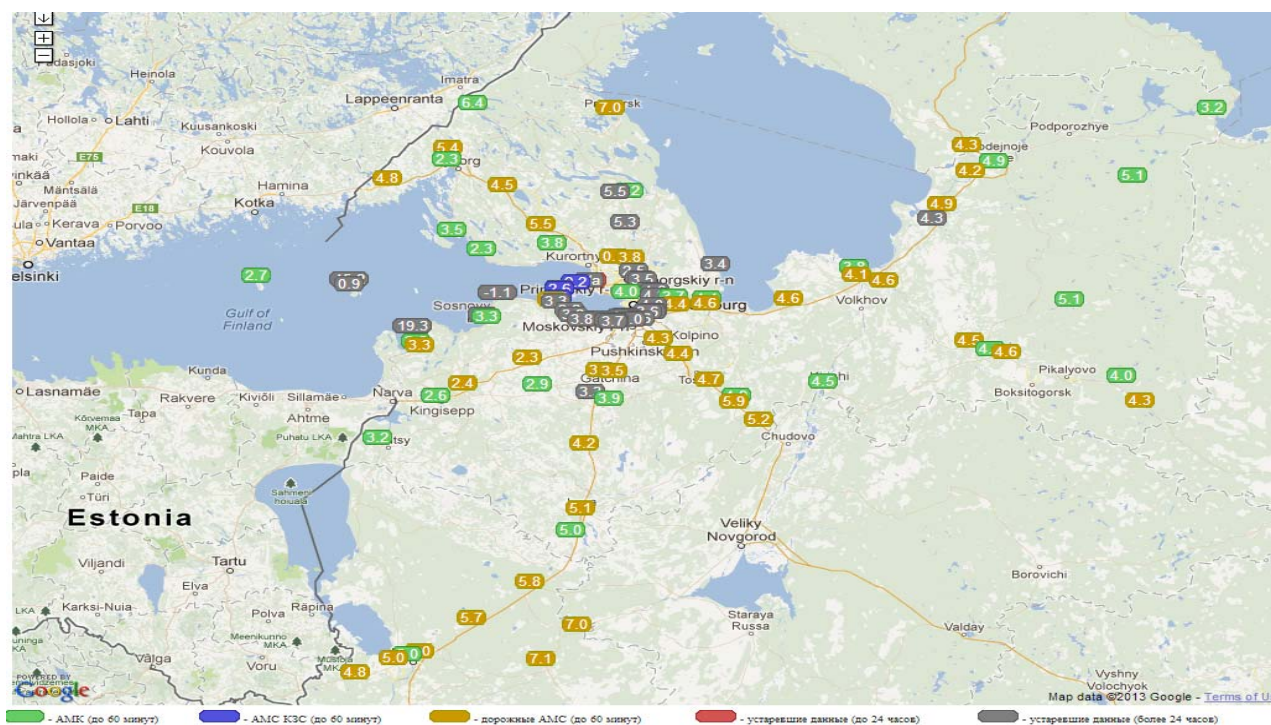


Рисунок 2 – Расположение метеорологических станций, данные с которых участвуют в ассимиляции

Схема ассимиляции данных наблюдений на метеорологических станциях в гидродинамическую модель приведена на рисунке 3.

