

**А.В. Бухановский, А.В. Калюжная, Л.И. Лопатухин,
К.С. Померанец**

**НАВОДНЕНИЯ
В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ:
ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОСТЬ**

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург
2017

УДК 551.466.3 (100)
ББК 226.221
А 64

Печатается по постановлению редакционно-издательского совета
Университета ИТМО

Бухановский А.В., Калюжная А.В., Лопатухин Л.И., Померанец К.С.
Наводнения в Санкт-Петербурге: история и современность. – СПб: Центр
распределенных издательских систем Университета ИТМО, 2017. – 88 с.

ISBN 978-5-7577-0550-7

В монографии рассматриваются экстремальные гидрометеорологические явления — нагонные наводнения в Санкт-Петербурге; описывается их место в ряду других опасных природных явлений, анализируются связанные с ними риски, а также представляется более чем трехсотлетняя история борьбы с наводнениями, завершившаяся введением в эксплуатацию Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений в 2011 г.

Описаны математический и алгоритмический аппарат моделирования и прогнозирования наводнений, а также способы повышения качества и заблаговременности прогнозов наводнений за счет различных методов усвоения данных и работы с ансамблями математических моделей.

Исследования в части методов и моделей усвоения данных в прогностические модели поддержаны грантом РФФ 14-11-00823.

УДК 551.466.3 (100)

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

ББК 226.221

ISBN 978-5-7577-0550-7

© Бухановский А.В., Калюжная А.В., Лопатухин Л.И.,
Померанец К.С., 2017
© Университет ИТМО, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА I. ИСТОРИЯ НАВОДНЕНИЙ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ	9
1.1. Наблюдения за колебаниями уровня моря. Системы отсчета. Кронштадтский футшток	10
1.2. Наводнения в Санкт-Петербурге	14
1.3. Наводнения 1824 и 1924 г	16
1.4. Статистика невских наводнений	19
ГЛАВА II. ПРИРОДА НЕВСКИХ НАВОДНЕНИЙ И ИХ ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ	23
2.1. Причины штормовых нагонов (на примере наводнений в Санкт-Петербурге)	24
2.2. Защита города от наводнений	29
2.3. Предотвращенные наводнения в Санкт- Петербурге	36
ГЛАВА III. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕВСКИХ НАВОДНЕНИЙ	40
3.1. Эмпирический метод прогнозирования на основе вероятностных моделей	40
3.2. Гидродинамический прогноз	45
3.3. Виды гидродинамических моделей для расчета уровня и течений	54

ГЛАВА IV. ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА	
ПРОГНОЗОВ	62
4.1. Усвоение (ассимиляция) данных.....	62
4.2. Усвоение в начальное состояние модели уровня и течений.....	67
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	81
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	83

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга венчает серию публикаций о природе и истории наводнений в Санкт-Петербурге, подготовленных известным исследователем и популяризатором науки К.С. Померанцем. Ее логическая завершенность обусловлена тем, что введение в 2011 г. в строй Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга привело к завершению более чем трехсотлетней истории невских наводнений. Как следствие, это приводит к изменению самого облика и ритма жизни нашего города, оставляя буйство штормовых нагонов достоянием истории. Авторам этой книги (А.В. Бухановскому, А.В. Калюжной, Л.И. Лопатухину) посчастливилось внести свой вклад в устранение проблемы наводнений в Санкт-Петербурге. В 2009–2014 гг. они участвовали в разработке математического, алгоритмического и программного обеспечения Системы предотвращения наводнений в Санкт-Петербурге, созданной компанией «Бизнес компьютер центр» (ВСС) при участии Университета ИТМО по заказу ФКП «Дирекция комплекса защитных сооружений г. Санкт-Петербурга». Авторы выражают искреннюю признательность С.А. Новикову и С.Г. Петросяну за плодотворное сотрудничество в ходе разработки и внедрения практических результатов проекта, К.А. Клеванному, С.С. Косухину, С.К. Попову, Б.Я. Штейнбергу и Е.С. Чернышевой за неоценимую поддержку в области вычислительной и модельной инфраструктуры, а также Р.Р. Михайленко — за вдохновение всего проекта в целом. Авторы также признательны Российскому научному фонду (проект 14-11-00823), поддержавшему теоретические исследования, заложившие основы для дальнейшего развития, повышения точности и надежности функционирования Системы предотвращения наводнений.

ВВЕДЕНИЕ

Океан можно рассматривать как сложную механическую систему, всегда стремящуюся тем или иным способом сохранить равновесное состояние. Если какая-либо сила выводит эту систему из равновесия, процесс возвращения к исходному состоянию реализуется в виде затухающих волновых движений.

Колебания уровня моря можно разделить на две большие группы: периодические и непериодические. Зависящие от приливообразующих сил Луны и Солнца периодические колебания здесь не рассматриваются, поскольку приливные явления в восточной части Финского залива пренебрежимо малы. Всем явлениям, носящим название «непериодические колебания уровня», присуща одна общая закономерность — их повторяемость не имеет очевидного периода или цикличности. Непериодические колебания уровня представляют весьма сложное явление, вызванное совместным воздействием механических (ветер, течения, изменение атмосферного давления) и немеханических (особенности теплового и водного баланса) факторов. Существен также вклад локальных условий района — глубина и форма водоема, рельеф дна и т.п. Непериодические колебания уровня моря подразделяют по продолжительности периода колебания (долговременные, или долгопериодные, и кратковременные) и по происхождению. Долговременные охватывают сезонные, годовые и многолетние колебания уровня (наиболее показательны в этом смысле колебания уровня Каспийского моря); кратковременные продолжаются в течение нескольких часов или суток.

Непосредственной причиной любого наводнения является переполнение ложа водоема (озера, реки, моря), происходящее быстро или медленно, в большем или меньшем размере, на долгий или короткий срок и т.п. Переполнение водоема может быть связано или с перемещением масс воды или с прямым увеличением ее общего количества. При паводках на реках вследствие таяния снегов

или ливней можно говорить об избытке воды. Здесь стоит остановиться на так называемом Всемирном потопе, легенды о котором есть у различных народов. Попытки отыскать причины этого явления безуспешно продолжаются до настоящего времени. Для всемирного сорокадневного дождя не хватит всей влаги, содержащейся в атмосфере, а для покрытия самых высоких гор — даже всей воды на Земле, включая ледники Антарктиды и Гренландии. Сторонники идеи Всемирного потопа не могут научно (без привлечения божественных сил) объяснить, откуда взялась эта вода и куда потом ушла. Можно утверждать, что за последние 30 000–40 000 лет (с эпохи неолита) любое наводнение, какого бы масштаба оно ни было, могло покрыть лишь ничтожную часть суши. Однако, возможно, в очень отдаленные времена только такая часть суши и была обитаемой, а значит, рассказы о Всемирном потопе являются одним из первых воспоминаний человечества.

Для морских побережий наводнения связаны с перемещением огромных масс воды, т.е. с перераспределением ее количества. Причина начала процесса перемещения массы воды — движение барических образований, в первую очередь, циклонов. Циклоны перемещаются над морем, оказывая статическое (вертикальное) и ветровое (горизонтальное) воздействие на водную поверхность и возбуждая длинные волны. Влияние таких волн на уровень моря, как правило, существенно превышает суммарное воздействие ветра и атмосферного давления и может приводить к катастрофическим последствиям. При этом особую роль играет движение циклона. Колебания уровня моря, возникающие в результате быстрого перемещения барических систем, объединены термином «штормовые нагоны».

Штормовые нагоны характерны для различных районов Мирового океана. Однако сами по себе они представляют лишь опосредованный интерес, поскольку степень опасности наводнений связана не столько с затоплением территорий, сколько с возникающими при этом рисками для экономики, здоровья и жизни людей.

При этом в ряде случаев к ним добавляются риски иного плана, слабо измеримые количественно: например, риски уничтожения культурно-исторического наследия. В данной книге комплексно рассматриваются проблема наводнений в Санкт-Петербурге и ее успешное решение путем создания комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений.

ГЛАВА I

ИСТОРИЯ НАВОДНЕНИЙ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

Наводнения являются извечным бедствием цивилизации. Их сугубая опасность обусловлена самой тягой человека к воде. Традиционно при выборе места поселения люди ориентировались на источники питьевой воды; крупные водоемы рассматривались как неисчерпаемый пищевой ресурс, а в ряде случаев — как транспортные пути. При этом наличие периодических изменений уровня воды во многих случаях воспринималось как благо. Так, сезонные колебания уровня благотворно сказываются на плодородии пойменных территорий, а приливные колебания облегчают доступ к богатствам прибрежной зоны и создают мощные течения, способные двигать колеса водяных мельниц (пробора приливных электростанций). Однако эта идиллическая картина может быть разрушена, когда вода преодолевает критический порог и стремится затопить места человеческого обитания. Поскольку наводнения являются вероятностным процессом, обусловленным наложением многих факторов, изначально бывает непросто предсказать предельную высоту подъема уровня. Как следствие, нередки случаи, когда между катастрофическими наводнениями может пройти несколько десятилетий или даже столетий, в которые природа никак себя не проявляет. Сведения об изменчивости уровня воды теряются в памяти поколений, и в потенциально опасных районах появляются новые поселения, строятся дороги и другие объекты инфраструктуры. Вследствие постоянного освоения человеком новых территорий очередное наводнение может принести гораздо больше вреда, чем все предыдущие. Все это обсуждается в данной главе на примере истории наводнений в Санкт-Петербурге.

1.1. Наблюдения за колебаниями уровня моря. Системы отсчета. Кронштадтский футшток

В настоящее время уровнем моря называют высоту его поверхности, свободную от влияния ветровых волн и зыби, измеряемую относительно условного горизонта. Уровенная поверхность — это поверхность морей и океанов, нормальная к направлению силы тяжести. Свободная поверхность Мирового океана, не возмущенная динамическими факторами (приливы, течения и др.), определяет фигуру, называемую геоидом.

Колебания уровня воды у берегов океанов, морей, озер и рек привлекали внимание людей с первобытных времен. Руководствуясь практическими соображениями, люди всегда стремились достаточно точно определять положение уровня воды в водоемах, возле которых возникали первые очаги цивилизации, и его изменения во времени. От простого созерцания они постепенно переходили к элементарным способам измерения высоты воды с помощью отметок на скалах, условных обозначений на берегах и т.д.

Трудно установить время начала регулярных измерений специальными приспособлениями с использованием каких-то систем единиц. Имеются свидетельства, что уже в первом веке нашей эры египтяне измеряли высоту воды в устье реки Нил прибором — ниломером, приняв «локоть» (примерно 45 см) за единицу измерения. Появление ниломеров ученые относят к периоду от III до I тысячелетия до н. э. Жрецы Древнего Египта, на основании полученной информации об уровне воды в Ниле, могли правильно предсказывать величину половодья и соответственно будущий урожай сельскохозяйственных культур, возделываемых по берегам реки. Для этих же целей во II веке до н. э. была создана гигантская скульптурная группа (ее мраморная римская копия конца I века до н. э. находится в музее Ватикана, рис. 1), изображающая бога реки Нил: в левой руке он, опираясь на сфинкса, держит рог изобилия, в правой — хлебные колосья. Вокруг рез-

вятся 16 мальчиков, головы которых расположены на равном по высоте друг от друга расстоянии (в один локоть). 16 локтей — идеальная высота подъема уровня воды, которая может обеспечить хороший урожай, поэтому на этой высоте находится голова шестнадцатого мальчика, выглядывающего из рога изобилия. Можно считать эту скульптурную группу прообразом будущих футштоков.



Рис. 1. Скульптура бога реки Нил

Достаточно долго не удавалось решить вопрос о выборе нулевого горизонта для отсчета глубин и высот. Для создания единой системы необходимо было установить начальную точку отсчета и выбрать непрерывную поверхность, проходящую через эту точку, от которой можно было бы однозначно отсчитывать абсолютные высоты. Прошло немало лет, пока в «водоизмерительный обиход» не вошло простейшее приспособление в виде деревянной или металлической рейки, размеченной в некоторой системе единиц. Наблюдения по футштоку за уровнем Северного моря впервые были проведены в Амстердаме в 1682 г. В России первые наблюдения за уровнем моря были начаты при Петре I. И ныне, в век электронных приборов и компьютерных технологий, приспособление, получившее наименование «футшток», повсеместно используется на любых водоемах. Футшток устанавлива-

ют так, чтобы его самое низкое деление всегда оказывалось в воде, а самое высокое превышало максимально возможный подъем воды. Измерения по футштоку дают условные отметки уровня, т.к. приведены к некоторой системе отсчета. Существует ряд различных систем отсчета высот. Для национальной высотной сети Нидерландов и ряда западноевропейских государств за нуль принимается высота среднего уровня Северного моря, определенного по футштоку в Амстердаме за 1843–1860 гг. Исходным пунктом нивелирной сети во Франции является высота среднего уровня Средиземного моря, определенного вблизи Марселя; в Швеции — высота среднего уровня Балтийского моря, определенного около Кальмара; в ФРГ — нормальный нуль Северного моря в Валленхорсте и т.д.

В России с середины XIX в. принята так называемая «Балтийская система высот», ее основой служит нуль Кронштадтского футштока (КФ), которым считается средний многолетний (1825–1840 гг.) уровень воды в Финском заливе по измерениям в Кронштадте. Этот «нуль» был рассчитан в 1840 г. русским гидрографом и вице-адмиралом Михаилом Францевичем Рейнике. За прошедшие после этого годы средний уровень моря и положение Кронштадтского нуля существенно не изменились, положение закреплено точным нивелированием на местности и к нему приводятся все высоты на суше и глубины на морях России. Правительственным постановлением 1946 г. «О введении единой системы геодезических координат и высот на территории СССР» нуль КФ был принят исходным для топографо-геодезической сети страны.

Измерение уровня моря по футштоку дает дискретные оценки. Для непрерывной фиксации используется самопишущий прибор непрерывного автоматического действия — уровнемер или, как его чаще называют, мареограф. Его устанавливают обычно рядом с футштоком в специальном помещении. В Кронштадте для мареографа с футштоком построен павильон. Датчик-

поплавок мареографа опущен в колодец, сообщающийся с открытой водной поверхностью. Колебания уровня воды, регистрируемые на ленте мареографа, систематически (обычно дважды в сутки) сверяют с измерениями по футштоку, погрешность которых составляет 1 см. Схема, поясняющая работу мареографа, приведена на рис. 2.

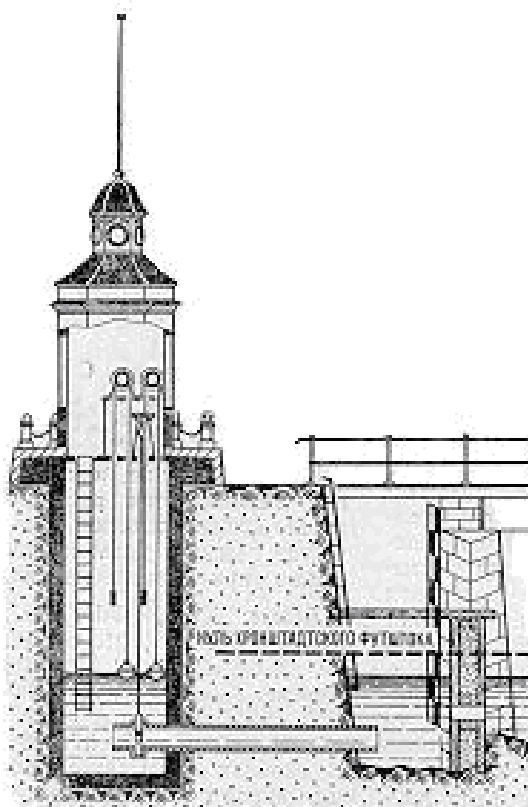


Рис. 2. Схема установки мареографа

Мареограф фиксирует происходящие в устье Невы и в Невской губе общие суммарные колебания различного происхождения — сезонные, сейшевые, приливные, атмосферные. Футштоки установлены и в других местах Санкт-Петербурга (первый в России установлен в 1715 г. по указу Петра I у обращенной к Неве стены Петропавловской крепости). Наиболее известен футшток у Горного института, его ноль на 11 см выше кронштадтского.

1.2. Наводнения в Санкт-Петербурге

Финский залив, являясь частью Балтийского моря, представляет собой узкий водоем, глубоко вдающийся в сушу. Длина залива 398 км, ширина изменяется от 70–75 км в горле (крайней западной части) до 12–15 км в Невской губе. По направлению от горла к вершине глубина залива уменьшается, особенно резкое уменьшение глубины и площади поперечного сечения залива наблюдается начиная от створа мыс Шепелевский–поселок Озерки. Таким образом, Балтийское море с Финским заливом (Трансбалтика) представляют собой канал, ширина которого в 5–7 раз меньше общей длины. В устье Невы, где расположен Санкт-Петербург, существуют необходимые и достаточные условия для морских наводнений.

Списки наводнений с использованием различных источников создавались начиная с первой трети XVII в., информация об этих событиях весьма противоречива и недостоверна. В исторических источниках упоминается о наводнениях 1061, 1064, 1066, 1127–1436, 1300, 1540–1541, 1594 и 1691 гг. Однако по этим данным затруднительно дать количественную оценку подъемов уровня. Например, на Охтинском мысу при впадении реки Охта в Неву находилась шведская крепость Ландскрона (Венец Земли). Согласно летописям, в 1300 г. вышедшая из берегов Нева подмыла стены крепости (заметим, что в 1301 г. крепость была взята русскими войсками и полностью разрушена). Из писцовых книг Водской пятины Новгородской земли (в них детально описывались условия хозяйствования вотчин, сел, монастырей), известно, что наводнение 1541 г. дочиста razорило местных русских крестьян.

Через 150 лет (в 1691 г.) Нева опять вторглась в пределы шведской крепости Ниеншанц, поставленной в устье Охты, где некогда стояла Ландскрона: под водой (в шведских летописях сказано, что вода поднялась на двадцать пять футов, или 762 см) оказалась вся местность. Считается, что это было самое крупное наводнение до основания Петербурга: изначальное сообщение о наводнении со

временем обросло сомнительными подробностями, следовательно, трудно оценить реальную величину подъема уровня.