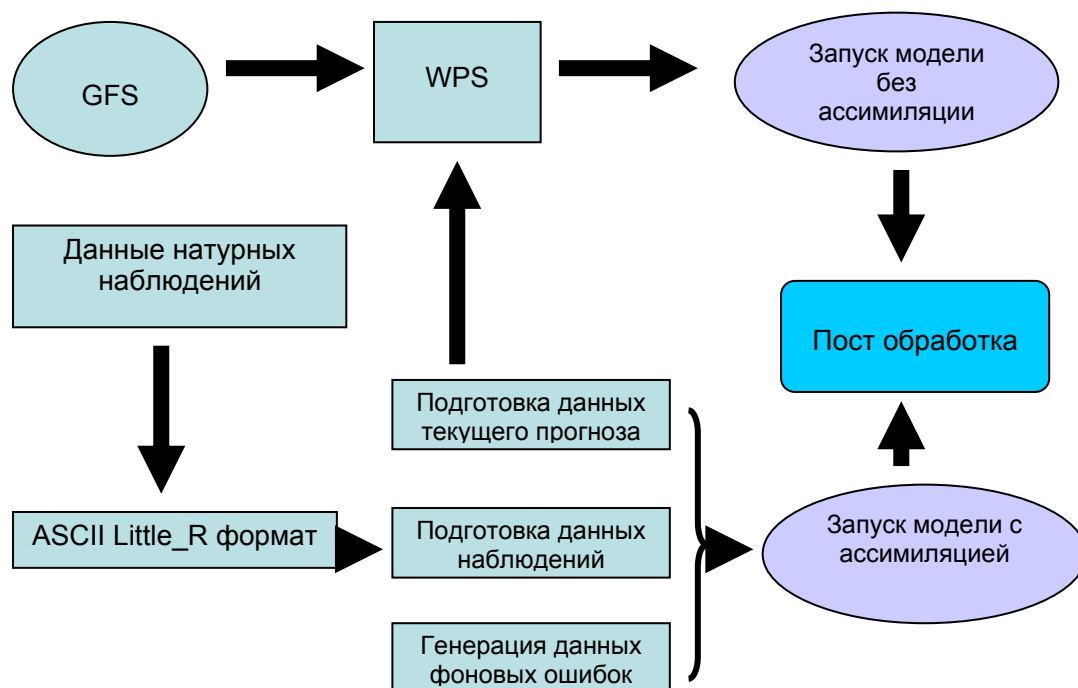


Рисунок 3 – Схематическое представление процедуры численных экспериментов

На рисунках 4 – 10 показан временной ход уровня моря на в/п Горный институт и на в/п Приморск, полученные с использованием трех атмосферных моделей без ассимиляции данных и с её учетом. Видно большое влияние использования ассимиляции на увеличение точности прогноза. В таблице 1 приведены результаты статистической оценки результатов прогнозов с учетом ассимиляции. Видно, что наилучшие результаты по всем показателям дала модель WRF. Далее в порядке ухудшения качества прогноза идут гидродинамические модели FORCE, HIRLAM и COSMO.



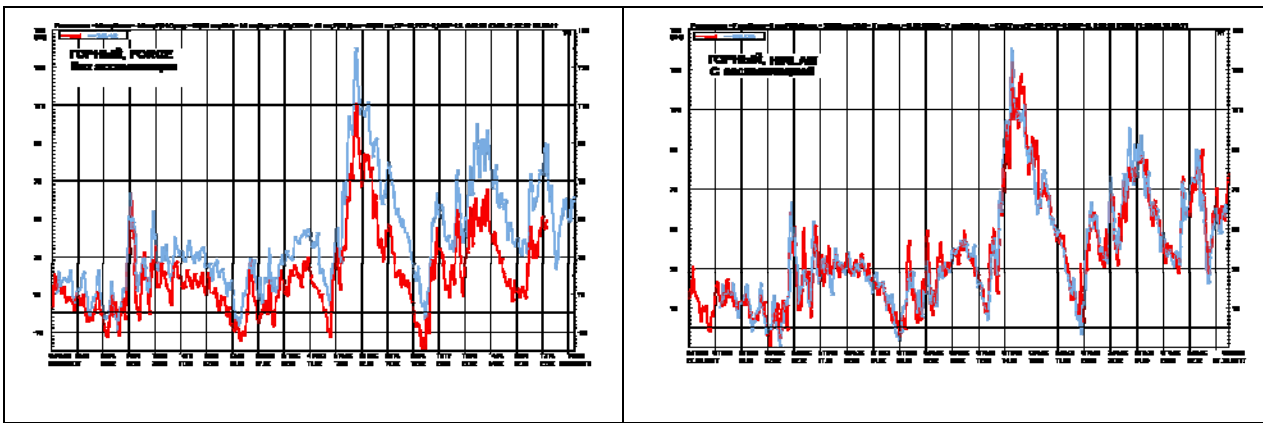


Рисунок 4 – Фактический (синяя линия) и расчетный (красная линия) уровень на в/п Горный институт 23 августа- 30 сентября 2011 г. при использовании модели HIRLAM. Слева – без ассимиляции данных, справа – с ассимиляцией

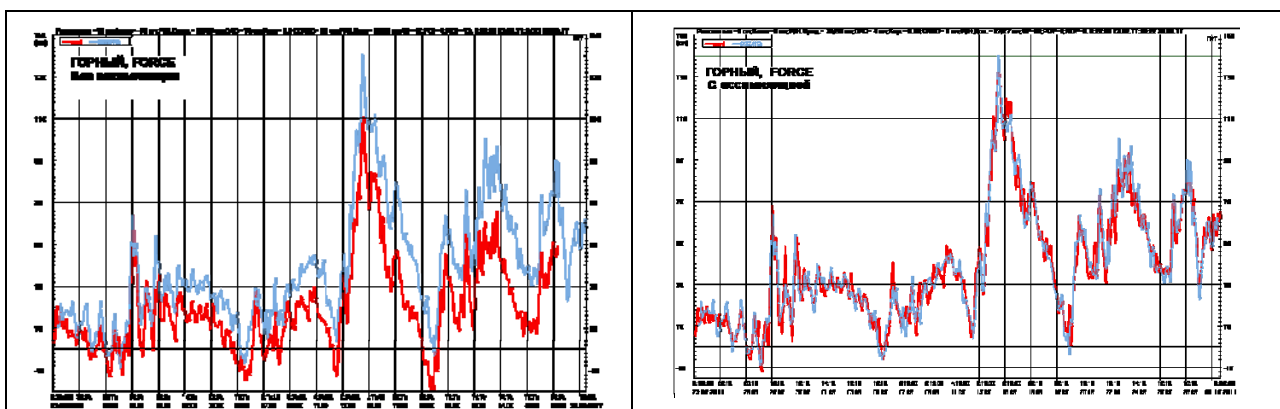


Рисунок 5 – Фактический (синяя линия) и расчетный (красная линия) уровень на в/п Горный институт 23 августа- 30 сентября 2011 г. при использовании модели FORCE. Слева – без ассимиляции данных, справа – с ассимиляцией

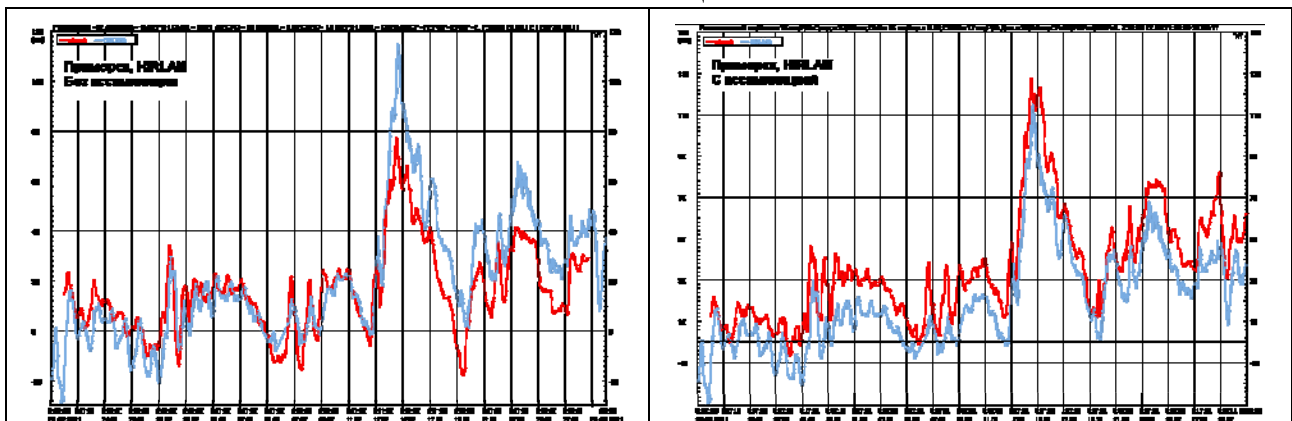


Рисунок 6 – Фактический (синяя линия) и расчетный (красная линия) уровень на в/п Приморск 23 августа- 30 сентября 2011 г. при использовании модели HIRLAM. Слева – без ассимиляции данных, Справа – с ассимиляцией