Наводнения грозили Петербургу с самого основания. Суша, на которой возводился город, была низка и невелика. Царь Петр сразу приказал «...возвышать сушу с великим поспешанием». Приказ исполнялся, но не спас от первого после основания города документально зафиксированного наводнения. Работы по возведению бастионов Петропавловской крепости в ночь с 19 на 20 августа 1703 г. были прерваны, тогда вода поднялась более чем на 200 см. Командующий войсками на острове князь Аникита Репнин на другой день отписал Петру, находившемуся в Лодейном Поле: *«Зело, Государь, у нас жестока погода с моря и набиывает в нашем месте, где я стою с полками, воды аж до моего станишки. Ночесь в Преображенском полку у харчевников многих сонных людей и рухлядь их помочило, а жители здешния сказывают, что всегда то место заливают»*.

Два самых значительных наводнения в истории Петербурга произошли с промежутком в 100 лет — в 1824 и 1924 г. (они описаны ниже), третье с подъемом воды до 321 см произошло 10 сентября 1777 г. Заметим, что высота подъема воды в этом случае не измерялась, а восстанавливалась после наводнений по следам воды на стенах домов и другими приближенными способами, время наступления максимального уровня также не фиксировалось: гидрометеорологической службы еще не существовало, футштоки располагались в разных местах, отсчеты производились от различных горизонтов.

О четвертом по «значимости» наводнении 15 октября 1955 г. (293 см) газета «Ленинградская правда» сообщила кратко, не указав его последствий и максимального уровня воды: «В связи с сильным штормом, разыгравшемся на Балтийском море, наблюдался повышенный уровень воды в Неве. По данным бюро погоды, к 20 ч 50 мин 15 октября вода достигла наивысшего уровня.

Затем, минут через 20, начался быстрый спад. К вечеру 16 октября уровень был даже на 14 см ниже ординара».

1.3. Наводнения 1824 и 1924 г.

Среди сотен опасных подъемов воды выделяются два катастрофических. Наводнение 7 ноября 1824 г. (421 см) нашло отражение в художественных произведениях (рис. 3). Наиболее известна поэма А.С. Пушкина «Медный Всадник», ниже приведен небольшой фрагмент из нее, а также несколько строк, написанных по тому же поводу поэтом графом Д.И. Хвостовым («О наводнении Петрополя»).

*Над омраченным Петроградом
Дышал ноябрь осенним хладом...
Плеская шумною волной*

.....
И ветер дул, печально воя...

.....
*Ужасный день!
...силой ветров от залива
Перегражденная Нева
Обратно шла, гневна, бурлива,
И затопляла острова...*

.....
*И всплыл Петрополь как Тритон,
По пояс в воду погружен...
..... Утра луч
Из-за усталых, бледных туч
Блистал над тихою столицей...*

А.С. Пушкин

*Я волн свирепство зрел, я видел Божий меч.
Владыка бурь восстал и сел на колесницу;
В Европе славную и первую столицу
Облек, неизъяснимый страх в унынье он*

.....
Вдруг море челюсти несытые открыло,

.....
Непримиримые, бунтующие, волны

Из ложа выступя, порабощают стогны¹;

.....
*...свирепствовал Борей
 И сколько в этот день погибло лошадей!
 Под ветлами валялось много крав
 Лежали они ноги кверху вздрав...*

Д.И. Хвостов

А.С. Пушкин описывает стадии грозного явления: предшествующую ненастную погоду, постепенный подъем, а затем резкое возвышение воды до катастрофического уровня, быстрое ее опускание и, наконец, тихая погода на следующее утро.

Официальные сообщения о бедствии появились лишь спустя несколько дней, поскольку существовал запрет на упоминание о случившемся.



Рис. 3. Наводнение 1824 г.

О наводнении в Петербурге вскоре стало известно в Европе. Оно заинтересовало Гете, который использовал это событие в эпилоге «Фауста». Известно, что он написал книгу «Опыт метеоро-

¹ Напомним: стогны (поэт., устар.) — площадь, широкая улица.

рологии», разработал систему наблюдений за погодой, способствовал организации гидрометеорологической службы в Германии.

Следующим по последствиям стало наводнение 23 сентября 1924 г. — подъем уровня воды до 380 см. Имеется масса публикаций об этом наводнении (см., например, список литературы в конце), поэтому здесь ограничимся иллюстрациями (рис. 4).



Рис. 4. На улицах Ленинграда во время и после наводнения 1924 г.



Рис. 5. Мемориальная стена с отметками наводнений

На рис. 5 показана мемориальная стена (слева — ее фрагмент) на реке Мойке у Синего моста на Исаакиевской площади.

1.4. Статистика невыхских наводнений

Сведения о петербургских наводнениях начиная с 1703 г. включены в каталог, который использовался при проектировании защитных сооружений для оценки вероятности различных подъемов уровня. Каталог наводнений содержит более 300 случаев подъема воды выше 160 см над нулем Кронштадтского футштока. В 1982 г. администрацией Ленинграда совместно с гидрометеорологической службой были установлены три градации наводнений по высоте и соответствующим площадям затопления территорий:

- опасные (высота 161–210 см, площадь затопления 10–45 км²);
- особо опасные (211–299 см, площадь затопления 45–100 км²);
- катастрофические (300 см и выше, площадь затопления более 100 км²).

Со времени основания города особо опасных наводнений — 80, опасных — 251, катастрофических — 3.

На рис. 6 показаны зоны затопления при крупнейших наводнениях в Санкт-Петербурге.

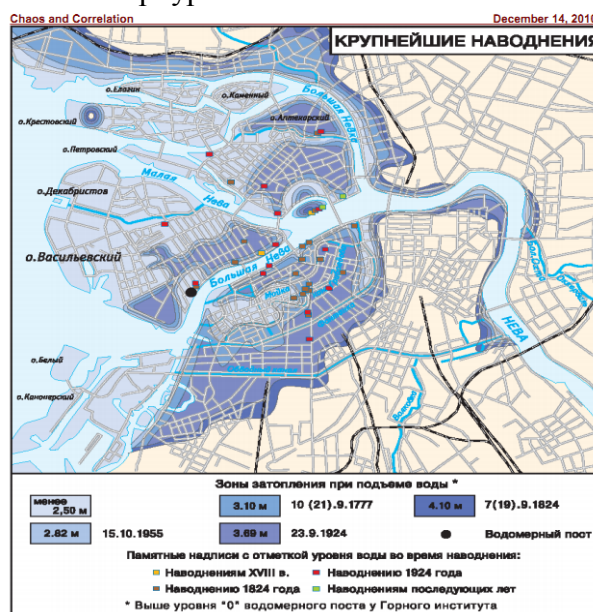


Рис. 6. План города с обозначенными зонами затопления при различных уровнях воды

Хронологической закономерности наводнения не имеют: возможны несколько наводнений в год. Уникальным является декабрь 1986 г. — три наводнения за пять суток (2 и 4 декабря — опасные, 6 декабря — особо опасное). Бывают годы без наводнений — всего насчитывается 130 таких лет. Вместе с тем существует сезонная закономерность: чаще всего наводнения случаются осенью, но в основном с августа по январь — 92 % случаев.

Наиболее часты подъемы воды в октябре и ноябре, в сентябре их почти вдвое меньше, однако в сентябре произошло три из пяти самых значительных. Такие особенности объясняются характером погоды в Санкт-Петербурге и на всем северо-западе России. С августа по январь атмосферные процессы здесь неустойчивы, преобладают циклоны западных направлений; в сентябре, при смене летней погоды на осеннюю, циклоны и штормы наиболее активны и сильны.

Бытует представление о коварстве наводнений, будто они настигают город по ночам. Однако ни одно катастрофическое наводнение не случилось ночью, правильнее утверждать, что наводнения случаются в темное время суток. Действительно, сезон наводнений — со второй половины августа по вторую половину января — отличается малой естественной освещенностью.

Типичный временной интервал существования циклона — примерно сутки, такова же продолжительность полного цикла наводнения в Санкт-Петербурге: в среднем особо опасный период длится примерно от 3 до 9 ч, максимальный уровень наводнения держится не более 40 мин. Средняя скорость подъема уровня примерно 50 см/ч, максимальная — 96 см/ч (но нагон невелик). Обычно максимальная скорость ветра наблюдается примерно за 3 ч до наибольшего нагона, исключение — наводнение 1955 г., когда сильный ветер и пик наводнения совпадали во времени. Каждое наводнение уникально, в подтверждение сказанному приведем таблицу. Очевидно, при оценке опасности наводнения, кроме абсолютной величины максимума, имеет значение длительность

сохранения уровня выше некоторой отметки: в этом смысле наводнения 1824 и 1924 г. одинаково опасны. Наводнение 1975 г. не относится к числу экстремальных, однако уровень воды выше 2 м в течение 6 ч потенциально может привести к значительным материальным потерям.

**Длительность стояния уровня (выше 1 м)
во время некоторых наводнений**

Уровень воды, ≥ м	Длительность стояния (ч, мин) при максимальном уровне воды, см				
	421 (1824 г.)	380 (1924 г.)	293 (1955 г.)	281 (1975 г.)	262 (1999 г.)
4.0	0.45	—	—	—	—
3.5	2.0	3.0	—	—	—
3.0	4.15	4.0	—	—	—
2.5	5.0	5.0	2.0	3.0	0.40
2.0	7.0	7.0	3.30	6.0	4.0
1.5	8.0	9.0	5.0	8.0	6.0
1.0	—	—	6.0	14.0	10.0

Естественным образом возникает вопрос, до какого предела может подняться уровень воды. Численные расчеты показывают, что при неблагоприятных обстоятельствах — скорость ветра 33–37 м/с и расположение центра циклона в 200 км от Петербурга — возможно наводнение до 6 м. В январе 2005 г. мощный циклон обрушился на Балтийское море. Во многих населенных пунктах были превышены абсолютные максимумы уровня за весь период наблюдений, например в Пярну (вершина Рижского залива) — 275, у входа в Финский залив, в Таллине — 155, в Хельсинки — 151, в Выборге — 207 см. Центр циклона находился лишь немного севернее Финского залива, и зона максимальных ветров припала на Псковскую область, что спасло Санкт-Петербург от катастрофического наводнения (в нашем городе было зафиксировано наводнение высотой всего 239 см). Расчетный максимальный уровень воды, возможный один раз в сто лет в Санкт-Петербурге — 345 см. Эти результаты не противоречат действительности. Для повторяемости один раз в 1000 и 10 000 лет ока-

зались вероятными наводнения высотой 475 и 540 см в Петербурге, и 410 и 465 см — в Кронштадте.

В исходных данных для проектирования сооружений защиты Санкт-Петербурга от наводнений принят подъем уровня в створе со стороны Финского залива 515 см, в этом случае уровень воды у Горного института может достигнуть примерно 540 см. Необходимо помнить, что эти цифры — не прогноз на необозримые сроки, а указание на вероятность редких событий. Однако приведенная статистика не объясняет причин возникновения наводнений и, следовательно, не позволяет их прогнозировать.

ГЛАВА II

ПРИРОДА НЕВСКИХ НАВОДНЕНИЙ И ИХ ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ

Прибрежная мелководная зона океанов и морей часто густо населена: 20 из 33 городов с населением свыше 8 млн жителей расположены в ней (44 % населения Земли проживает не далее 150 км от берегов океанов и морей). Эти города подвергаются опасности наводнений, вызванных штормовыми нагонами, поскольку при пологих берегах опасность затопления наступает уже при повышении уровня на 1.0–1.5 м.

Штормовые нагоны — это потенциально опасный подъем уровня моря, вызванный ураганами умеренных широт, тропическими циклонами или тайфунами. Поскольку тропические циклоны имеют меньшие геометрические размеры, чем ураганы умеренных широт, то при большей скорости ветра они, как правило, приводят к более высоким штормовым нагонам, чем вне тропических ураганы. Воздействию тропических циклонов подвержены западное побережье Атлантики, Мексиканский залив, западная часть Тихого океана и Индийский океан.

Индия, Пакистан, Бангладеш расположены на побережье Индийского океана, плотность населения этих стран высока, а система прогнозирования стихийных явлений развита недостаточно, поэтому последствия сильных нагонов в этом регионе катастрофичны. Например, самый сильный и разрушительный циклон «Бхола» 12 ноября 1970 г. в Бангладеш привел, по разным оценкам, к гибели от 300 до 500 тыс. человек. Число жертв в ноябре 2007 г. в этой стране составило около 5 тыс. Циклон «Наргис», в 2008 г. обрушившийся на Мьянму (Бирма), унес не менее 146 тыс. человек.

На морях России штормовые нагоны возможны в заливах Белого моря, на Азовском море, в некоторых заливах и губах морей Арктики и Дальнего Востока, а также на Каспийском море (в его

мелководной северной части при максимальных нагонах уровень может повышаться на 2.5–3.0 м, а при сгонах понижаться на 1.0–2.5 м).

2.1. Причины штормовых нагонов (на примере наводнений в Санкт-Петербурге)

Нагонная волна — длинная гравитационная волна, распространяющаяся из места ее образования, обычно соотносящегося с первоначальным расположением центра циклона. Циклоны, перемещаясь над морем, за счет оказания статического («эффект обратного барометра») и ветрового воздействия на водную поверхность возбуждают длинные волны. Амплитуда таких волн увеличивается под воздействием мелководья, что может приводить к катастрофическим последствиям. Если берег крут и приглуб, то колебания уровня невелики и не угрожают затоплением возвышенной суши. Однако на пологих отмельных берегах, в устьях и эстуариях рек нагон воды может приводить к наводнениям. Высота подъема уровня в этих случаях зависит от глубины циклона и в значительной степени — от соотношения фазовой скорости длинной волны и скорости перемещения циклона. Когда распространению нагонной волны сопутствуют устойчивые сильные ветра постоянного направления, происходит дополнительная ветровая интенсификация волны. Длина волны при штормовом нагоне может достигать 1000 км, а самые длинные ветровые волны — 200–300 м. Из-за малых длины и периода ветровая волна содержит мало воды и может воздействовать лишь на узкую зону пляжа. Потому основной причиной наводнения в Санкт-Петербурге являются длинные нагонные волны, идущие по акватории Финского залива. Гребень длинной волны (из-за движения циклона) несет огромный объем воды, т.к. задняя подошва волны отстоит от гребня на сотни километров. В работах, посвященных исследованию причин и динамики наводнений в Санкт-Петербурге, доказывается, что районом образования

длинной гравитационной волны является центральная часть Балтийского моря (рис. 7). А среди всех проходящих над Балтийским морем циклонов (в среднем 50–60 в год) наиболее опасными, с точки зрения угрозы наводнения, являются циклоны, имеющие северо-восточное и юго-западное (со Скандинавского полуострова) направление распространения и обладающие достаточной глубиной. Таким образом, морские наводнения обычно случаются при глубоких циклонах с пониженным (730–750 мм) относительно нормы (760 мм) атмосферным давлением в центре. Резкие перепады давления в таких циклонах приводят к штормовым ветрам. Следовательно, наводнение в Санкт-Петербурге может произойти, если с моря пройдет глубокий быстрый (со скоростью до 90 км/ч) циклон. Кроме того, важно, что у Финского залива узкая береговая линия и малые глубины (особенности его восточной части с Невской Губой).

На рис. 7 приведена схема движения циклона и распространения нагонной волны, приводящего к затоплению берегов Невской Губы (на врезке синим обозначены подтопленные районы¹).



Рис. 7. Схема распространения нагонной волны и возможная траектория порождающего ее циклона, приводящего к затоплению берегов Невской Губы

¹Карта затопления Санкт-Петербурга при различных высотах наводнения доступна на сайте <http://www.infoecogis.ru/flood/FloodMap.aspx/>

Поведение циклона зависит от многих нелинейно взаимодействующих факторов — температуры и давления в верхних слоях атмосферы, состояния морской поверхности. Поэтому не все циклоны приводят к наводнениям. Более того, вероятность наступления наводнения зависит и от стадии развития циклона. Три стадии развития циклона (его углубление и расширение) представлены на рис. 8, видно, что обычно период перед наступлением максимального уровня воды в Невской Губе соответствует прохождению теплого сектора циклона, характеризующегося максимальной температурой воздуха и сильным ветром.

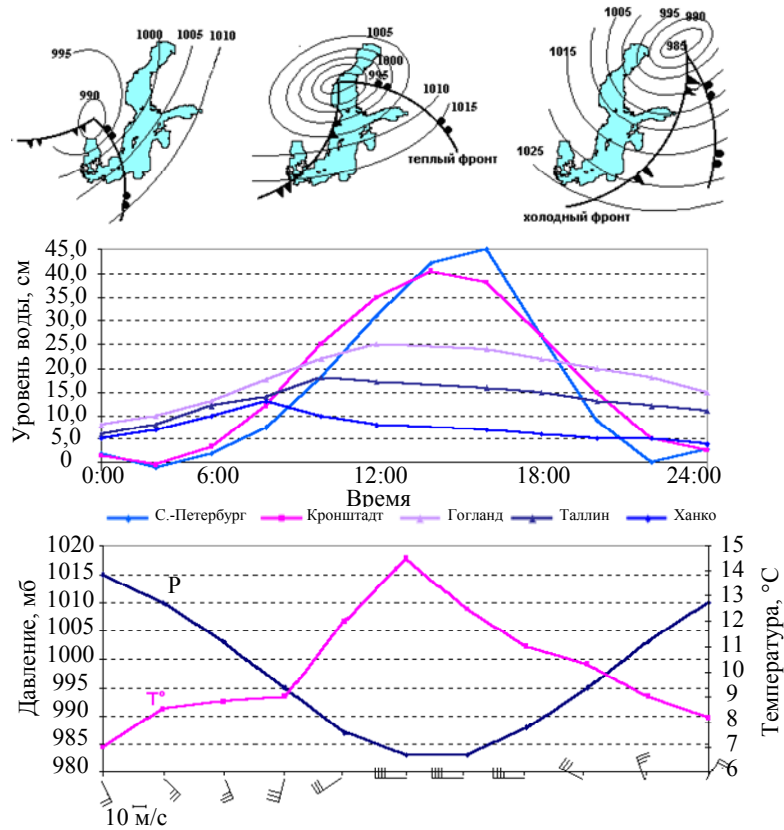


Рис. 8. Стадии развития циклона и штормового нагона в Финском заливе. Внизу — изменение температуры воздуха, атмосферного давления, скорости и направления ветра в Петербурге

Проиллюстрировать распространение нагонной волны вдоль Финского залива можно на примере второго по высоте (380 см)

наводнения, наступившего в Ленинграде 23 сентября 1924 г. Из рис. 9 видно, что по мере продвижения по Финскому заливу амплитуда длинной волны (уровень воды) вследствие уменьшения его глубины возрастает, при сильном и устойчивом западном ветре (см. рис. 8) это приводит к дополнительному ветровому нагону и большему подъему уровня воды.

По некоторым данным, во время наводнения 1924 г. в створе Таллин–Хельсинки за 6 ч в сторону Невской Губы прошло 27–30 км³ морской воды. Расход воды при этом в створе Кронштадта составил примерно 100–120 тыс. м³/с (средний расход Невы — 2500 м³/с). Лишняя вода (отнятая из западной части Финского залива), на относительно короткое время, затапливает территорию в дельте реки Нева. Природа не терпит неравновесия, и указанный избыток воды через некоторое время возвращается туда, откуда был отобран, в виде обратной волны.

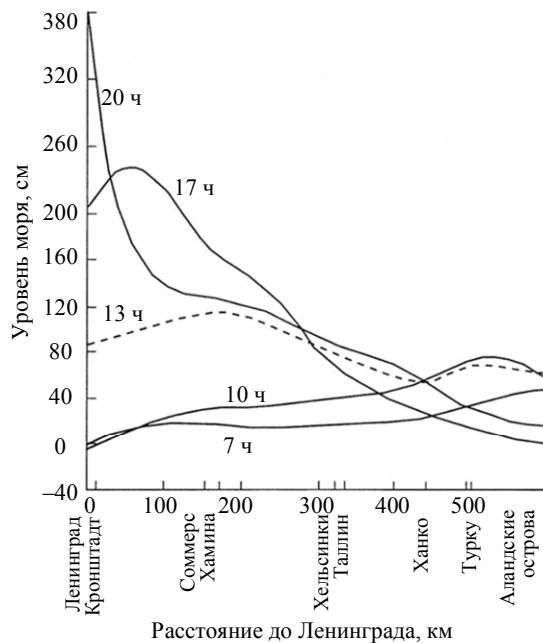


Рис. 9. Профили нагонной волны в различные моменты времени

Определяющий вклад в изменение уровня воды в Санкт-Петербурге вносит длинноволновая составляющая, но петербургские наводнения — достаточно сложное явление, и в их возникновении и

развитии участвуют также ветровая и сейшевая составляющие. В последнее время высказывается предположение, что причиной наводнений могут быть прогрессивно стоячие (градиентно-вихревые) топографические бароклинные волны.

Масса воды природных водных объектов обладает собственными колебаниями. Сейши — это стоячие свободные колебания массы воды в водоеме. Термин «сейши» (фр. *seiche* от лат. *siccus* — сухой) употреблялся для описания осушений дна Женевского озера в Швейцарии. Выведенная из состояния равновесия вода после прекращения действия этой силы для восстановления своего равновесия будет совершать свободные колебания. После набегания длинной волны и ее последующего отражения колебания водных масс всего моря преобразуются в затухающие инерционные, т.е. сейши. Узел сейш Балтийского моря располагается в районе о. Готланд, а пучности — в оконечностях моря: у Датских проливов и в вершинах Ботнического и Финского заливов. Сейши Балтийского моря имеют период около 26 ч, поэтому с интервалом примерно в одни сутки в устье Невы наблюдается еще несколько подъемов уровня. Высота таких подъемов, как правило, не превышает 50 см. При движении серии циклонов (например, с интервалом 24–28 ч) на первое колебание накладываются последующие. Водные массы моря «раскачиваются» циклонами, а подъем уровня в устье Невы за счет сейш возрастает до 100–150 см. В пределах Финского залива известны случаи сейшеобразных колебаний уровня с периодом 7–9 ч.

Значимость каждого из перечисленных выше факторов изменяется даже на разных фазах одного и того же наводнения. При катастрофических наводнениях вклад длинноволновой составляющей, как правило, наиболее существен. Например, во время катастрофического наводнения 23 сентября 1924 г. до наступления максимума (380 см в 19:15) преобладал вклад ветровой составляющей, затем начал возрастать вклад длинной волны. Данные о наводнении 1924 г. были ограниченными из-за потери свя-

зей с прибалтийскими государствами, недостаточного внимания городских властей к проблеме наводнений, тяжелого материального положения гидрометеослужбы в то время. По этим причинам прогноз уровня воды был вдвое занижен. Только почти через 60 лет путем сбора всей возможной информации удалось довольно удовлетворительно воспроизвести этот случай расчетным методом. До максимальной отметки уровень поднялся за 11 ч 13 мин и за 13 ч упал до 4 см, следовательно, все наводнение длилось 24 ч 13 мин.

Менее опасные наводнения формируются относительно равноценным влиянием ветра, сейши и длинной волны. Представления о причинах возникновения и развития наводнений в Петербурге позволяют прогнозировать это явление. Более того, наличие сооружений, защищающих Петербург от наводнений, выдвигает задачу прогнозирования на первый план, т.к. определяет функционирование указанных сооружений. В частности, неправильный прогноз, в случае занижения величины нагона может привести к затоплению города (судопропускные ворота будут открыты), а ложная опасность наводнения (ворота будут закрыты) и, следовательно, прекращение навигации на акватории и т.п. мероприятия ведет к необоснованным убыткам, выражающимся в шестизначных цифрах.

2.2. Защита города от наводнений

Наблюдения и здравый смысл строителей новой столицы указывали на то, что поднятие суши и укрепление берегов — верный способ предотвратить ее затопление, наступавшее в ту пору при подъеме воды выше обычного «ординарного» уровня всего на 60–90 см (за 22 года царствования Петра I произошло 11 нагонов высотой от 161 до 272 см с перерывами от пяти суток до шести лет). Царские указы предписывали ввозить булыжники сушей и морем, штрафы и наказания за нарушения этих указов следовали неотвратимо. Прокладывались каналы, осушались топи и болота, возводились набережные.

В 1727 г. Минихом — директором водных коммуникаций, гидротехником и фортификатором — был составлен «Пройахт, каким образом Санкт-Питер-Бурх противу разливания вод укрыть возможно». Предлагалось возвысить городские территории до 13 футов (более 4 м). Но времена изменились, Миних оказался в ссылке, работы были прекращены, а наводнения продолжались своим чередом. Иногда их бывало по несколько в год (в 1752 г. пять), а иногда они коварно притихали на годы (1729–1732, 1744–1752). Таинственная нерегулярность подъемов воды охлаждала власть, планомерные работы не велись.

В царствование Екатерины Великой грянул первый катастрофический потоп 10 (21) сентября 1777 г. — 321 см. Работы по защите города активизировались (ими руководил И.М. Кутузов, отец полководца): были прорыты Екатерининский, Крюков, Обводный каналы. Однако на высоту подъемов они влияли мало, будучи скорее системой сообщающихся сосудов в пределах города. Самым действенным средством оставалось поднятие суши, благо материала для этого в период бурного строительства было достаточно.

Затем почти полвека наводнения проявлялись как-то «вяло» — не слишком часто и не очень высоко, и вдруг катастрофа 7 (19) ноября 1824 г. (421 см), до сих пор самая серьезная в истории города. После нее почти сразу объявили конкурс проектов защиты столицы от наводнений, в нем участвовали многие русские и зарубежные инженеры и ученые, он оказался «...полезнейшим занятием остроумию и раскрытию познаний молодых офицеров корпуса путей сообщения». Предлагалось немало интересных проектов, но среди других выделялся проект Петра Петровича (Пьера Доменика) Базена, директора Петербургского института путей сообщения, выпускника знаменитой Политехнической школы в Париже, присланного в Россию еще в 1805 г. по соглашению Александра I с Наполеоном. Намечалось строительство дамб по линии Лисий Нос–Кронштадт–Ораниенбаум с проходами для су-

дов, шлюзами, водосливами и другими гидротехническими элементами (рис. 10). Начались долгие обсуждения, и только в 1838 г., когда Базен уже вернулся во Францию, подвели первые итоги: в XIX в. создать такой барьер было практически невозможно.

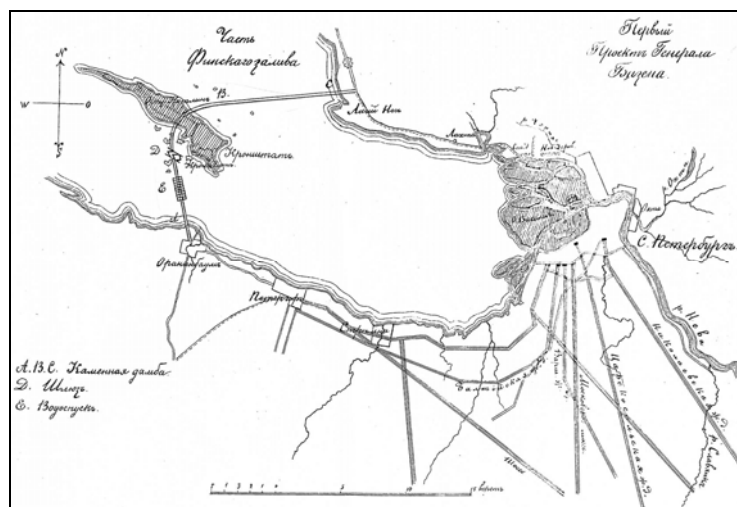


Рис. 10. Проект дамбы П.П. Базена (1824 г.)

В конце XIX–начале XX вв. опасные подъемы воды участились, и задача защиты города вновь стала актуальной. Вспомнили и о проекте Базена, но на более высоком техническом уровне, включая экономические и санитарные (современным языком — экологические) аспекты. В 1891 г. при Русском императорском географическом обществе учредили Особую комиссию по вопросам петербургских наводнений. Военный инженер генерал Э.И. Тилло предложил «Проект предохранения С.-Петербурга от наводнений со сметой и чертежами», во многом повторявший идеи Миниха. Предусматривалось возведение набережных высотой не ниже 275 см, подъем затопляемых территорий до 305 см, расселение и закрытие подвалов, соблюдение закона 1830 г., по которому запрещалось строительство ниже отметки наводнения 1824 г. Радикальные предложения по защите города были сочтены «...неудобоисполнимыми, поскольку они очень дороги и меняют естественный быт Невы, отчего возможно нанесение гигиенического

вреда». Городская Дума поддержала выводы комиссии географического общества и отнесла проект защиты от наводнений к «дальним целям из-за его громадной стоимости и сомнительности ожидаемой от него пользы...». Неотложными целями Дума считала постройку школ, водопровода, мостов, рынков, садов и фонтанов, развитие транспорта, а главное — постройку и содержание больниц в «...связи с поражающей азиатской смертностью в столице: 37 человек на 1000, тогда как в Лондоне — 17)».

Наводнение 25 ноября 1903 г. (269 см), самое значительное в то время после потопа 1824 г., вновь привело к обсуждениям проблемы защиты от водной стихии.

Катастрофическое наводнение 23 сентября 1924 г. (380 см) случилось, когда город именовался Ленинградом. Много недель потребовалось для ликвидации его последствий. Не сразу задумались о радикальных мерах против подъемов воды. Энергичные действия начались в 1926 г., когда ленинградских большевиков возглавил Сергей Миронович Киров, он решительно поддержал гидротехнический проект защиты Ленинграда от наводнений. По инициативе Кирова создали Научно-исследовательский институт коммунального хозяйства, в одном из отчетов которого значилось: «...НИИКХ, призванный к жизни постановлением июньского, 1931 г., пленума ЦК ВКП(б), в 1933 г. закончил проект защитных дамб, преграждающих путь морской нагонной волне. Сооружение будет иметь исключительное значение в социалистической реконструкции Ленинграда. Его хозяйству, а тем самым и Советскому Союзу, будут сохранены десятки миллионов рублей». Проект почти полностью следовал замыслу П.П. Базена. Строительство предполагалось начать в 1934 г., реализация проекта, едва начавшись, была прервана убийством Кирова 1 декабря 1934 г.

Наводнение 15 октября 1955 г. (293 см), почти катастрофическое, вновь подтолкнуло к принятию решения о строительстве защитных сооружений. Технический проект Комплекса защитных сооружений Ленинграда от наводнений был разработан со-

трудниками Ленинградского отделения института «Гидропроект» Минэнерго СССР совместно с научно-исследовательскими институтами Ленинграда, Москвы и других городов СССР.

Изначально рассматривались два варианта размещения дамбы: Западный и Восточный. По Восточному варианту защитные сооружения предполагалось размещать непосредственно в устье Невы, обеспечивая пропуск воды и судов через все ее рукава и протоки. Дамбы проходили бы вдоль приморских территорий. Широкая полоса насыпи позволила бы организовать красивые набережные. Однако такое решение влекло целый ряд трудностей и неудобств: надолго был бы нарушен ритм жизни приморских районов города. Расположение защитных сооружений у самого города предъявляло более высокие требования и к их эксплуатации в дальнейшем, это было обусловлено малыми размерами ограждаемой акватории. К тому же при Восточном варианте возникала необходимость одновременно со строительством дамб возводить мощный гидроузел на Неве, необходимый для регулирования стока реки. Без гидроузла защитные сооружения эксплуатировать было бы нельзя: Нева, перегороженная в устье, быстро затопила бы город.

При Западном варианте защиты работы можно было проводить, не создавая помех развивающемуся городу, от наводнений были бы защищены также Кронштадт, Ломоносов, Петродворец и все побережье Невской Губы. Этот вариант был принят, прежде всего, по соображениям надежности. В 1978 г. Государственным комитетом по науке и технике СССР, с привлечением всех уполномоченных органов (по охране вод, рыбных ресурсов, государственного санитарно-эпидемиологического надзора и др.) была проведена экологическая экспертиза проекта комплекса защитных сооружений (КЗС). В августе 1979 г. вышло партийно-правительственное постановление о начале строительства, к которому приступили тотчас же. КЗС объявили Всесоюзной комсомольской стройкой. К 1990 г. предстояло возвести КЗС высо-

той 8 м и протяженностью 25.5 км по трассе Горская–Кронштадт–Ораниенбаум, состоящий из двух судопропускных отверстий шириной 200 и 110 м, шести водопропускных отверстий из 12 секций шириной 24 м каждое с каменно-земляными дамбами между ними. К 1985 г. была выполнена половина работ. Но наступили большие перемены в стране. Осенью 1990 г., вместо сдачи объекта в эксплуатацию, демократически избранный Ленсовет абсолютным большинством голосов постановил: «Считать нецелесообразным продолжение строительства КЗС по финансовым и экологическим причинам...». На несколько лет «дамба» была законсервирована, но с 2003 г. строительство продолжили. Осенью 2011 г. КЗС был введен в эксплуатацию.

Использование защитных сооружений предполагает последовательное получение прогнозов погоды и уровня воды в Санкт-Петербурге. Они составляются общепринятыми синоптическими и гидродинамическими методами, включая и старый эмпирический прогноз наводнения, основанный на идее Купфера. По его результатам оценивается степень грозящей городу опасности и принимаются решения по управлению КЗС. Таким образом, наличие мощного сложнейшего дорогостоящего гидротехнического комплекса повышает ответственность гидрометеорологов и ценность прогнозов.



Рис. 11. Основные элементы Комплекса защитных сооружений

Полная протяженность защитных сооружений составляет 25.4 км, общая длина дамб 23.4 км. Максимальная высота подъема воды, который может выдержать комплекс, — 5.4 м. КЗС включает 11 защитных дамб (Д-1–Д-11), 6 водопропускных (В-1–В-6) и 2 судопропускных сооружения (С-1 и С-2), а также шестиполосную автомагистраль, проходящую по гребню защитных дамб, с мостами, туннелем и транспортными развязками. Нумерация сооружений идет от Бронки к Горской (с юго-запада на северо-восток).

Тело каждой дамбы имеет форму трапеции. Ядро дамбы составляют песчаный грунт и моренный суглинок. Боковые откосы укреплены щебнем и скальными породами, что позволяет выдерживать натиск воды и препятствует размыву насыпи. Ширина дамб в акватории достигает 80 м, высота насыпей 6.5 м над уровнем моря. Сторону дамб, обращенную к Петербургу, принято называть Невской, а выходящую к заливу — Финской. Финская сторона, принимающая основной удар нагонной волны, более укреплена.

Предназначенные для минимизации влияния КЗС на гидрологический режим акватории Невской Губы и Финского залива водопропускные сооружения состоят из водопропускных секций шириной 24 м, сегментных затворов, а также автомобильных мостов, соединяющих дамбы. В нормальной обстановке затворы закреплены над водой, при угрозе наводнения они опускаются на глубину 2.5–5 м и перекрывают водопропускные секции.

Судопропускное сооружение С-2 — судоходный пролет с подъемно-опускным затвором — предназначено для пропуска малых судов с осадкой до 5.5 м. Ширина пролета — 110 м, глубина на пороге — 7 м. Поперек его установлен затвор массой 2500 т, лежащий в бетонном пазу под плитой судоходного канала. В случае наводнения он поднимается на высоту 4.55 м выше нормального уровня воды. Над С-2 проходит автомобильный мост длиной с насыпями и эстакадой 1483 м. Центральный пролет выполнен вертикально-подъемным, размерами 120×30.2 м

и массой 2300 т плюс два противовеса по 1140 т. Высота моста в наведенном положении — 16 м, в поднятом — 25 м.

С-1 предназначено для пропуска морских судов в течение всего года, это судоходный пролет (ширина 200 м, глубина воды на пороге 16 м) с сегментными плавучими затворами-батопортами. При угрозе наводнения доковые камеры, в которых находятся затворы, заполняются водой, батопорты всплывают и выдвигаются в середину канала. Достигнув центра, затворы начинают наполняться водой и под своей тяжестью медленно опускаться на дно порога, преграждая путь для дальнейшего продвижения балтийской нагонной волны к Санкт-Петербургу. В обычном состоянии батопорты находятся в сухих доковых камерах.

Под судоходным каналом проходит подземный автомобильный тоннель общей длиной 1961 м, нижняя точка тоннеля расположена на отметке минус 28 м.

2.3. Предотвращенные наводнения в Санкт-Петербурге

КЗС остановил отсчет невиских наводнений на числе 308. Для предупреждения угрозы наводнений Дирекция КЗС использует специально разработанную Систему предупреждения угрозы наводнений (СПУН), которая прогнозирует изменения уровня воды в Неве на 72 ч вперед. Первое из предотвращенных наводнений должно было произойти 28 ноября 2011 г., но Санкт-Петербург его не почувствовал: благодаря СПУН начиная с 24 ноября поступала информация о возможном подъеме уровня воды выше 160 см на пункте контроля у Горного института, что означало угрозу наводнения. После поступления данных 27 ноября 2011 г. об угрозе подъема воды в 2:00 28 ноября до 166 см Дирекцией КЗС совместно с Управлением МЧС по Санкт-Петербургу было принято решение о закрытии затворов комплекса. В 22:40 27 ноября отдана команда на закрытие; в 23:40 полностью закрыты С-1 и

С-2; в 00:50 28 ноября закрыты все водопропускные сооружения. Одновременно с прогнозом подъема воды система выдала план маневрирования затворами КЗС для предотвращения наводнения. Оперативно принятые меры не позволили «высокой воде» проникнуть в Санкт-Петербург. Пик подъема воды пришелся на 6:00 28 ноября и по фронту дамб составил 190 см выше ординара, что могло привести к подъему уровня Невы в районе Горного института до 220–230 см, но благодаря работе КЗС подъем воды в Санкт-Петербурге не превысил 128 см. После получения информации, что угроза миновала и уровень воды в Финском заливе понижается 28 ноября в 9:40 начато открытие затворов КЗС, сооружения были полностью открыты в 11:50.