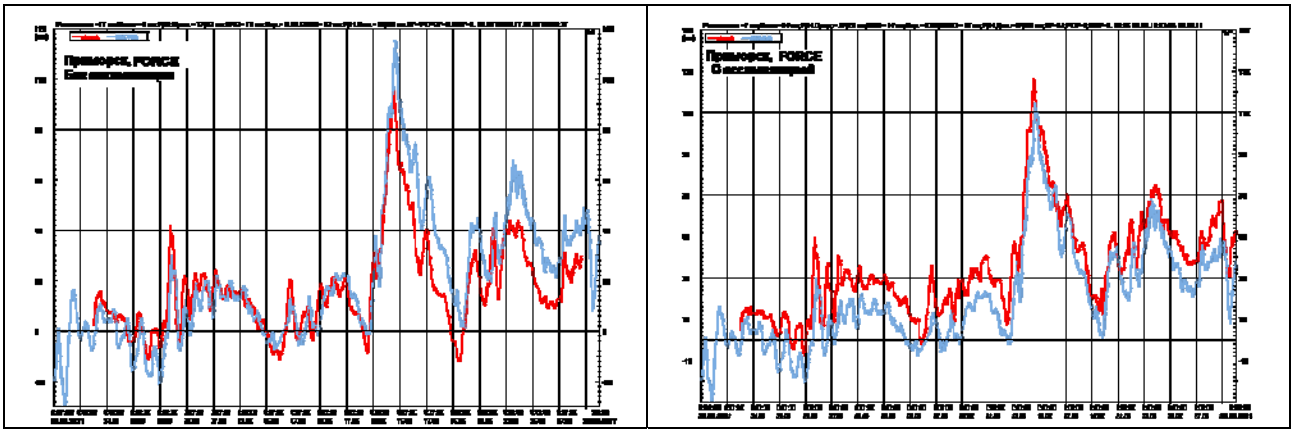


Рисунок 7 – Фактический (синяя линия) и расчетный (красная линия) уровень на в/п Приморск 23 августа- 30 сентября 2011 г. при использовании модели FORCE. Слева – без ассимиляции данных, справа – с ассимиляцией