С 2011 по 2015 гг. насчитывается 13 предотвращенных наводнений, из них 3 — в 2011 г. (27 ноября, 26 и 27 декабря), 3 — в 2013 г. (29 октября, 17 ноября, 13 декабря) и 7 — в 2015 г. (2, 13 января; 5–7, 10, 26 декабря). 2015 год характерен тем, что в нем наблюдалась единственный за всю историю Санкт-Петербурга случай угрозы наводнения с тремя пиками (5, 6 и 7 декабря), хотя наводнения с двумя пиками весьма часты. Наводнение с несколькими пиками образовано серией нагонных волн, которые, в свою очередь, индуцированы серией циклонов, идущих друг за другом над Балтийским морем по близким траекториям. Поэтому с формальной точки зрения такие подъемы считаются отдельными наводнениями, однако с практической точки зрения сериальные подъемы уровня предотвращаются совместно, т.е. сооружения КЗС закрываются до первого подъема и открываются после последнего. Пример такого маневрирования приведен на рис. 12, видно, что при угрозе наводнения с тремя пиками (*б*) два последних предотвращены общим планом маневрирования (*а*, красная кривая).

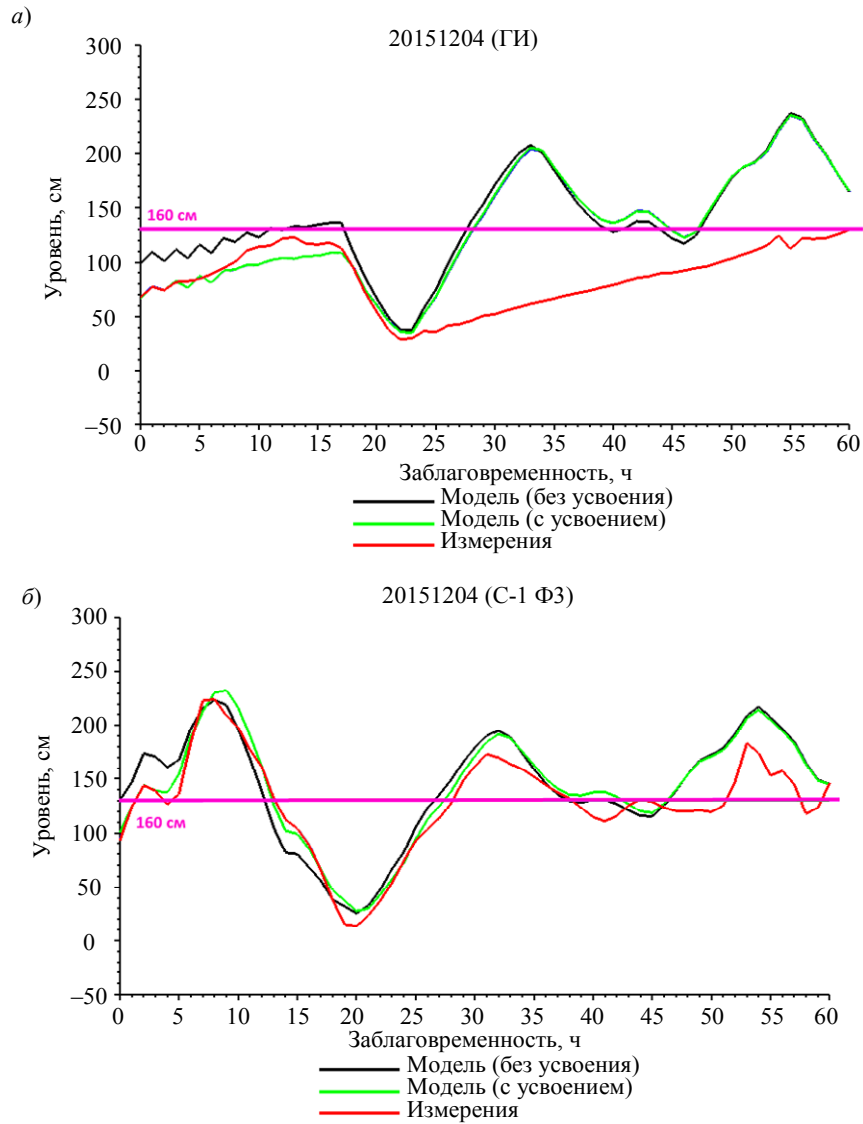
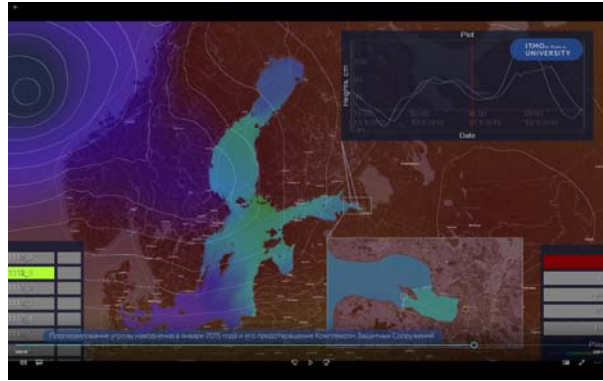


Рис. 12. Прогноз подъема уровня с тремя пиками от 04.12.2015 18:00 с помощью гидродинамической модели с усвоением данных и без (см. гл. IV) в пунктах: а) Горный институт, б) С-1 со стороны Финского залива

На рис. 13 приведен пример визуального анализа и выбора плана маневрирования затворами КЗС при угрозе наводнения 13.01.2015 г. (прогноз уровня моря от 11.01.2015 12:00 в момент времени: а — за 12 ч до наступления, б — наступление, в — через 8 часов после наступления максимального уровня в пункте С-1).

а)



б)



в)

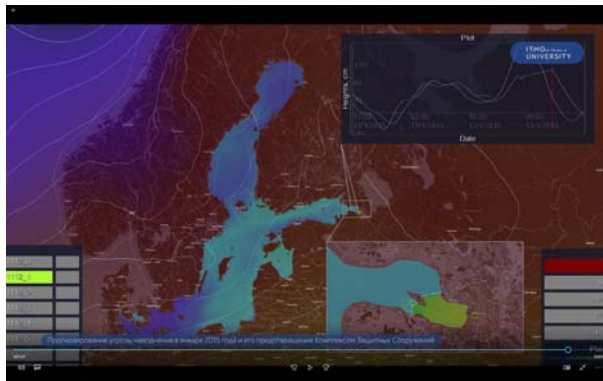


Рис. 13. Визуализация эпизода с угрозой наводнения 13.01.2015 г. через интерфейс системы поддержки принятия решений по маневрированию затворами КЗС: а) до наступления пика подъема уровня, б) пика подъема уровня, в) после прохождения пика подъема уровня

ГЛАВА III

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕВСКИХ НАВОДНЕНИЙ

Развитие методов прогнозирования наводнений связано с эволюцией представлений о физике процесса и прогрессом в области вычислительной техники. Технологии моделирования и прогнозирования штормовых нагонов включают как простые эмпирические соотношения, так и сложные модели нового поколения, включающие блоки расчета, ветра, атмосферного давления, волнения. С 1937 г. предупреждения о подъемах воды в Неве стали составляться с указанием ожидаемой высоты подъема уровня. В 1940–1950-х гг. важнейшие работы по исследованию природы невских наводнений выполнены в Ленинградском Бюро погоды. В 1960-х гг. в Ленинградском отделении Государственного океанографического института (ЛОГОИН) разработан гидродинамический метод расчета и прогноза наводнений, основанный на уравнениях мелкой воды. Позднее метод был усовершенствован. В настоящее время в СПУН используется совокупность различных методов прогнозирования на основе гидродинамических и вероятностных моделей, позволяющая с высокой точностью с заблаговременностью не менее 72 ч предсказать наступление наводнения.

3.1. Эмпирический метод прогнозирования на основе вероятностных моделей

В простейшем случае прогноз может быть получен путем экстраполяции зависимостей, формируемых непосредственно по данным наблюдений. Так, располагая набором синоптических карт и данными о повышении уровня воды в различных местах, синоптик, руководствуясь идеей Купфера: «...по Ревелю узнать подъем воды в Петербурге», обращается к попытке предсказания дальнейшего хода процесса. В 1954 г. Н.И. Бельский впервые в истории службы предупреждений о невских наводнениях пред-

ложил получивший практическое применение эмпирический метод расчета высоты подъема уровня воды в устье реки Невы. Эмпирический метод основан на учете разности в величине максимума подъема и времени его наступления в Санкт-Петербурге и Таллине:

$$H_P = 2.5H_T + \Delta h_w, \quad (1)$$

где H_P — подъем уровня в Санкт-Петербурге, H_T — подъем уровня в Таллине, Δh_w — дополнительное повышение уровня, вызванное ветром над Финским заливом и сейшевыми колебаниями. Величина Δh_w зависит от изменения западной составляющей ветра в средней части Финского залива через три часа после прохождения гребня мимо Таллина. В северо-западном управлении Гидрометеослужбы предложено вместо эмпирического множителя 2.5 вводить коэффициент, зависящий от высоты и направления перемещения длинной волны и от величины западной составляющей скорости ветра в момент подхода гребня волны к устью Невы. Эмпирические зависимости уточнялись для зимних наводнений, когда Финский залив покрыт льдом, а также для сейшевых подъемов воды.

Для вероятностного прогнозирования непериодических колебаний уровня используют модели в форме динамической системы; основные различия между ними состоят лишь в выборе числа и формы предикторов и способе идентификации модели. В качестве предикторов в моделях прогноза уровня моря рекомендуется использовать прогностические поля атмосферного давления и ветра. Для того чтобы избежать зависимости от регулярного поступления метеопрогнозов, в качестве предикторов можно использовать данные фактических наблюдений за уровнем воды и скоростью ветра на гидрометеостанциях (ГМС), находящихся на траектории распространения нагонной волны.

Примером такой модели может служить вероятностная модель прогноза по фактическим данным, построенная на основе предварительно рассчитанных корреляционных зависимостей

между уровнем в пунктах Кронштадт (С-1) и Горный институт (ГИ), с одной стороны, и уровнем в пунктах наблюдения восточной части Финского залива (ВЧФЗ) — с другой. С помощью модели прогноз уровня получается в два этапа: на первом по фактическим данным ВЧФЗ выполняется прогноз уровня в Кронштадте; на втором прогноз в Кронштадте пересчитывается в прогноз в ГИ.

Вероятностная модель непериодических колебаний уровня в Кронштадте в диапазоне синоптической изменчивости с заблаговременностью δ представляется в форме линейной динамической системы в дискретном времени $t = 0, 1, 2, \dots$:

$$\begin{aligned} \zeta_{t+\delta}^{(C-1)} = & m_{\zeta}^{(C-1)} + \sum_{i=1}^P \Phi_i \left(\zeta_{t-i}^{(C-1)} - m_{\zeta}^{(C-1)} \right) + \\ & + \sum_{\langle T \rangle} \sum_{j=P_0^{(T)}}^{P_N^{(T)}} \Theta_j \left(\zeta_{t-j}^{(T)} - m_{\zeta}^{(T)} \right) + \sum_{k=R_0}^{R_N} \left(\bar{\Omega}_k, (\bar{V}_{t-k} - m_{\bar{V}}) \right) + \varepsilon_{t+\delta}. \quad (2) \end{aligned}$$

Уравнение (2) содержит пять основных групп (перечислены слева направо) слагаемых, определяющих принципиальные закономерности изменчивости уровня:

- влияние долгопериодных колебаний уровня, обусловленных сезонными и межгодовыми вариациями (входит как параметр модели);
- особенности временной изменчивости (предыстория) уровня в Кронштадте;
- влияние синоптических колебаний уровня в пунктах измерений, расположенных западнее Кронштадта в ВЧФЗ, на значение уровня в Кронштадте;
- влияние изменчивости скорости ветра в ВЧФЗ на значение уровня в Кронштадте;
- специфические (локальные) факторы, формирующие динамику уровня в Кронштадте, не связанные с перечисленными выше.

Ниже перечислены основные элементы вероятностной модели (2).

$\zeta_{t+\delta}^{(C-1)}$ — предиктант: ожидаемое значение уровня воды в С-1 в момент времени $t + \delta$ (где δ — заблаговременность прогноза, а t — текущий момент времени);

$\zeta_{t-j}^{(T)}$ — предиктор: значение уровня воды в пункте $\langle T \rangle$ в составе ГМК СПУН в момент времени $t - j$;

$\vec{V}_{t-k} = (u_{t-k}, v_{t-k})^T$ — предиктор: значение вектора скорости ветра в ВЧФЗ (в привязке к координатам ГМС о. Мощный) в момент времени $t - j$;

$m_{\zeta}^{(C-1)}$ — среднее (фоновое) значение уровня в пункте С-1, обусловленное долгопериодными колебаниями;

$m_{\zeta}^{(T)}$ — средние (фоновые) значения уровня в пунктах наблюдений $\langle T \rangle$, используемые в качестве предикторов;

$m_{\vec{V}} = (m_u, m_v)^T$ — вектор средней скорости ветра в ВЧФЗ (привязка к координатам ГМС о. Мощный);

Φ_i — коэффициенты авторегрессии, отражающие зависимость текущего значения уровня в С-1 от его предыстории;

Θ_j — коэффициенты динамической системы, отражающие взаимосвязь текущего значения уровня в С-1 с колебаниями уровня в пунктах $\langle T \rangle$, в том числе с учетом их предыстории;

$\vec{\Omega}_k = (\omega_k^{(u)}, \omega_k^{(v)})^T$ — векторные коэффициенты динамической системы, отражающие взаимосвязь текущего значения уровня в С-1 с колебаниями скорости ветра в ВЧФЗ;

$P_0^{(T)}, R_0$ — прогностический сдвиг для временных рядов уровня в пунктах $\langle T \rangle$ и скорости ветра в ВЧФЗ относительно пункта С-1, отражающий минимальную заблаговременность прогноза по каждому из предикторов в отдельности;

$P, P_N^{(T)}, R_N$ — порядок модели (число членов) по учету влияния каждого из перечисленных выше предикторов (включая собственную предысторию);

$\varepsilon_{t+\delta}$ — белый шум, связанный с влиянием специфических (локальных) факторов, некоррелированных с предикторами.

В зависимости от используемых слагаемых и числа временных отсчетов, заблаговременность прогнозов по модели (2) составляет от 4 — есть только данные предыстории в Кронштадте, до 11 ч. — есть данные по ВЧФЗ, включая пункт Таллин (Палдиски), а также измерения скорости ветра.

Вероятностная модель прогноза уровня в Невской Губе на основе значений уровня в Кронштадте имеет вид:

$$\begin{aligned} \zeta_{t+\delta}^{(\text{ГИ})} = & \eta m_{\zeta}^{(C-1)} + \left(\zeta_{t+\delta-r}^{(C-1)} - m_{\zeta}^{(C-1)} \right) \times \\ & \times \left(1 + \alpha \frac{\left(\zeta_{t+\delta-r}^{(C-1)} - m_{\zeta}^{(C-1)} \right)}{\zeta_{100}^{(\text{ГИ})}} \right) + \vartheta_{t+\delta}. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнение (3) содержит три основные группы (перечислены слева направо) слагаемых, определяющих принципиальные закономерности изменчивости уровня:

- влияние долгопериодных колебаний уровня, обусловленных сезонными и межгодовыми вариациями (входит как параметр модели), с учетом стохастического воздействия стока Невы;
- нелинейное влияние синоптических колебаний уровня в Кронштадте на значение уровня в ГИ;
- специфические (локальные) факторы, формирующие динамику уровня в ГИ, не связанные с перечисленными выше.

Ниже перечислены основные элементы вероятностной модели (3).

$\zeta_{t+\delta}^{(\text{ГИ})}$ — *предиктант*: ожидаемое значение уровня воды в ГИ в момент времени $t + \delta$;

$\zeta_{t+\delta-r}^{(C-1)}$ — предиктор: значение уровня воды в пункте С-1, в момент времени $t + \delta - r$, где r — показатель прогностического сдвига;

η — случайный коэффициент, характеризующий отличие фонового уровня в Невской Губе от ВЧФЗ за счет воздействия речного стока;

α — коэффициент нелинейного усиления;

$\zeta_{100}^{(ГИ)}$ — нормировочная величина — экстремальный подъем уровня воды, возможный один раз в 100 лет (328 см);

$\vartheta_{t+\delta}$ — белый шум, связанный с влиянием специфических (локальных) факторов, некоррелированных с предикторами.

Настроечные параметры α, η позволяют адаптировать модель (3) к изменениям локальных гидрологических условий Невской Губы, она используется совместно с моделью (2), в этом случае заблаговременность прогнозов $\delta=5-12$ ч.

Эмпирические и вероятностные методы не позволяют с большой заблаговременностью спрогнозировать максимальную высоту подъема уровня воды. В условиях мегаполиса запас времени в несколько часов слишком мал для принятия мер по снижению размера ущерба.

3.2. Гидродинамический прогноз

Как и другие гидрометеорологические явления, штормовые нагоны могут быть описаны математическими методами. Полные дифференциальные уравнения гидродинамики отражают движения и колебания в воздушной и водной средах. Для численного решения уравнения в частных производных преобразуют в конечно-разностные формы, удобные для последующих вычислений. Исследуемая географическая область, в частности Балтийское море, заменяется сеточной, в узлах которой предполагается получить результаты. Прогноз наводнения в Санкт-Петербурге можно получить, решив около 100 000 удобных для вычислений

алгебраических соотношений, преобразованных из уравнений мелкой воды. Расчеты должны опережать реальное время, и результат, относящийся к предполагаемому будущему, необходимо получить заблаговременно, ибо нет ничего более бесполезного, чем запоздалый прогноз. Начиная с 1960-х гг. с появлением компьютеров стала возможной численная реализация уравнений гидродинамики. Первый гидродинамический прогноз наводнения в Ленинграде в опытно-попытном порядке был выполнен 18 октября 1967 г., когда вода достигла высоты 244 см (22-й подъем «по ранжиру»).