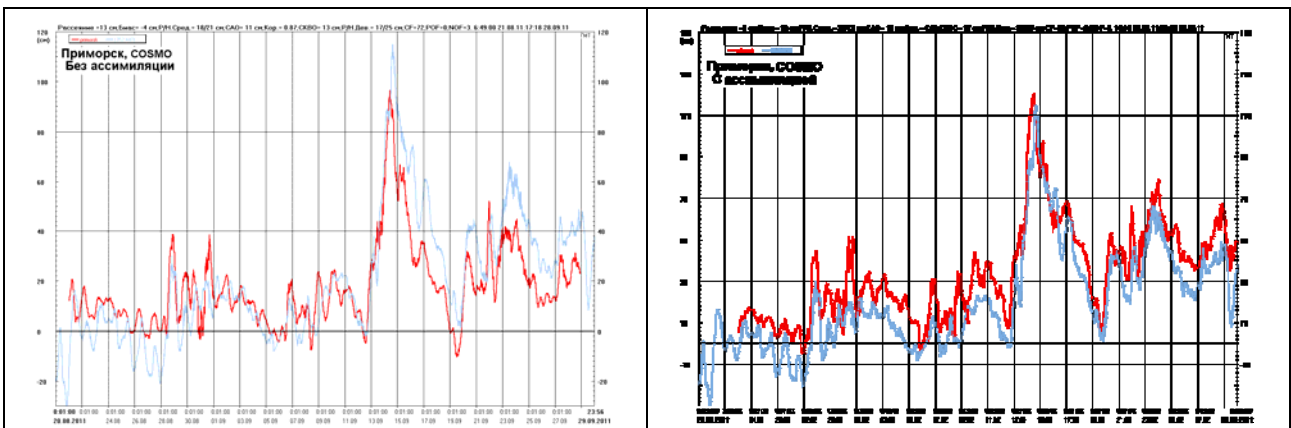


Рисунок 8 – Фактический (синяя линия) и расчетный (красная линия) уровень на в/п Приморск 23 августа- 30 сентября 2011 г. при использовании модели COSMO. Слева – без ассимиляции данных, справа – с ассимиляцией

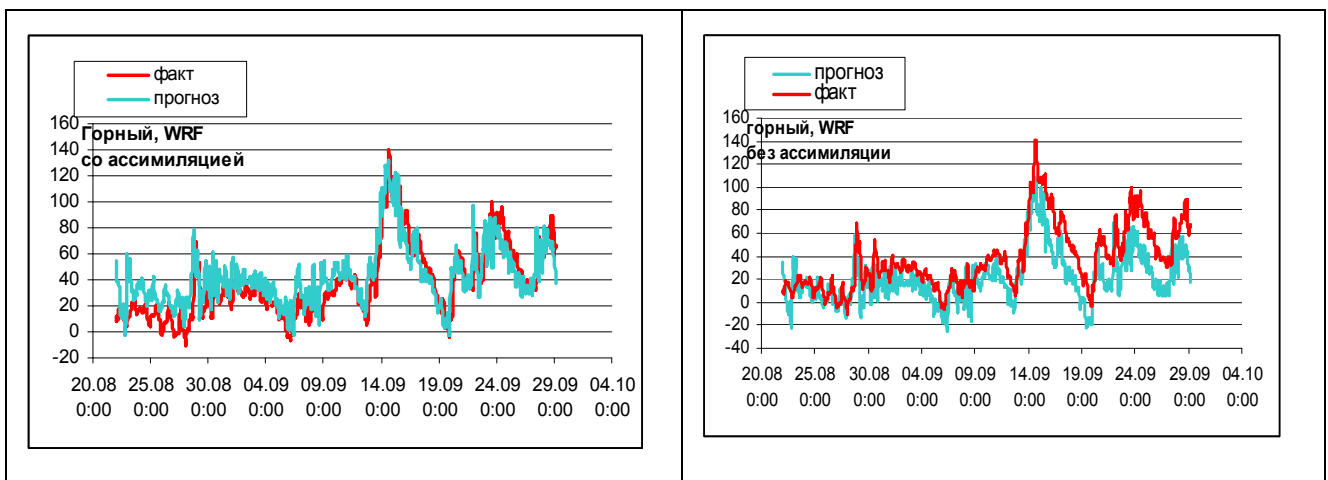


Рисунок 9 – Фактический (синяя линия) и расчетный (красная линия) уровень на в/п Горный институт 23 августа- 30 сентября 2011 г. при использовании модели WRF. Слева – без ассимиляции данных, справа – с ассимиляцией

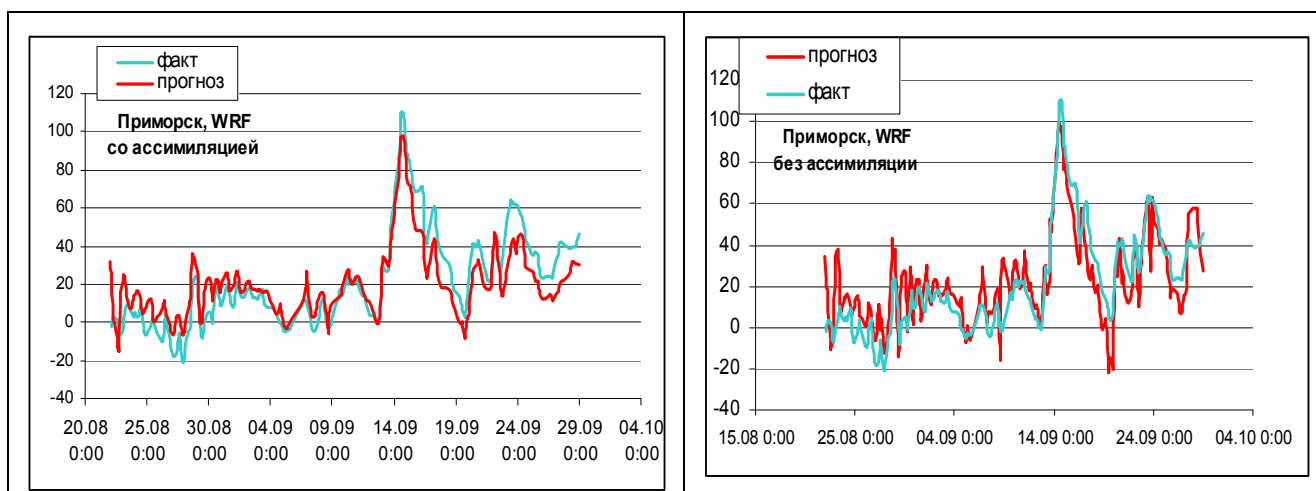


Рисунок 10 – Фактический (синяя линия) и расчетный (красная линия) уровень на в/п Приморск 23 августа- 30 сентября 2011 г. при использовании модели WRF. Слева – без ассимиляции данных, справа – с ассимиляцией

Таблица 1 – Статистические показатели прогнозов колебаний уровня воды при использовании различных атмосферных моделей

Модель	Рассеяние (см)	Смещение (см)	САО (см)	СКО (см)	Коэф-т корреляции	ЦЦ (%)	ПС (%)	ОС (%)
в/п Горный институт								
HIRLAM	7	0	5	7	0.96	95	0	0
FORCE	6	0	4	6	0.98	98	0	0
COSMO	8	0	6	8	0.95	91	0	0
WRF	8	0	5	8	0.93	94	0	0
На в/п Приморск								
HIRLAM	8	15	15	17	0.96	53	0	4
FORCE	7	14	14	15	0.96	61	2	0
COSMO	8	12	13	15	0.95	63	2	0
WRF	8	11	14	15	0.95	60	0	0

14 сентября 2011 г. в 15:12 на г/п Петербург зафиксирован подъем уровня воды до 140 см. Данные по высоте и времени пика подъема 14 сентября, полученные при использовании прогнозов разных атмосферных моделей за первые 6 часов, приведены в таблице 2. Результаты близки друг к другу. По высоте пика лучшие результаты дала модель WRF, по времени пика – модель WRF.

К недостаткам модели COSMO можно отнести очень большой объем передаваемых файлов, что приводит к замедлению счета.

Таблица 2 – Высота и время пика уровня воды 14 сентября 2011 г. при использовании различных атмосферных моделей с ассимиляции

	<b>Высота (см)</b>	<b>Время (МСК)</b>
Наблюдения	140	15:12
HIRLAM	134	16:00
FORCE	137	15:45
COSMO	135	15:31
WRF	138	15:18

Результаты описанных в главе 4 численных экспериментов показали, что учет мелкомасштабных процессов в атмосферной гидродинамической модели позволяет существенно улучшить прогноз невских наводнений, что было продемонстрировано при совместном использовании атмосферной модели WRF и программного комплекса CARDINAL.