В основу гидродинамического прогноза закладывается причинно-следственная физическая модель динамики водных масс. Эта математическая модель может быть определена как «система уравнений и концепций, используемых для описания и прогнозирования данного феномена или поведения объекта». Однако в текущей парадигме гидродинамическая модель понимается не только как математическая абстракция, но и как компьютерная реализация. Поэтому современная гидродинамическая модель может быть определена как программный комплекс, предназначенный для моделирования отдельных гидродинамических свойств объекта (в рамках группы связанных процессов) и включающий в себя систему управляющих уравнений, сеточную область, а также набор параметрических моделей для упрощенного описания явлений и эффектов. Более того, в настоящее время существует тенденция к объединению гидродинамических моделей отдельных процессов в кластеры для более комплексного описания объекта. Например, платформа для моделирования океана NEMO состоит из моделей для воспроизведения термодинамики и динамики океана NEMO-OPA, ледового покрова NEMO-LIM и биохимии NEMO-TOP. Комплекс моделирования прибрежных акваторий и эстуариев рек Delft3D состоит из моделей для воспроизведения термодинамики и динамики акватории

Delft3D-FLOW, морского волнения Delft3D-WAVE (SWAN), качества воды DELWAQ и распространения взвесей в воде PART.

В рамках задачи прогноза штормовых нагонов гидродинамические модели можно разделить, в первую очередь, по форме записи основных уравнений движения жидкости, а именно, по их размерности (одно-, дву-, трехмерные). Выбор размерности модели зависит от нескольких факторов. Прежде всего, это вычислительная сложность, которая должна удовлетворять требованиям по времени выполнения задачи и доступным вычислительным ресурсам. Также выбор более простой формы записи уравнений меньшей размерности может быть продиктован локальными особенностями моделируемой акватории и решаемой задачи. В сравнительно мелководных морях допустимо использовать двумерные гидродинамические модели, в которых рассматриваются только горизонтальные движения воды (если нет необходимости в воспроизведении течений на разных глубинах). В глубоководных морях применяются трехмерные модели, описывающие также динамику движений по вертикали.

Наиболее простой формой модели в приближении мелкой воды является одномерная. В этом случае система состоит только из уравнения движения для одного компонента горизонтальной скорости течения и уравнения неразрывности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} - fv = -g(h + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{(h + \zeta)}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + (\tau_x^s - \tau_x^b) + A_l \Delta u; \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \frac{\partial U}{\partial x}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $U = \int_{z=h}^0 u dz$ — вектор полного потока, f — параметр Кориолиса, h — глубина, ζ — уровень воды, P — атмосферное давление, τ — касательное напряжение на поверхности s и на дне b , A_l — коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости, Δ — лапласиан, g — ускорение свободного падения, ρ — плотность воды.

Двумерные модели в приближении мелкой воды описываются системой уравнений, содержащей уравнения для двух компонентов горизонтальной скорости течения и уравнение неразрывности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} - fv &= -g(h+\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{(h+\zeta)}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + (\tau_x^S - \tau_x^b) + A_l \Delta u; \\ \frac{\partial V}{\partial t} - fu &= -g(h+\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{(h+\zeta)}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + (\tau_y^S - \tau_y^b) + A_l \Delta v; \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} &= - \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Система уравнений (5) записана в системе обозначений, аналогичной (2), добавлены переменные компоненты скорости течений (u, v). Здесь $V = \int_{z=h}^0 v dz$ — вектор полного потока для второго компонента скорости.

С 1980-х гг. двумерные модели в приближении теории мелкой воды были наиболее востребованы в задачах моделирования стонно-нагонных колебаний уровня благодаря достаточно высокому качеству результатов и низким требованиям к вычислительным мощностям. В настоящее время эти модели активно эксплуатируются для предсказания штормовых нагонов, в том числе и для прогноза наводнений в Санкт-Петербурге в оперативном режиме.

Трёхмерные гидродинамические модели стали активно использоваться для прогностических целей только в XXI в. благодаря большей доступности мощностей вычислительных ресурсов, а также унифицированным технологиям и стандартам параллельных вычислений (например, OpenMP, MPI).

В трёхмерной модели, помимо горизонтальных, учитываются вертикальные скорости течения и, как следствие, акватория больше не считается однородной по глубине (вводится расчетная

сетка с вертикальным разрешением). В этом случае система уравнений выглядит так:

$$\begin{aligned}\frac{du}{dt} - fv &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right); \\ \frac{dv}{dt} - fu &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right); \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0; \\ \frac{\partial p}{\partial z} &= -\rho g.\end{aligned}\tag{6}$$

Система уравнений (6) записана в системе обозначений, аналогичной (2), кроме того, u , v — компоненты горизонтальной скорости течения, w — вертикальная скорость течения, A_z — коэффициент вертикальной турбулентной вязкости.

Примерами использования трехмерной постановки для прогнозирования нагонных колебаний уровня могут являться модели семейства BSM (разработана К.А. Клеванным и развита специалистами компании ВСС и Университета ИТМО), Balt-P (разработана в Университете ИТМО с привлечением сотрудников Гидрометцентра РФ); зарубежные модели на основе платформ NEMO-OPA и Delft3D-Flow.

Помимо основных уравнений гидродинамические модели могут различаться расчетными сетками. Здесь так же, как и в случае с мерностью уравнений, прослеживается связь возрастающей со временем производительности вычислительных ресурсов с типами и пространственным разрешением расчетных сеток. В целом сетки, используемые для вычислений, можно разделить на структурированные и неструктурированные; структурированные — на прямоугольные и криволинейные. Структурированные сетки менее требовательны к вычислительным ресурсам, чем неструктурированные; а криволинейные — менее, чем прямоугольные. Этим объясняется наиболее широкое распро-

странение криволинейных сеток для моделей предыдущего поколения в приближении мелкой воды. В настоящее время, в связи с возросшей доступностью вычислительных мощностей и меньшей трудоемкостью процесса построения, наиболее распространены прямоугольные сетки. Необходимую точность вычислений при этом может обеспечить механизм телескопизации расчетной сетки, или формирование системы вложенных сеток с измельчением пространственного разрешения. Альтернативой телескопизации для достижения требуемой точности расчетов служит применение неструктурированных сеток. Их преимуществом является возможность создания оптимальной сетки без необходимости вводить систему вложенных сеток, за счет переменного размера ячейки (наиболее мелкое разрешение в наиболее сложных или значимых районах). Однако неструктурированные сетки требуют существенных вычислительных ресурсов, поэтому в настоящее время они применяются в основном для небольших и неоднородных, с точки зрения моделирования, акваториях. В современных гидродинамических моделях, как правило, есть возможности для создания любого вида расчетных сеток.

Еще одной важной составляющей гидродинамической модели является параметризация процессов, лежащих за пределами воспроизводимости основными уравнениями динамики и термодинамики, а также выбор параметров для настройки численных схем. Ввиду того, что современные гидродинамические модели содержат огромное количество таких параметров (модель NEMO-OPA — более 300) и большинство из них не влияют на качество воспроизведения сгонно-нагонных колебаний, этот вопрос остается за рамками данной книги. Однако здесь стоит коснуться вопроса параметризации взаимодействия океана и атмосферы, или атмосферного форсинга (от англ. *forcing* — силовое воздействие, вынуждение), т.к. горизонтальный градиент атмосферного давления и скорость ветра являются основными причинами формирования нагонных наводнений в Санкт-Петербурге.

Управление взаимодействием океана и атмосферы в синоптическом масштабе производится с помощью коэффициента ветрового трения, который можно определить константой или вычислять с помощью полуэмпирических соотношений.

В СПУН используются два варианта параметризации ветрового трения: через линейную зависимость от скорости ветра и через параметры ветрового волнения, влияющие на шероховатость поверхности моря.

Известна параметризация ветрового трения вида:

$$C=A+BW, \quad (7)$$

где W — средняя скорость ветра, а коэффициенты $A=6.3 \times 10^{-4}$, $B=6.6 \times 10^{-5}$, однако эти коэффициенты также можно использовать в качестве настроечных параметров, подбирая их значения для лучшего воспроизведения ситуации в разных синоптических условиях.

Другим вариантом параметризации воздействия ветра на водную поверхность является расчет компонентов касательного напряжения ветра согласно теории WOWC (Wind Over Waves Coupled), которая позволяет учитывать шероховатость морской поверхности, используя видимые элементы волн (высоты и периоды). В настоящее время в СПУН в качестве основных используются двумерная модель Балтийского моря BSM2010 и трехмерная бароклинная модель Балтийского моря BALT-P. Однако в качестве конкурирующих моделей могут быть рассмотрены и другие. Наиболее подходящими альтернативными вариантами для прогнозирования штормовых нагонов в Санкт-Петербурге видятся двумерная гидродинамическая модель (ДГДМ), трехмерная модель динамики льда и воды NEMO и трехмерная модель динамики воды Delft3D.

Ко всем гидродинамическим моделям в системе предъявляется общее требование, связанное с обеспечением качественного прогноза по следующим характеристикам:

– максимальная величина подъема уровня воды в Санкт-Петербурге (ГИ) и в различных частях КЗС, в наводненческих ситуациях;

– время наступления максимума уровня воды в Санкт-Петербурге (ГИ) и в различных частях КЗС, в наводненческих ситуациях;

– заблаговременность предсказания наводненческой ситуации (превышение в ГИ уровня воды 160 см).

При сопоставлении моделей, исходя из задач СПУН, следует учитывать дополнительные требования, закладываемые на уровне архитектуры самих моделей.

– *Адекватное воспроизведение среднемасштабных гидродинамических процессов.* Наводнения в ВЧФЗ относятся к среднemasштабным (мезомасштабным) явлениям, к ним же относятся инерционные, приливные, сгонно-нагонные колебания, а также колебания синоптического масштаба времени. Описание механизма формирования и движения нагонной волны, а также ее основных пространственно-временных характеристик должно составлять базу любой гидродинамической модели, используемой в СПУН. Отсюда также вытекает необходимость как можно более точного воспроизведения батиметрии бассейна. Дополнительное требование — чувствительность модели к входным метеорологическим данным, таким как скорость ветра и атмосферное давление, и их изменчивости в синоптическом диапазоне.

– *Детальный учет физических факторов, связанных с природой наводнений.* Динамика водных масс имеет турбулентную природу, что в случае Балтийского моря связано с четко выраженной вертикальной структурой: 1) верхний пограничный слой, ограниченный снизу слоем скачка плотности и характеризующийся вследствие интенсивного перемешивания однородностью; 2) внутренний слой — вся основная толща вод; 3) придонный пограничный слой, в котором происходит потеря (диссипация) энергии движений среднего масштаба. Эту многослойность при моделировании распро-

странения нагонной волны необходимо учитывать путем введения в модель третьей координаты — глубины (в модели BALT-P — в явном виде, в BSM и ДГДМ — параметрически).

– *Детализация района КЗС.* Модель должна позволять работать с сетками различных размеров, вплоть до размера ячейки 20 м. Модельная сетка повышенного пространственного разрешения позволяет описать штормовой нагон непосредственно в заданном районе качественно и подробно. Кроме того, появляется возможность точного воспроизведения в модели, после соответствующей формализации, гидродинамических процессов, происходящих в ходе закрытия и открытия водо- и судопропускных сооружений КЗС.

– *Учет расходов воды* через Датские проливы и расходов воды крупных рек, впадающих в Балтийское море (прежде всего, Невы). Учет водообмена через Датские проливы и стока крупных рек (ежесуточно) позволяет определять средний уровень Балтийского моря путем анализа его изменений через балансовые соотношения.

– *Учет ледовой обстановки* подразумевает использование информации по ледовому покрову (карты анализа ледовой обстановки в цифровом виде) для расчета уровня и течений. Наличие ледового покрова влияет на характеристики штормового нагона.

– *Обеспечение необходимого быстродействия и параллельной масштабируемости* исходя из задач СПУН. Быстродействие необходимо для получения результатов в промежутки времени, достаточный для принятия решения. Для моделей Балтийского моря на сетке крупного и среднего масштаба (шаг по пространству 1 морская миля и более) отношение времени счета к времени прогноза составляет 1/1000 и менее, для моделей на мелкой сетке (шаг по пространству порядка 100 м) это отношение возрастает до 1/100 и более не только за счет увеличения количества ячеек, но и за счет учета дополнительных членов в уравнениях движения. Повысить быстродействие можно за счет применения более мощных компьютеров и распараллеливания вычислений.

3.3. Виды гидродинамических моделей для расчета уровня и течений

Модели Балтийского моря семейства BSM (Baltic Sea Model) разрабатывались специально для моделирования возникновения наводнений в Санкт-Петербурге, вызванных штормовыми нагонами в ВЧФЗ. В настоящее время в СПУН используется модель BSM2010; модели более ранних поколений реализованы на сходных принципах. Модели BSM основаны на системе уравнений мелкой воды, описывающих синоптическую изменчивость уровня и течений и распространение гравитационной волны относительно заданного нулевого уровня. Расчеты по моделям BSM могут выполняться как в двумерной (плановой) постановке, так и в условно трехмерной (когда отсутствует вертикальная скорость переноса, а отдельные слои связаны параметрически). При решении используется переход к гранично-зависимым криволинейным координатам, что позволяет значительно повысить точность решения задач в областях сложной формы и с резкими изменениями рельефа дна по сравнению с решением задач на прямоугольных сетках без телескопизации. При применении телескопизации сетки, можно добиться такой же или улучшенной точности (по сравнению с криволинейной), однако при этом значительно увеличится ресурсоемкость модели. Для Балтийского моря используются криволинейные гранично-зависимые координаты с шагом сетки от 19 км до 110 м в отверстиях КЗС. Расчет выполняется без применения вложенных сеток с помощью явной схемы. Примеры криволинейной сетки приведены на рис. 14.

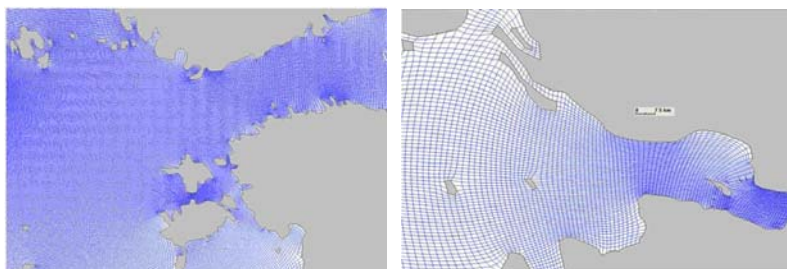


Рис. 14. Сетки криволинейных координат для расчета штормовых нагонов в ВЧФЗ

При реализации моделей семейства BSM используется программный комплекс CARDINAL (Coastal ARea Dynamics INvestigation ALgorithm), разработанный для решения различных задач гидродинамики прибрежной зоны, эстуариев, рек, озер и других водных объектов. Программный комплекс позволяет выполнять расчеты и прогнозы стоковых, ветровых, приливных и других типов течений, колебаний уровня, распространения растворенных и взвешенных примесей, поступающих от внутренних и внешних источников загрязнения в морях, реках, озерах, водохранилищах, дельтах рек, заливах и в других водных объектах.

Исходными для расчетов являются: 1) батиметрия исследуемой акватории, 2) данные о расходах или уровнях воды на участках открытой границы, 3) данные о ветре; 4) информация об источниках загрязнения. Для расчетов динамики водных масс Балтийского моря используются метеопрогнозы модели HIRLAM и прогнозы расходов через Датские проливы модели BSHmod.

Разработанный на языке Delphi комплекс CARDINAL работает под управлением ОС Windows изначально не поддерживал параллельных вычислений и не позволял применять автоматические средства распараллеливания и оптимизации кода (поскольку для языка Delphi они отсутствуют). Для преодоления этой проблемы в 2014 г. функциональная часть программного комплекса CARDINAL, используемая в СПУН, была переписана на язык C# с поддержкой параллельных вычислений.

Трехмерная бароклинная модель уровня и течений в Балтийском море BALT-P основана на системе уравнений геофизической гидродинамики со свободной поверхностью в приближениях гидростатики и f -плоскости. В модели BALT-P реализованы современные численные методы решения уравнений геофизической гидродинамики, описывающие широкий спектр движений в океане, включая расчет приливов и штормовых нагонов. Движение в море вызывается внешними по отношению к морю движущими силами, заданными на его поверхности градиентами

атмосферного давления и касательными напряжениями трения ветра. Внутри моря учитывается распределение температуры и солености по глубине и рассчитываются бароклинные поля течений, вызванные неравномерным распределением полей температуры и солености по пространству.

Программная реализация BALT-P представляет собой решение системы дифференциальных уравнений в частных производных с использованием конечных разностей. Исходный текст написан на языке FORTRAN. Программа поддерживает распараллеливание в модели общей памяти с помощью технологии OpenMP. Использование средств распараллеливания позволяет численно решать гидродинамические задачи на расчетных сетках высокого пространственного разрешения (например, для адекватного воспроизведения процессов в Невской Губе).

Входными данными для модели BALT-P являются поля давления и ветра по сведениям метеорологического прогноза (в том числе HIRLAM), выходными — трехмерное поле скоростей течений и уровень Балтийского моря на численных сетках различного пространственного разрешения.

Модель использует две сетки: основную и вложенную. Расчет Балтийского моря осуществляется на основной сетке с пространственным разрешением 2 морские мили; расчет ВЧФЗ, включая КЗС Санкт-Петербурга, — на вложенной сетке с размером ячейки 90 м. При этом на каждом шаге по времени в файл данных записывается уровень, полученный на сетке всего Балтийского моря с разрешением 2 морские мили за период прогноза (от 48 до 72 ч, в зависимости от метеопрогноза) для точек крупной сетки, находящихся на жидкой границе мелкой сетки. Затем расчет повторяется для области детального пространственного разрешения (90 м). Данные двухмильной сетки об уровне моря интерполируются на открытую жидкую границу мелкой сетки. Использование вложенной мелкой сетки необходимо для

адекватного описания процесса проникновения вод Балтийского моря сквозь водо- и судопропускные отверстия КЗС.

В целом BALT-P является современной гидродинамической моделью уровня и течений и не уступает (а по ряду параметров, например механизмам связывания вложенных сеток и учета турбулентности, превосходит) зарубежным аналогам (например, ROM). Пример расчетного поля уровня в Балтийском море при наводнении в Санкт-Петербурге по модели BALT-P приведен на рис. 15.

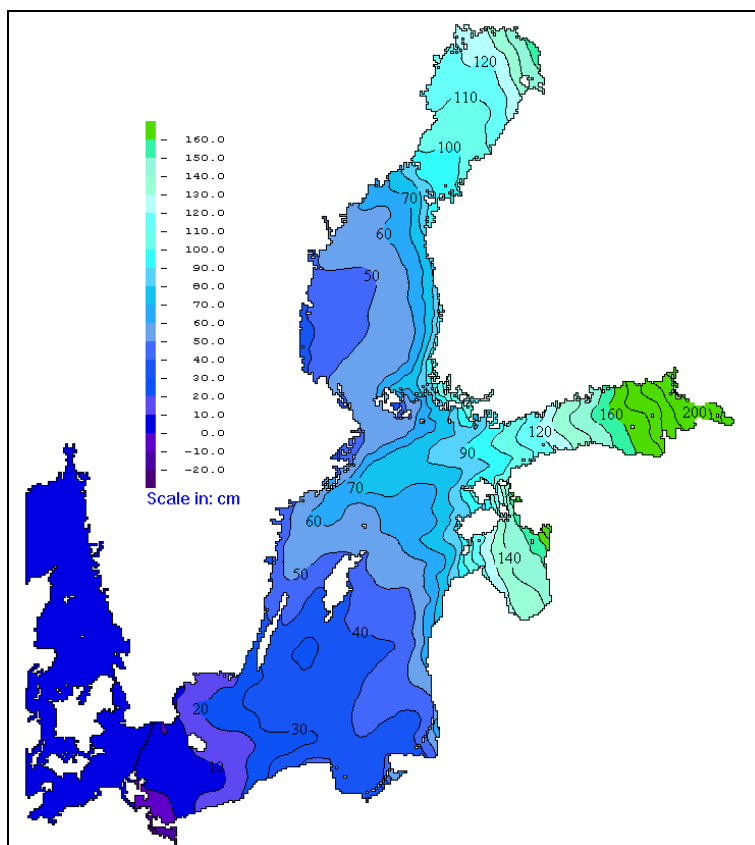


Рис. 15. Уровень моря на 12:00 10 января 2007 г.
по результатам гидродинамического моделирования

Двумерная гидродинамическая модель совместной динамики льда и воды ДГДМ разработана в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте для расчетов движения

воды и льда на акватории Финского залива. Как и модели семейства BSM, она построена в рамках теории мелкой воды и адаптирована к условиям Балтийского моря. Основные уравнения модели включают в себя:

- уравнения мелкой воды с учетом трения о лед;
- уравнения динамики ледяного покрова, включая уравнения движения для льда и неразрывности для льда. Для включения в модель сил внутреннего взаимодействия использована реологическая модель ледяного покрова.

Шаг по пространству в ДГДМ — 30 км. В связи с достаточно большим шагом используется система вложенных сеток. Модель динамики моря и льда применительно к Финскому заливу была реализована на трех уровнях. Расчетная модель второго уровня покрывает акваторию Финского залива с шагом 5 км. Расчетная область модели третьего уровня включает в себя ВЧФЗ, шаг сетки 1 км. Открытая граница проходит в районе 28° з.д. от северного побережья Финского залива через о. Малый до п-ова Кургальский. Значения составляющих полного потока и скоростей дрейфа льда, а также уровня и сплоченности линейно интерполируются в узлы сетки третьего уровня из узлов сетки второго уровня.

Модель численно реализуется с использованием явно- неявной конечно-разностной схемы. Условие устойчивости схемы удовлетворяет критерию Куранта–Фридрихса–Леви. По полям атмосферного давления производится его интерполяция в узлы расчетной сетки, рассчитываются скорость и направление приводного ветра, тангенциальное напряжение, создаваемое действием ветра на подстилающую поверхность, градиенты атмосферного давления.

К достоинствам ДГДМ можно отнести значительно меньшее время получения результата по сравнению с моделью BSM2010. В целом эта модель достаточно эффективна для моделирования крупномасштабных синоптических процессов, однако архитек-

турно и функционально уступает зарубежным аналогам (например, NEMO).

Трехмерная гидродинамическая модель совместной динамики льда и воды NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean) предназначена для моделирования океана и его взаимодействия с другими компонентами климатической системы Земли в широком пространственно-временном диапазоне. Модель применяется для решения различных задач в региональном и глобальном масштабе, как при заданном атмосферном воздействии, так и совместно с моделью атмосферы (с использованием утилиты OASIS).

Пространственная дискретизация модельных уравнений осуществляется с использованием «смещенной» S -сетки Аракавы. Вертикальная дискретизация зависит от характера решаемой задачи: пользователь имеет возможность задать полный или частичный шаг по z - или по s -координате. При выборе линейной формы свободной поверхности положение узлов вертикальной сетки зафиксировано во времени, в противном случае выполняется соответствующая корректировка координат высоты (z^* или s^*), и тогда положение узлов изменяется во времени как функция от высоты водной поверхности. Для работы с вложенными сетками используется пакет AGRIF (Adaptative Grid Refinement in FORTRAN).

Граничные условия на водной поверхности могут быть установлены аналитическими функциями, в терминах потоков (*flux formulation*) или неявно заданы через поля значений скорости ветра, солнечной радиации, атмосферных осадков, влажности, температуры и т.д. (схемы CORE и CLIO). Платформа позволяет осуществлять расчет как закрытых, так и открытых акваторий, предоставляя инструменты для задания открытых граничных условий. Возможен учет проникновения солнечной радиации в толщу воды, а также учет геотермального нагрева воды на дне океана. Платформа реализована на языке FORTRAN90 и запускается под

управлением операционных систем семейства Unix. Модель оптимизирована для векторных процессоров и поддерживает параллельные вычисления с использованием технологии MPI. Основным форматом для входных и выходных данных является NetCDF (Network Common Data Format).

Архитектура платформы NEMO подразумевает, что решение конкретной задачи моделирования предваряется созданием конфигурации, включающей как параметры расчетной сетки, так и перечисление программных блоков и опций, которые необходимо задействовать при расчетах. В состав исходных кодов NEMO включен набор базовых конфигураций, демонстрирующих основные возможности платформы, на основе которых пользователь может создавать свои.

Трехмерная гидродинамическая модель Delft3D-FLOW, разработанная в Дельфтском Технологическом Университете, предназначена для расчетов динамики водной среды в реках, эстуариях и прибрежных зонах. Модель позволяет рассчитывать нестационарные течения и изменения уровня водной поверхности, обусловленные приливными силами, атмосферным форсингом (ветровой нагон) и стоковыми течениями в устьях рек. Посредством численного интегрирования систем уравнений Delft3D-FLOW обеспечивает расчет пространственно распределенных характеристик: скорости течения (горизонтальной и вертикальной), уровня воды, солёности, температуры, накопления осадков и пр.

Архитектура модели включает модули как для двумерных, так и для трехмерных расчетов. Для создания криволинейной (частным случаем является прямоугольная сетка) горизонтальной сетки используется модуль RGFGRID. Для конфигурирования модели, задания граничных и начальных условий, батиметрии используется модуль QUICKIN. При задании граничных условий для вложенных сеток используется модуль Delft3D-NESTHD. В качестве вертикальной может быть использована сетка в z - или s -координатах.

Результат прогноза наводнений не может быть абсолютно точным, оценка меры неопределенности необходима, в частности, для анализа рисков при планировании управления системами предотвращения угрозы наводнений. К настоящему времени разработано множество моделей расчета уровня моря, имеется несколько наборов входных данных последующих модельных расчетов. Все это создало предпосылки к внедрению в оперативную практику так называемых ансамблевых прогнозов, в последнее десятилетие используемых во многих центрах погоды. Прогноз одного и того же явления несколькими способами означает переход от детерминистического прогноза (одна модель — одна цифра) к вероятностному (одно событие — несколько цифр). На основе ансамбля строится результирующий прогноз, а мера его неопределенности задается через вероятность прогностической величины.

ГЛАВА IV

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОГНОЗОВ

В СПУН Санкт-Петербурга в настоящий момент используется несколько альтернативных метеорологических прогнозов от мировых лидеров в технологиях предсказания атмосферных процессов: HIRLAM, FORCE, GFS, COSMO. Одновременное использование нескольких альтернативных прогнозов вместо одного наилучшего (по совокупности критериев) позволяет обеспечить бесперебойное поступление оперативных прогнозов и возможность гибкого подхода (в том числе ансамблевое использование различных прогнозов). В составе оперативных метеорологических прогнозов поставляются данные о температуре воздуха, скорости ветра и атмосферном давлении. Для прогнозирования динамики уровня моря используются метеорологические прогнозы с заблаговременностью 60 ч. В настоящее время доступны прогнозы с предельной заблаговременностью около 200 ч (например, GFS), однако их качество при заблаговременности более 50–60 ч остается на весьма умеренном уровне. Более того, поскольку средняя продолжительность жизни циклона — около 4 суток, использование метеопрогнозов с заблаговременностью более 100 ч для целей прогнозирования наводнений дискуссионно. Как следствие, для обеспечения качества прогнозов необходимо использовать специальные технологии, устраняющие неопределенность за счет усвоения данных текущих наблюдений за атмосферными и гидрологическими характеристиками.

4.1. Усвоение (ассимиляция) данных

Ассимиляция данных является неотъемлемой частью современных систем оперативного прогнозирования гидрометеорологических явлений (включая модели морского волнения, уровня, течений и т.д.). Необходимость его использования связана с тем,

что любые расчеты по прогностическим моделям обладают неопределенностью — неконтролируемым отклонением предсказанных значений процесса от фактически наблюдаемых. Источниками неопределенности оперативного прогнозирования являются входные данные (включая начальные и граничные условия), эмпирические параметры модели, построенные на их основе замыкания и формализации отдельных составляющих, а также тот факт, что прогностический расчет осуществляет экстраполяцию «вперед» в предположении об устойчивости состояния, наблюдаемого в текущий момент времени.

Усвоение (ассимиляция) данных — способ динамической коррекции математической модели и ее результатов с использованием доступных измеренных (фактических) данных. В отличие от калибровки, устраняющей систематическую ошибку модели и выполняющейся периодически с использованием большого объема накопленных данных наблюдений, усвоение данных предполагает динамическую корректировку случайной составляющей ошибки моделирования с применением наиболее актуальных фактических данных. Несмотря на значительное количество исследований в этой области и сложившихся методов, научная проблема усвоения данных не является тривиальной. Большинство математических моделей основаны на системах физических уравнений, в процессе моделирования используется несколько взаимовлияющих величин, поэтому при исправлении одной теряется целостность системы. Таким образом, оптимальное решение задачи усвоения данных зависит от многих факторов, включая предметную постановку конкретной задачи и особенности численной схемы математической модели.

Методики ассимиляции данных в модель могут быть классифицированы в зависимости от типа корректируемых переменных:

– *усвоение во входные данные* — разумный способ уменьшения неопределенности в них;

– *усвоение в начальное состояние* — наиболее часто используемый в прогностических моделях способ.

В этой области существует достаточно много опробованных методик, каждая имеет свои преимущества и недостатки. Одной из самых простых является так называемая схема Крессмана, в которой состояние модели приравнивается к измеренному значению в его окрестности. Главный недостаток этой методики в том, что она учитывает только неопределенность начального приближения модели, неопределенность, содержащаяся в измеренных значениях, не учитывается. Для представления неопределенности, присутствующей в измерениях, начальном приближении и анализе (скорректированном состоянии) модели, вводятся модели их ошибок:

– $E_f = X_f - X_t$ — ошибки начального состояния модели, где X_t — истинное состояние;

– $E_o = y - X_t$ — ошибки измеренных значений, где y — наблюдаемое значение;

– $E_a = X_a - X_t$ — ошибки анализа модели (после усвоения).

На практике первые два типа ошибок могут быть оценены только исходя из априорных знаний, они отражают степень доверия к начальному состоянию или измеренным значениям. Такая постановка ограничивает возможность устранения ошибки и определяет остаточную (после процедуры усвоения данных) неопределенность E_a .

Учитывать уровень доверия как к модели, так и к измерениям, позволяет оптимальная интерполяция, обеспечивающая усвоение данных наблюдений по пространству в фиксированный момент времени, но не учитывающая предысторию модельных состояний. Предысторию процесса позволяют учитывать методы вариационного усвоения данных (3D-Var, 4D-Var).

Методика на основе фильтра Калмана, по сравнению с приведенными выше методиками, обладает следующими преимуществами:

– при коррекции учитывается предыстория модельных состояний и наблюдаемой величины;

- усвоение может производиться последовательно (не итеративно), в отличие от вариативных методик, что сокращает ресурсоемкость;
- точность модели рассчитывается динамически для каждого состояния.

Однако к недостаткам этой методики усвоения следует отнести слишком высокую ресурсоемкость реализации теоретической модели фильтра Калмана (требуется хранить в памяти и обрабатывать ковариационную матрицу ошибки размерностью n^2 , где n — вектор начального состояния модели). Вследствие этого для моделей, состояние которых описывается множеством переменных (моделей пространственно-временной структуры гидрометеорологических процессов), требуется упростить процедуру усвоения. Кроме того, доказано, что использование методики целесообразно только для линейных (в окрестности начального состояния) моделей. Нелинейные модели могут быть приближенно представлены как тангенциально линейные в окрестности начального приближения. Тем не менее учитывать нелинейные эффекты позволяют расширенные процедуры калмановской фильтрации (расширенный и ансамблевый фильтры Калмана). Однако не доказана оптимальность решения, найденного с использованием этих обобщенных процедур.

Упомянутые выше методики усвоения данных предназначены для работы с моделями, параметры которых не изменяются в течение анализируемого периода. Тем не менее для повышения качества корректировки модели требуется учитывать изменчивость ее параметров, динамическая настройка которых позволяет скомпенсировать изменения в состоянии модели и входных данных после ассимиляции. При этом подразумевается, что период изменчивости параметров меньше периода изменчивости состояния модели. Настройка может производиться на основе процедуры, аналогичной калибровке, выполняемой динамически с использованием данных наблюдений за период, прошедший с последнего

усвоения. Неопределенность, содержащаяся в структуре модели и измерениях, не учитывается. Помимо того, корректировать модельные параметры на основе сравнительно малого количества накопленных данных, возможно, нецелесообразно. Избежать недостатков детерминистического подхода к оцениванию параметров позволяют вероятностные модели усвоения данных, в частности, двойственный ансамблевый фильтр Калмана, позволяющий одновременно усваивать информацию и в состояние модели, и в параметры. Однако использование этого механизма приводит к значительному увеличению дисперсии параметров, поэтому его комбинируют с ядерным сглаживанием полученного ансамбля распределения. Альтернативным способом решения задачи является усвоение на основе байесовского подхода. Например, методика рекурсивной оценки параметров на основе байесовских сетей (BaRe) предоставляет более широкие, по сравнению с традиционными оптимизационными техниками, возможности и позволяет учитывать неопределенность и структуры, и параметров модели.

Усвоение в выходные параметры (предсказание ошибки) может также быть интерпретировано как статистическая коррекция результатов моделирования и прогноз ошибки модели. Возможность прогноза ошибок модели обусловлена тем, что ошибки периодически коррелированы. Для прогноза будущих значений ошибки могут использоваться модели типа авторегрессии — скользящего среднего.

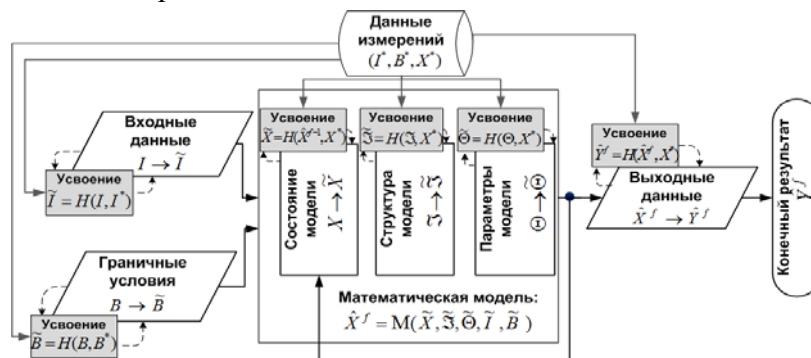


Рис. 16. Усвоение на различных этапах процесса моделирования: модифицированная схема на основе классификации ВМО

На рис. 16 представлена схема организации усвоения в модель, акцент в которой сделан на использование различных методик усвоения (H — оператор усвоения, M — оператор модельного действия; f , $f-1$ — указатель на принадлежность к текущему/прошлому прогнозу — модельной итерации). В схеме также продемонстрировано усвоение в граничные условия и косвенное усвоение в структуру модели. Усвоение в граничные условия целесообразно использовать при моделировании процессов на небольших пространственных областях, когда результат в основном определяется значениями, заданными на границе. Косвенное усвоение данных в структуру возможно лишь в моделях, управляемых данными (*Dynamic Data Driven Application Simulation, DDDAS*), так как в этом типе моделей структура выстраивается динамически с учетом фактических данных. В классических математических моделях структура полагается неизменной во временном масштабе усвоения данных.

4.2. Усвоение в начальное состояние модели уровня и течений

Применительно к задачам прогнозирования гидрометеорологических явлений и процессов наиболее часто применяется техника усвоения в начальные условия на каждой итерации запуска прогностической модели или системы моделей. Для реализации этой техники используются различные методики, различающиеся по сложности исполнения.

На рис. 17 приведена принципиальная схема решения задачи ассимиляции данных, выполняемой с целью повышения качества оперативных прогнозов уровня Балтийского моря в диапазоне синоптической изменчивости. Для расчета прогноза с заданной заблаговременностью (характеризуемой моментами времени $t+1$, $t+2$ и пр.) необходимо иметь оперативный метеорологический прогноз (поля скорости ветра и, опционально, атмосферного давления на уровне моря), а также знать исходное поле уровня моря в момент времени t . Оно используется в качестве начально-

го условия для системы уравнений гидродинамики (реализованной в модели), которое описывает передачу энергии движения от атмосферы к водным массам. В ходе интегрирования уравнений гидродинамики получают прогностические поля уровня в моменты $t+1, t+2, \dots$. Теоретически их можно использовать как соответствующие начальные приближения для итераций $t+2, t+3, \dots$, однако с увеличением номера итерации прогрессирующая погрешность (обусловленная ошибками метеорологического прогноза и условностями применяемой гидродинамической модели) может возрасти. Это приводит к ухудшению качества прогноза на больших временных интервалах (12–60 ч). Как следствие, в каждый момент времени целесообразно выполнить уточнение (корректировку) начальных приближений поля уровня, используя для этого прогностические данные, полученные на предыдущей итерации, и результаты текущих измерений.