В **заключении** перечислены основные полученные результаты и сформулированы выводы по диссертационной работе

- 1) Разработан метод использования гидродинамической модели высокого разрешения для описания мелкомасштабных процессов, способствующих возникновению нагонных наводнений, применение которого в модели WRF позволило воспроизвести реалистичную картину полей ветра и давления на территории Северо-Запада Российской Федерации в периоды возникновения потенциальной опасности формирования нагонных наводнений;
- 2) Разработана методика ассимиляции спутниковых и синоптических наблюдений региональной гидродинамической моделью, использование которой в мезомасштабной модели WRF позволило улучшить прогноз метеорологических характеристик как в периоды экстремальных явлений погоды, так и в спокойные периоды, что позволяет считать данную методику корректной и пригодной для использования при решении аналогичных задач ассимиляции для других регионов и иных моделей;
- 3) Получены результаты численного моделирования метеорологических и гидрологических характеристик путем совместного использования программного комплекса CARDINAL и гидродинамической модели WRF с блоком ассимиляции данных наблюдений, что позволило определить периоды потенциального возникновения штормовых нагонов и существенно повысить качество прогнозов невских наводнений.

### Список работ по теме диссертации

Основные научные результаты опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, **определенных ВАК**:

2010 Чукин В.В., Алдошкина Е.С., Вахнин А.В., Канухина А.Ю., Мостаманди С.В., Нгуен Т.Т., Обрезкова И.В. Восстановление вертикального профиля влажности воздуха по данным наземной регистрации спутниковых навигационных сигналов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научных статей. – В печати.

2011 Ассимиляция данных ГЛОНАСС/GPS в региональную численную модель прогноза погоды WRF-ARW // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т.8, №3. – С.76-82. (соавторы Чукин В.В., Алдошкина Е.С., Вахнин А.В., Канухина А.Ю., Нигай С.Ю., Нгуен Т.Т., Савина З.С).

2011 ансамблевые прогнозы экстремальных гидрометеорологических явлений в распределенной среде *clavire*, научно-технический журнал "приборостроение" №10/2011, ст. 106-110 (соавторы д. А. Насонов, а. А. Калюжная, а. В. Бухановский)

Содержание диссертации также отражено в следующих публикациях:

2001: Development and verification of flood forecasting system for St.Petersburg. Proc. of Third Study Conference on BALTEX, Mariehamn, Aland, Finland. pp.111-112. (co-authors K.A.Klevanny, V. P. Gubareva, L. B. Ozerova)

2001: Water level forecasts for the eastern Gulf of Finland. Bulletin of the Maritime Institute in Gdansk.V.28, No. 2, 2001, pp.71-87. (co-authors K.A.Klevanny, V.P. Gubareva, L. B. Ozerova)

2001: Neva Floods in Saint Petersburg and their prediction. Proc. International Workshop River Runoff: Minima and Maxima. St.Petersburg, pp.13-15. (co-authors H.Gerritsen, V.P.Gubareva, K.A. Klevanny, L.B.Ozerova)

2003: Evaluation of new formulation of wind drag in the operational model of the Baltic Sea Proceedings of the 6th HIROMB Scientific Workshop St. Petersburg. Morzaschita, pp.21-32. (co-authors K.A.Klevanny, O.V. Gliantseva)

2003: Operational model for water levels, currents and dispersion of pollutants in the Eastern Gulf of Finland. Proceedings of the 6th HIROMB Scientific Workshop St. Petersburg. Morzaschita, pp.33-40. (co-authors K.A.Klevanny, E. V. Smirnova)

2003: Improved wind forcing in the flood model for St. Petersburg Geophysical Research Abstracts, vol. 5, EAE03-A-05121, EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France. (co-authors Filinkova O.V., Klevanny)

2003: Development of a flood forecasting system for St.Petersburg. Cambridge Proc. of Int. Conf. Flooding and Environmental Challenges for Venice ant its Lagoon: State of Knowledge 2003. Churchill College, Cambridge University, England. (co-авторы Gerritsen H, Gliantseva O.V., Mostamandi M.S.W.)

2004: Floods in St.Petersburg and its forecast. Proc.of VI Russian Hydrological Congress Section 2 . Hydrometeoizdat St.Petersburg, pp.103-104. (co-authors L.M.Dren', K.A.Klevanny).