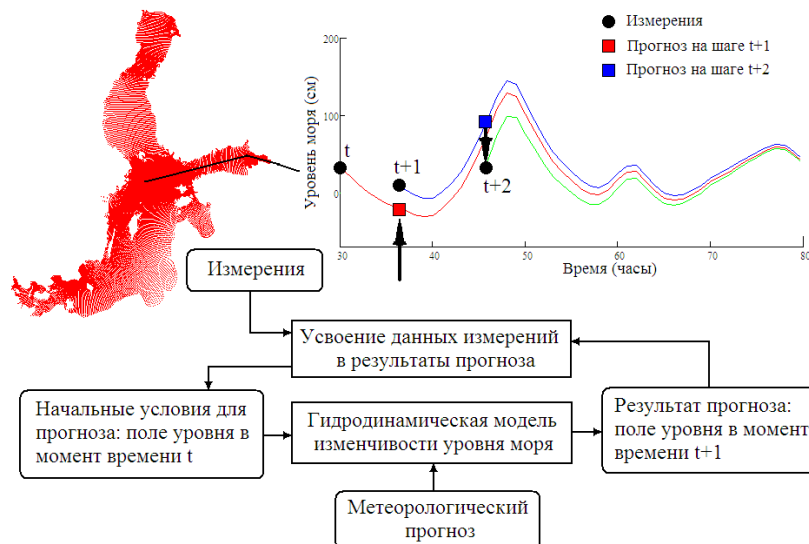


Рис. 17. Принципиальная схема ассимиляции данных в модели синоптической изменчивости уровня моря

Наиболее простым способом усвоения данных в модели является непосредственное применение процедуры оптимальной интерполяции к полю невязки таким образом, чтобы после

усвоения значения «откорректированного» поля совпадали с измерениями в соответствующих точках. Однако современный опыт показывает целесообразность применения подходов, основанных на корректировке исходного поля, обеспечивающих близость совокупно и к модельным расчетам, и к измерениям в заданной метрике. Для реализации таких подходов используются различные модификации фильтра Калмана, в гидрометеорологии традиционно представляемого двумя соотношениями:

$$\zeta^f = M\hat{\zeta}, \quad (8)$$

$$\hat{\zeta} = \zeta_0 + K(Cy - \zeta_0). \quad (9)$$

Здесь ζ^f — прогностическое поле уровня (на следующий шаг), M — оператор действия модели, $\hat{\zeta}$ — откорректированное поле уровня, ζ_0 — исходное поле уровня (результат предыдущего прогноза), K — коэффициент фильтрации Калмана, y — вектор измерений уровня в реперных точках, C — матрица измерений, входящая в соответствующее уравнение измерений $\zeta_0 = Cy + \delta$, где δ — ошибка измерений с ковариационной матрицей R . Все входящие в (8), (9) величины являются многомерными (т.е. векторами и матрицами). Учитывая возможность формулировки (8), (9) в фазовом пространстве, в векторы ζ^f , $\hat{\zeta}$, ζ_0 и y могут быть включены значения не только для заданного момента времени, но и с заданным временным лагом.

Практическое использование фильтра (8), (9) предполагает вычисление коэффициента фильтрации Калмана K . В общем случае для этого решается матричное уравнение:

$$\left[CPC^T + R \right] K^T = CP, \quad (10)$$

где P — ковариационная матрица фазового вектора (по сути, составляемая из значений ковариационной функции поля уровня).

Следует отметить, что в общем случае фильтр Калмана может применяться для произвольного числа реперных точек и точек расчетной сетки. Однако число станций в ВЧФЗ весьма невелико, тогда как сетка является достаточно мелкой. Это делает неэффективным «размазывание» коррекции непосредственно в матрице измерений S в силу возникновения мультиколлинеарности при операциях с ней. Кроме того, существенная связность точек поля уровня в Финском заливе делает нецелесообразным использование т.н. локальных фильтров Калмана.

Для фильтра (8), (9) важно правильно интерпретировать источники шума измерений δ (и соответствующей ему матрицы R). В данном случае шум является не столько метрологической характеристикой процесса измерений, сколько показателем способности (и целесообразности) модели отражать тот или иной эффект, присутствующий в измерениях.

Переходя к описанию более частного случая применения изложенной методики на примере усвоения данных об уровне в модель BSM, стоит отметить, что особенностью усвоения данных в задаче оперативного прогноза уровня моря является то, что измерения уровня производятся в фиксированных точках, в то время как начальное приближение представляет собой все поле целиком. Как следствие, необходима дополнительная процедура, позволяющая провести корректировку каждой точки прогностического поля уровня моря по данным наблюдений в ограниченном числе пунктов, используя для этого априорные знания предметной области. К таким знаниям могут относиться, например, разного вида вероятностные модели, количественно описывающие статистическую взаимосвязь между точками поля. Очевидно, что описательная способность таких моделей существенно зависит как от расположения пунктов наблюдений, так и от дискретности получаемых на них данных.

При усвоении данных об уровне в модель BSM следует учитывать ее особенности. Во-первых, она ориентирована на

воспроизведение синоптической составляющей динамики водных масс; во-вторых, записывается в виде уравнений мелкой воды, которые решаются относительно плоской нулевой поверхности. Поэтому задача усвоения решается в два этапа. На первом этапе устраняется *систематическая ошибка*, связанная с долгопериодными колебаниями (фоновым уровнем), на втором — *случайная ошибка* (посредством фильтрации Калмана).

При этом сама модель поля уровня и течений с учетом многомасштабной изменчивости может быть записана в виде:

$$\begin{aligned}\zeta(x, y, t) &= X(x, y) + \zeta_0(x, y, t) + \\ &\quad + h(x, y, t) + \varepsilon(x, y, t), \\ \vec{W}(x, y, z, t) &= \vec{W}_z(x, y, z) + \vec{W}_0(x, y, z, t) + \\ &\quad + \vec{v}(x, y, z, t) + \vec{\eta}(x, y, z, t).\end{aligned}\quad (11)$$

Здесь X, W_z — климатические поля уровня и течений Балтийского моря (например, средние многолетние значения по сезонам или месяцам — математическое ожидание составляющей сезонной и межгодовой изменчивости); ζ_0, \vec{W}_0 — долгопериодная составляющая динамики водных масс с масштабами больше, чем у штормовых нагонов (может не воспроизводиться в полной мере моделями, хотя косвенно учитывается в граничных условиях); h, \vec{v} — синоптическая составляющая динамики водных масс (воспроизводится гидродинамическими моделями); $\varepsilon, \vec{\eta}$ — локальные мелкомасштабные возмущения, связанные, например, с подсеточными эффектами (не воспроизводятся гидродинамическими моделями).

Оценка долгопериодной составляющей $X + \zeta_0, \vec{W} + \vec{V}_0$ в каждой точке поля осуществляется в форме скользящего среднего, определяемого также посредством фильтра Калмана. При этом значение фонового уровня в каждой точке непостоянно: величины X, \vec{W} в общем случае являются настроечными параметрами, поскольку включают в себя различие в системах отсчета уровня

(если точки, обеспеченные наблюдениями, располагаются в различных странах).

После процедуры низкочастотной фильтрации для остаточных колебаний в синоптическом диапазоне проводится процедура усвоения данных в контрольных точках, обеспеченных наблюдениями. После этого выполняется оптимальная интерполяция невязки в контрольных точках на основе регрессионной модели, построенной по априори рассчитанным корреляционным характеристикам полей уровня и течений.

На рис. 18 представлены общие характеристики ошибки прогноза (в терминах средних значений и СКО) для расчетов без усвоения (1), с ретроспективным (идеальным) усвоением в пунктах ГИ и С-1 (3) и усвоением в оперативном режиме (2 — только в ГИ, 4 — в ГИ и С-1) в п. Горный институт и Кронштадт.

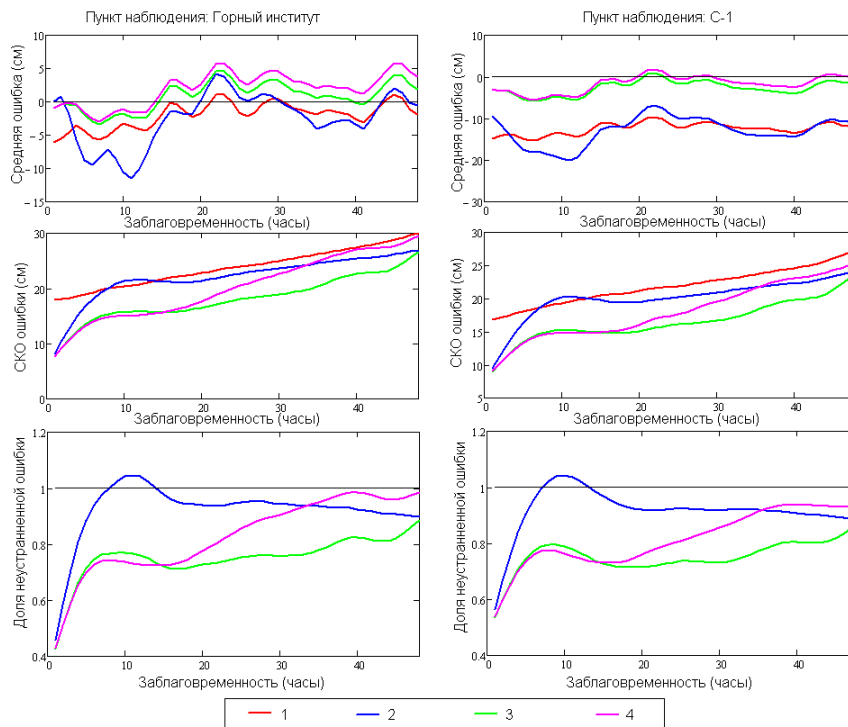


Рис. 18. Общие характеристики ошибки прогнозов синоптической изменчивости уровня в пунктах ГИ и С-1

Усвоение в параметры модели уровня и течений. Идея усвоения данных в параметры модели, как было упомянуто выше, состоит в динамическом определении оптимальных значений для набора параметров математической модели. Ввиду ресурсоемкости данной задачи за счет процедуры оптимизации и ресурсоемкости самих гидродинамических моделей число оптимизируемых параметров невелико (обычно от 1 до 3).

При гидродинамическом воспроизведении нагонных наводнений параметром, оказывающим наибольший эффект на результат моделирования, является ветровое трение, определяющее взаимодействие океана и атмосферы.

Параметризация ветрового трения τ может задаваться в виде модели

$$\tau_{(x,y)} = KC_d \rho_a w_{(x,y)} |\vec{W}|, \quad (12)$$

где ρ_a — плотность воздуха, $w_{(x,y)}$ — компоненты скорости ветра, $|\vec{W}|$ — модуль скорости ветра, K — коэффициент калибровки, C_d — ветровой коэффициент:

$$C_d = a + b|\vec{W}|, \quad (13)$$

для разных акваторий коэффициенты a , b определяются эмпирически.

Также параметризация ветрового трения может задаваться через шероховатость поверхности, создаваемую морским волнением (получаемым из прогнозов по модели ветрового волнения):

$$\tau = \tau_t + \tau_w K f(S(\omega, \varphi), \vec{W}, U_*, \Xi), \quad (14)$$

где τ_t — турбулентное трение ветра, τ_w — дополнительное трение ветра, создаваемое взволнованной поверхностью, $S(\omega, \varphi)$ — частотно-направленный спектр морского волнения, \vec{W} — скорость ветра на высоте 10 м, U_* — скорость трения ветра, Ξ — эмпирические и полуэмпирические параметры, K — коэффициент для калибровки.

Так как параметры форсинга выбираются исходя из их влияния на качество прогнозов уровня, то целесообразно производить

их калибровку через гидродинамическую модель. В связи с большим объемом необходимых расчетов и периодического характера калибровки (из-за постоянного развития атмосферных и гидродинамических моделей нужно заново находить параметры их оптимального сопряжения) эта процедура может выполняться автоматизированно. Тогда в общем виде процедура может быть сведена к задаче условной минимизации функции:

$$F(\vec{k}) = \sum_p \sum_{t=0}^T (M(\vec{k}, p)_t - D(p)_t)^2, \quad \vec{k} = \{k_i\}_{i=1}^N, \quad (15)$$

где \vec{k} — вектор параметров модели, N — число настраиваемых параметров модели, T — временное окно, $M(\vec{k}, p)_t$ — результат моделирования уровня в точке наблюдений p с параметрами \vec{k} на момент времени t , $D(p)_t$ — результат наблюдения (измерения) в точке p на момент времени t .

Применительно к задаче подбора коэффициентов ветрового трения в параметризации Банке–Смита и коэффициента масштаба касательного напряжения ветра в рамках параметризации WOWC процедура (15) сводится к одномерной условной минимизации.

На рис. 19 представлен результат автоматизированной калибровки прогноза уровня. Из рисунка видно, что наибольшая неопределенность в результатах прогнозирования характерна для пика наводнения (на рисунке он приходится на 14:00) и превышает неопределенность, вызванную заблаговременностью прогноза.

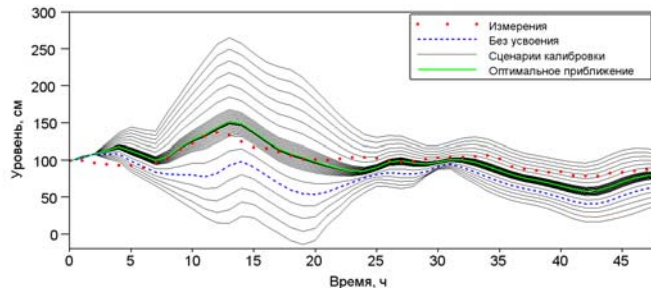


Рис. 19. Пример прогноза уровня воды в ГИ с применением автоматизированной процедуры калибровки

Процедура усвоения в параметры модели (или динамической калибровки параметров) может быть также реализована на основе генетического алгоритма эволюции. Авторами книги был разработан алгоритм эволюции для динамической калибровки коэффициента ветрового трения гидродинамической модели BSM. В качестве входных данных для BSM использовался оперативный метеорологический прогноз HIRLAM. Динамическая калибровка проводилась для точек ГИ и С-1 на акватории Невской Губы Балтийского моря, которые наиболее близко расположены к КЗС и обеспечены измерениями. В качестве целевой функции для динамической калибровки был использован критерий минимума среднеквадратической ошибки. На рис. 20 приведены примеры диаграмм сходимости ошибок прогноза по модели BSM в точках ГИ и С-1 после динамической калибровки с помощью эволюционного алгоритма (в виде «ящичков с усами»), а также фронты (в пространстве двух точек) ошибки модели для прогноза уровня воды.

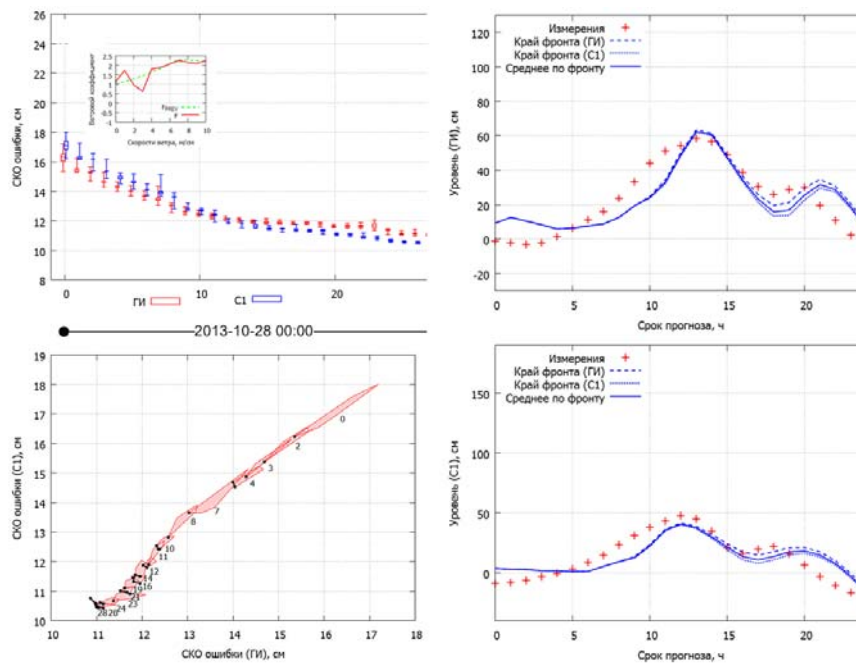


Рис. 20. Усвоение в параметр ветрового трения модели BSM для прогноза уровня воды с помощью эволюционного алгоритма (28.10.2013 в 00:00)

Видно, что применение эволюционного алгоритма для динамической калибровки обеспечивает сходимость ошибки прогноза и ее минимизацию для особей из последнего поколения в прогнозе.

Статистическое усвоение в результаты моделирования уровня и течений. Когда выполнение процедуры усвоения в начальные параметры невозможно (например, при использовании готовых результатов моделирования из внешних источников) или слишком ресурсоемко, можно использовать альтернативный вариант, согласно которому построенная на численном решении уравнений динамики среды модель заменяется менее ресурсоемкой вероятностной, учитывающей только статистические связи между переменными. Такая модель может формулироваться в виде модели ансамблевого усвоения данных, состоящей из непосредственно ансамблевой процедуры коррекции, процедуры усвоения случайной (мгновенной) ошибки, а также процедуры распространения результатов коррекции в точку на все поле.

Для метеорологических процессов (ветер, давление, температура воздуха) характерной особенностью является их пространственно-временная изменчивость, обусловленная наложением и взаимодействием большого количества факторов. Поскольку основным объектом интереса в данном случае является синоптический диапазон изменчивости, то учет крупных масштабов (сезонный, межгодовой) должен учитываться в коэффициентах модели.

Пространственно-временную связность полей ветра, атмосферного давления и температуры воздуха над Балтийским морем можно описать вероятностной моделью линейной динамической системы, позволяющей выразить зависимость одного процесса от другого (или других).

На примере прогностических данных, не содержащих информации о температуре воздуха, и представления поля скорости ветра для зонального V^u и меридионального V^v компонентов скорости ветра можно записать:

$$\begin{aligned}
V^u(t, r) = & \sum_{r=1}^N \int_{\tau=t-s}^t \Phi^u(\tau) W_H^u(t, \tau, r) d\tau + \\
& + \sum_{r=1}^N \int_{\tau=t-s}^t \Phi^{uv}(\tau) W_H^v(t, \tau, r) d\tau + \sum_{r=1}^N \int_{\tau=t-s}^t \Psi^u(\tau) P_H(t, \tau, r) d\tau, \quad (16)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V^v(t, r) = & \sum_{r=1}^N \int_{\tau=t-s}^t \Phi^{vu}(\tau) W_H^u(t, \tau, r) d\tau + \\
& + \sum_{r=1}^N \int_{\tau=t-s}^t \Phi^v(\tau) W_H^v(t, \tau, r) d\tau + \sum_{r=1}^N \int_{\tau=t-s}^t \Psi^v(\tau) P_H(t, \tau, r) d\tau,
\end{aligned}$$

где $\Phi(\bullet), \bar{\Psi}(\bullet)$ — передаточные функции, \bar{W}_H, P_H — результаты прогностического моделирования процессов, используемых в качестве предикторов (ветер, давление), $r = (x, y)$ — координаты точек поля. В модели (16) временная зависимость процессов может рассматриваться с учетом временного сдвига в прошлое τ , при этом учитывается пространственная связность поля из N точек.

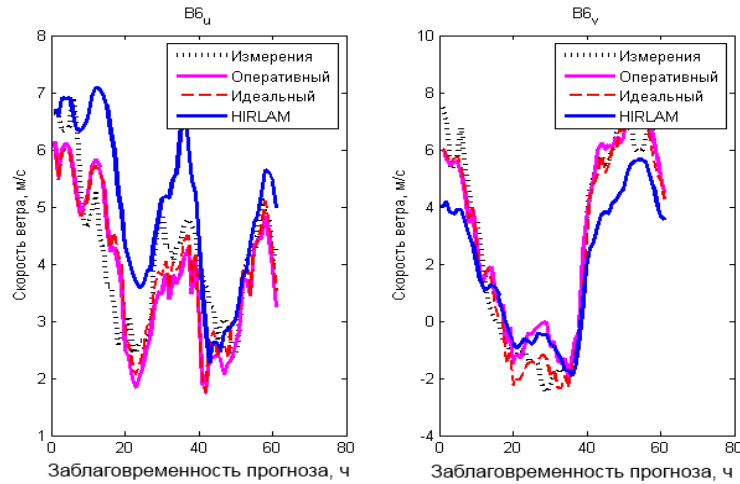


Рис. 21. Пример статистического усвоения компонентов скорости ветра в прогноз HIRLAM (30.10.2013 в 00:00) в точке B6 по методу (16)

Коэффициенты $\Phi(\bullet), \bar{\Psi}(\bullet)$ (для каждого значения r, τ) определяются системой уравнений типа Юла–Уокера, матрица кото-

рой составлена из значений корреляционных функций исходных процессов (давления, скорости ветра).

В общем случае набор точек $\{r\}$ может представлять собой все поле. Однако параметры модели могут быть идентифицированы только на конечном наборе точек, в которых доступны измерения. Для скорости ветра и атмосферного давления это точки $\{\tilde{r}\}$ сети ГМК СПУН: В1, В6, С-1, С-2, Шепелево. С учетом адаптации модели к решению задачи усвоения данных в ВЧФЗ (т.е. локальной коррекции метеорологических характеристик) все прогнозы в ансамбле также должны быть представлены на множестве точек $\{\tilde{r}\}$. Из рис. 21 видно, что функции корреляции между точками $\{\tilde{r}\}$ не имеют временных сдвигов (т.е. смещение между максимальными корреляциями в разных пунктах ГМК равно нулю), поэтому смещение τ в модели (16) тоже будет равно нулю.

Для идентификации модели (16) с учетом различной заблаговременности tp можно представить выражение в форме линейной регрессии:

$$V^u(t, tp, \tilde{r}) = \sum_{\tilde{r}=1}^n \varphi_{\tilde{r}}^u W_{\tilde{r}}^u(t, tp) + \sum_{\tilde{r}=1}^n \varphi_{\tilde{r}}^v W_{\tilde{r}}^v(t, tp) + \sum_{\tilde{r}=1}^n \psi_{\tilde{r}} P_{\tilde{r}}(t, tp). \quad (17)$$

На основе выражения (17) может быть получен статистически скорректированный прогноз в каждой из точек набора $\{\tilde{r}\}$ ГМК СПУН с учетом зависимостей между остальными точками. Коэффициенты регрессии $\varphi^U, \varphi^V, \psi$ определяются для каждого интервала заблаговременности tp на временном интервале T , представляющем собой скользящее окно предыстории. Параметры $\varphi^U, \varphi^V, \psi$ определяются с помощью метода наименьших квадратов.

Для усвоения случайной ошибки в точках измерений введена дополнительная коррекция прогноза в точке \tilde{r} с использованием коэффициента Калмана (K); наличие этого механизма является отличительной чертой процедуры усвоения, поскольку непосредственно в ансамблевых прогнозах фильтр Калмана не используется. Выражение для результирующего скорректированного прогноза записывается в виде:

$$F_a(t) = \begin{cases} F_b(t_0 + m) + K(M^*(t_0 + m) - F_b(t_0 + m)), & \text{где } t_0 \leq t < m; \\ F_b(t_0 + m) + K \exp(-\omega t)(M^*(t_0 + m) - F_b(t_0 + m)), & \text{где } t > m, \end{cases} \quad (18)$$

где $t \in [t_0, m]$ — заблаговременности прогноза, для которых имеется накопленный факт, M^* — измерения, F_b — начальное предположение (в данном случае результат статистически скорректированного прогноза), F_a — скорректированный прогноз (анализ), ω — коэффициент затухания K .

Рассчитать коэффициент фильтрации Калмана (в одномерном случае) можно следующим образом:

$$K = \frac{\sigma_m^2}{\sigma_m^2 + \sigma_o^2}, \quad (19)$$

где σ_m^2 — дисперсия ошибки модели, определяемая по предыстории, σ_o^2 — ошибка измерений, определяемая из характеристик датчиков.

Выражения (17)–(19) обеспечивают корректировку прогнозов скорости ветра и атмосферного давления только в точках ГМК СПУН. Для распространения результатов корректировки на всю акваторию Балтийского моря необходимо учитывать пространственную связность статистически скорректированного прогноза, которая может быть выражена в виде поля корреляций. Тогда поправка для точки r должна изменяться при удалении от этой

точки с учетом функции, характеризующей пространственную изменчивость процесса (ветра или давления).

$$\hat{\Delta}(s) = \Delta(r) \cdot Z(r-s), \quad (20)$$

где $s = (i, j)$ — координаты точки, в которой определяется поправка, Z — функция распространения поправки в зависимости от удаления от реперной точки (в общем случае связана с пространственной корреляционной функцией). Связность поля ветра и давления в пределах Финского залива позволяет аппроксимировать пространственную корреляционную функцию в окрестностях пунктов ГМК СПУН экспоненциальной функцией.

Усвоение данных в прогностические модели — эффективный инструмент, позволяющий не только снизить неопределенность в результатах конкретной модели, но и обеспечить уменьшение доли прогрессирующей неопределенности и таким образом (опосредованно) повысить качество прогнозирования для всей системы. Для максимальной эффективности усвоения данных необходимо учитывать как особенности конкретных моделей, так и локальные гидрометеорологические особенности района прогнозирования. За счет применения процедуры усвоения данных в СПУН удалось снизить среднюю ошибку прогноза уровня до 2 см для заблаговременности прогнозирования от 7 до 12 и до нуля для 1–6 ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вследствие изменения климата Земли и увеличения числа людей, постоянно проживающих в районах, подверженных частым стихийным бедствиям, возрастает необходимость развития методов и технологий высокоточного прогнозирования экстремальных явлений. Данная книга посвящена истории изучения и прогнозирования такого экстремального явления, как нагонные наводнения в Санкт-Петербурге. За несколько веков наука прошла в этом направлении путь от «описательной фиксации» наблюдаемых явлений до оперативного прогнозирования и предотвращения угрозы наводнения. В настоящее время к решению задачи предсказания наводнений могут быть применены подходы на основе вероятностных и гидродинамических методов прогнозирования. Для обеспечения надежной и бесперебойной выработки прогнозов наводнений создана система оперативного прогнозирования уровня воды в Финском заливе, основанная на гидродинамическом моделировании Балтийского моря, а также учете дополнительных факторов, совокупно влияющих на качество прогноза уровня. Такими факторами являются прогноз морского волнения (изменяющего шероховатость поверхности моря), неопределенность метеорологического прогноза, локальные физико-географические условия Невской Губы и многие другие. На текущем уровне технологического развития трехмерные баротропные и бароклинные гидродинамические модели (например, NEMO, Delft3D), благодаря эффективной работе в параллельном режиме могут с успехом заменить более упрощенные модели на основе уравнений мелкой воды. Процесс усвоения данных является неотъемлемой частью современных прогностических систем, т.к. позволяет снизить ошибки численного моделирования и поддерживать качество результатов на высоком уровне. Среди технологий усвоения данных, применяющихся в задаче прогнозирования наводнений в Санкт-Петербурге, стоит выделить усвоение данных в поле начального

приближения, усвоение данных в параметры модели (за счет динамической коррекции параметров модели) и усвоение в результаты прогнозирования (или динамическую корректировку прогноза на основе вероятностной модели).

Ввод в эксплуатацию КЗС позволил защитить Санкт-Петербург от наводнений, однако только разработка и использование математических методов моделирования и прогнозирования уровня моря позволили обеспечить безаварийную эксплуатацию защитных сооружений и оптимизировать их экономическую логику. Снижение риска затопления территорий до номинальных расчетных величин (10^{-5} , что соответствует повторяемости один раз в 10 000 лет), в свою очередь, породило новый виток развития городских пространств, особенно в центральной части Санкт-Петербурга. Ожидается, что в ближайшие годы это приведет к постепенному пересмотру существующих норм и правил проектирования и строительства зданий, сооружений и объектов инфраструктуры Санкт-Петербурга, а также позволит организовать использование прибрежных территорий в дельте Невы (а, возможно, и в самом КЗС) как рекреационных площадок для отдыха городского населения. Такие ожидания логично следуют из парадигмы так называемой «экстремальной урбанистики» как междисциплинарного направления, рассматривающего кардинальные изменения в развитии городской среды, обусловленные системными природными или антропогенными факторами. Но это — сюжет для совсем другой книги...

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов А.Е. Климатология экстраординарных невских наводнений и их прогнозирование. СПб: Гидрометеоиздат, 2001. 96 с.
2. Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В. Теория мелкой воды. Океанологические задачи и численные методы. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 207 с.
3. Гидрология устьевой области Невы / Под ред. С.С. Байдина. М.: Гидрометеоиздат, 1965. 375 с.
4. Гордеева С.М., Малинин В.Н. Изменчивость морского уровня Финского залива. СПб: Изд-во РГГМУ, 2014. 180 с.
5. Захарчук Е.А., Сухачев В.Н., Тихонова Н.А. Механизмы опасных подъемов уровня моря в Финском заливе. СПб: XXI век, 2017. 151 с.
6. Знаменский В.А. Невские наводнения: Причины и особенности. Способы защиты. Экология защиты. СПб: ВВМ, 2004. 96 с.
7. Лопатухин Л.И., Рубченя А.В. Введение в океанологию. Ч. 2. Динамика моря. СПб: Изд-во СПбГУ, 2014. 211 с.
8. Любимова О.Е., Кочуров Б.И. Моделирование штормовых наводнений в устьевых областях балтийских рек. М.: Инфра-М, 2017. 183 с.
9. Нежсиковский Р.А. Река Нева и Невская губа. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 190 с.
10. Победоносцев С.В. Уровень моря и вертикальные движения побережий Балтийского моря // Изменения уровня моря. М.: Изд-во МГУ, 1982. С. 294–305.
11. Полозов А.В. Морские ворота Петербурга. Защита от наводнений. СПб: Русская коллекция, 2012. 200 с.

12. *Померанец К.С.* Наводнения в Петербурге 1703–1997. СПб: Балтрус–бук, 1998. 169 с.
13. *Померанец К.С.* Три века Петербургских наводнений. СПб: Искусство–СПб, 2005. 213 с.
14. *Померанец К.С.* Несчастья невских берегов. Из истории петербургских наводнений. М.–СПб: Центрполиграф, 2009. 430 с.
15. *Пясковский Р.В.* Наводнения (их причины, физическая сущность, меры борьбы с ним). Л.: Знание, 1975. 34 с.
16. *Пясковский Р.В., Померанец К.С.* Наводнения (Математическая теория и предсказания). Л.: Гидрометеиздат, 1982. 175 с.
17. *Averkiev A.S., Klevanny K.A.* Determining cyclone trajectories and velocities leading to extreme sea level rises in the Gulf of Finland // Russian Meteorology and Hydrology. 2007. Vol. 32, N 8. P. 514–519.
18. *Beven K., Binley A.* The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction // Hydrological processes. 1992. Vol. 6, N 3. P. 279–298.
19. *Boukhanovsky A.V., Rozhkov V.A.* Neva floods with low frequency of occurrence // Russian Geographical Society Journal. 1999. Vol. 131, N. 3. P. 42–48.
20. *Boukhanovsky A.V. et al.* Stochastic simulation of inhomogeneous metocean fields. Pt. I: Annual variability // Computational Science–ICCS 2003. Berlin Heidelberg: Springer, 2003. P. 213–222.
21. *Bouttier F., Courtier P.* Data assimilation concepts and methods March 1999 // Meteorological training course lecture series. ECMWF. 2002.
22. *Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C.* Time series analysis: forecasting and control. John Wiley & Sons, 2013.

23. *Christian R.J.* Validation and intercomparison of different updating procedures for real-time forecasting // *Nordic Hydrology*. 1997. Vol. 28, N 2. P. 65–84.
24. *Cloke H.L., Pappenberger F.* Ensemble flood forecasting: a review // *Journal of Hydrology*. 2009. Vol. 375, N 3. P. 613–626.
25. *Clyde M., George E.I.* Model uncertainty // *Statistical science*. 2004. P. 81–94.
26. *Hólm E.V.* Lecture notes on assimilation algorithms // *ECMWF lecture notes*. 2003.
27. *Hoffman R.N., Kalnay E.* Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting // *Tellus A*. 1983. Vol. 35, N 2. P. 100–118.
28. *Hoffman F.O., Hammonds J.S.* Propagation of uncertainty in risk assessments: the need to distinguish between uncertainty due to lack of knowledge and uncertainty due to variability // *Risk Analysis*. 1994. Vol. 14, N 5. P. 707–712.
29. *Klevanny 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.
30. *Klevanny 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.
31. *Lionello P. et al.* A data assimilation procedure for operational prediction of storm surge in the northern Adriatic Sea // *Continental Shelf Research*. 2006. Vol. 26, Is. 4. P. 539–553.
32. *Liu Y., Gupta H.V.* Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data assimilation framework // *Water Resources Research*. 2007. Vol. 43, N 7.

33. *Makin V.K., Kudryavtsev V.N., Mastenbroek C.* Drag of the sea surface // *Boundary-Layer Meteorology*. 1995. Vol. 73, N 1–2. P. 159–182.
34. *Mourre B. et al.* Assimilation of sea level data over continental shelves: an ensemble method for the exploration of model errors due to uncertainties in bathymetry // *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 2004. Vol. 38, Is. 2. P. 93–121.
35. *Thiemann M. et al.* Bayesian recursive parameter estimation for hydrologic models // *Water Resources Research*. 2001. Vol. 37, N 10. P. 2521–2535.
36. *Van Griensven A., Meixner T.* Dealing with unidentifiable sources of uncertainty within environmental models // *Proceedings of the iEMSs International Congress*. 2004.
37. WMO. Simulated real-time intercomparison of hydrological models: WMO operational hydrology report no. 38, WMO no. 779. Geneva: World Meteorological Organization, 1992.

Электронные ресурсы

1. Комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга: <<http://www.dambaspb.ru/>>.
2. GFS: <<http://www.emc.ncep.noaa.gov/GFS/>>.
3. HIRLAM: <<http://www.hirlam.org/>>.
4. COSMO: <<http://www.cosmo-model.org/>>.
5. SWAN: <<http://swanmodel.sourceforge.net/>>.
6. Delft3D: <<https://oss.deltares.nl/web/delft3d>>.
7. NEMO: <<https://www.nemo-ocean.eu/>>.

Список диссертаций, раскрывающих современное состояние вопроса (с 2005 г.)

1. *Михайленко Р.Р.* Методы оценки состояния и защиты природно-технических систем для интегрированного управления водными ресурсами Санкт-Петербургского региона: Дис. канд. техн. наук. СПб: СЗТУ, 2005. 223 с.

2. *Мельников А.В.* Комплексная оценка воздействия защитных сооружений от наводнений на состояние окружающей среды Санкт-Петербурга: Дис. канд. техн. наук. СПб: СЗТУ, 2007. 136 с.
3. *Князьков К.В.* Технология разработки композитных приложений с использованием предметно-ориентированных программных модулей: Дис. канд. техн. наук. СПб: НИУ ИТМО, 2012. 170 с.
4. *Слесарева Л. С.* Развитие методов геомоделирования и оценки рисков в геосистемах природного характера (на примере наводнений): Дис. канд. техн. наук. СПб: РГГМУ, 2013. 144 с.
5. *Мостаманди С.* Моделирование полей ветра и давления для гидродинамического прогноза штормовых нагонов: Дис. физ.-мат. наук. СПб: РГГМУ, 2013. 113 с.
6. *Косухин С.С.* Методы и технологии распределенного вычислительного эксперимента для обеспечения защиты Санкт-Петербурга от наводнений: Дис. канд. техн. наук. СПб: НИУ ИТМО, 2013. 125 с.
7. *Калюжная А. В.* Методы и технологии управления неопределенностью прогностических моделей для обеспечения защиты Санкт-Петербурга от наводнений: Дис. канд. техн. наук. СПб: НИУ ИТМО, 2014. 132 с.
8. *Коровяковская А.Ю.* Разработка и исследование системы автоматизированного проектирования инфраструктуры города на основе анализа цифровой модели рельефа местности: Дис. канд. техн. наук. СПб: Университет ИТМО, 2015. 171 с.

НАВОДНЕНИЯ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ: ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОСТЬ

**Бухановский А.В., Калюжная А.В.,
Лопатухин Л.И., Померанец К.С.**

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49
Редактор Л.Г. Позднякова
Верстка: М.В. Герасимова
Подписано в печать 12.12.2016
Заказ № 3742
Тираж 100 экз.

Отпечатано в учреждении “Университетские телекоммуникации”
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

ISBN 978-5-7577-0550-7



9 785757 705507