2005: Automated Flood Forecasting for St.Petersburg Proceedings of the International Seminar Operational Management for St.Petersburg Flood Protection Barrier, Morzaschita, St.Petersburg. p.. (co-author K.A. Klevanny)

2006: Operational forecasting of Neva floods. Proc. International Conference on Hydrometeorological safety and adaptation of the society to the extreme climate changes. Moscow, Russia. p.78. (co-authors P.N. Andreev, K.A. Klevanny, A.M. Kolesov, Yu.M. Liberman, V.Yu. Tsepelev).

2006: Automation of software decomposition for distributed implementation. Proc. SPIIRAN, V.3 (2), St.Petersburg, Nayka, pp.121–129. (co-authors B.E.Marley, V.I. Vorobjov, R.A. Krylov, M.Yu. Petrov)

2006 Nevskiis Flood Operational forecasting(Оперативное прогнозирование Невских наводнений). International Conference of Hydrometeorological safety problem (prediction and adaptation of the society to the extreme climate changes) Международная конференция по проблемам гидрометеорологической безопасности (прогнозирование и адаптация общества к экстремальным климатическим изменениям) 26-29 September 2006 г. Moscow, Russia. Page. 78 (co-authors Andreev P.N., K. A. Klevanny, A. M. Kolesov, U. M. Leberman, V. U. Sepelev).

2007: Last results of flood forecasting in St.Petersburg. International Workshop “Extreme water levels in the Eastern Baltic”. St. Petersburg, Russia, pp.29-30 (co-author K.A.Klevanny)

2007: Results of Dynamical detailed of surface wind and pressure over Baltic Sea for calculation of water flood. (Результаты динамической детализации приземного ветра и приземного давления над Северо-Западной частью России (регион Балтийского моря) для расчета наводнений), Hydrometcenter Russian. 343 edition, 2007 page 11-34. Труды Гидрометцентра России, вып 343, 2007г. стр 11-34 (соавторы I.V.Novikova, K. G.. Rubenshtain).

2007: Results of dynamical detalisation of surface wind and pressure over the North-West part of Russia (Baltic Sea region) for calculation of floods. Proc. of

Hydrometcenter of Russia, Moscow. V.343, pp. 11-34. (co-authors I.V.Novikova, K.G. Rubinstain)

2009: Quality of water level forecasts in St. Petersburg with four times per model runs / Proceedings of the 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 (co-authors Klevannyu K.A)

2010 Обрезкова И.В. Мониторинг влагосодержания атмосферы с помощью системы ГЛОНАСС/GPS // Региональная экология. – 2010. – №3(29). – С.122-126. (соавторы Чукин В.В., Алдошкина Е.С., Вахнин А.В, Нгуен Т.Т.)

2011: Перспективы использования навигационных радиоприемных устройств ГЛОНАСС/GPS в составе автоматических метеорологических станций // Глобальная научная интеграция: Сборник материалов международной научно-практической конференции. – Тамбов: изд.ТМБпринт, 2011. – С.94-95. (соавторы Чукин В.В., Вахнин А.В., Нгуен Т.Т)

2011: Предварительные результаты численных прогнозов погоды с помощью модели WRF-ARW на Европейской территории России // Успехи современного естествознания. – 2011. – №11. – С.75-76 (соавторы Чукин В., Савина З.С).

2012: Моделирование региональных аспектов переноса примесей на примере пыльцы березы, Труды XVI международной школы-конференции молодых ученых, москва-2012 - С. 129-132 (соавторы Курганский А. Р, Смышляев С.П)

Работа выполнена при поддержке Правительства РФ (Договор №11.G34.31.0078) для поддержки исследований под руководством ведущих ученых, Российского фонда фундаментальных исследований, а также в рамках мероприятий Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Подписано в печать 52.06.2015 Формат 60x90/16  
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,5  
Тираж 100 экз. Заказ 212

---

Отпечатано в типографии «Адмирал»  
199178, Санкт-Петербург, В.О., 7-я линия, д. 84 А