

РЕФЕРАТ

Отчет 80 с., 73 рис., 5 табл., 37 источн.

БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ, САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, НЕВСКИЕ НАВОДНЕНИЯ, КОМПЛЕКС ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ, ДАМБА, СТОК НЕВЫ, ЧИСЛЕННОЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Объектом исследования являются: опасные подьёмы уровня в Невской губе Финского залива, формирующиеся во время работы комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС).

Основная цель работы – с помощью численных экспериментов с трёхмерной бароклинной гидродинамической моделью оценить изменения полей уровня в Невской губе при различных режимах работы КЗС, стока Невы с учетом и без учёта намывных территорий для разработки рекомендаций по развитию системы защиты Санкт-Петербурга от наводнений.

Для проведения численных экспериментов использовалась модель, разработанная на основе σ -модели морской и океанической циркуляции Института вычислительной математики (ИВМ РАН), получившей в международной практике название INMOM (Institute Numerical Mathematics Ocean Model).

Полученные рекомендации по развитию системы защиты Санкт-Петербурга от наводнений, могут быть использованы в работе Федерального казенного предприятия Дирекция комплекса защитных сооружений г. Санкт-Петербурга Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации.

Только для информационного использования
правообладатель: admspb@oceanography.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
1. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ	11
Батиметрия и маска области	12
Начальные и граничные условия для тестовых сценариев	18
Начальные и граничные условия для моделирования наводнений 1924 и 2015гг	24
Речной сток.....	24
Термохалинные условия	24
Уровень моря.....	24
Атмосферные характеристики	24
Условия численных экспериментов.	29
2. РЕЗУЛЬТАТЫ.....	34
2.1. Эксперименты 1-5.....	34
2.2. Эксперименты 6-9.....	45
2.3. Эксперименты 10-13	49
2.4. Эксперименты 14-17.....	55
2.5. Эксперименты 18 - 26.....	60
3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАБОТЕ КЗС	74
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	77
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	78

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие сокращения и обозначения:

ИВМ РАН - Институт вычислительной математики Российской академии наук

СЗ УГМС – Северо-западное управление гидрометслужбы

КЗС – комплекс защитных сооружений

СПУН - Система предупреждения угрозы наводнения

INMOM - Institute Numerical Mathematics Ocean Model

НКФ – Нуль Кронштадтского футштока

СКО – Средне квадратическое отклонение

ГМС - Гидрометеостанция

Только для информационного использования
правообладатель: admspb@oceanography.ru

ВВЕДЕНИЕ

Существующие представления о механизмах опасных подъёмов уровня моря, вызывающих наводнения в устье Невы, сложились ещё в середине прошлого века и до последнего времени практически оставались без изменений, так как считалось, что эти механизмы хорошо известны и подробно исследованы на эмпирическом и теоретическом уровнях. Их описанию посвящено большое количество научных, научно-популярных статей и монографий, подробный список которых можно найти в работах [1–5].

Несмотря на ввод в эксплуатацию в 2011 г. комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС), в рамках которого функционирует автоматизированная система предупреждения угрозы наводнений (СПУН), проблема опасных подъемов уровня остаётся насущной для районов Санкт-Петербурга, т.к. даже при закрытой дамбе иногда происходят опасные подъемы уровня.

Большую озабоченность ученых в последнее десятилетие вызывают возможные последствия для Балтики глобального повышения уровня Мирового океана. Результаты анализа спутниковой альтиметрической информации показывают, что средний рост уровня Мирового океана за период 1993 - 2021 гг. составляет 3,51 мм/год (<https://www.aviso.altimetry.fr/en/news> (дата обращения: 18.11.2024)). Оценки линейных трендов в изменениях уровня Балтийского моря, выполненные на основе анализа спутниковой альтиметрической информации за период 1993-2015 гг., свидетельствуют, что уровень в Балтике растёт быстрее, чем в Мировом океане: в среднем по акватории моря его рост составляет 4,0 мм/год, а для Финского залива - до 5,5 мм/год [6]. Прогностические оценки финских исследователей показывают, что в будущем на юге Финляндии эвстатическое повышение уровня моря превысит влияние противоположного процесса поднятия суши [7]. Группа американских исследователей, используя теорию экстремальных значений к имеющимся сведениям о темпах повышения уровня моря и наводнениях, спрогнозировала, что к 2050 году уровень моря вблизи большинства прибрежных территорий повысится на 10-20 см, а частота наводнений увеличится в 2 раза [8]. Эти неутешительные результаты заставляют ученых развивать исследования возможных сценариев опасных подъёмов уровня моря для разработки более точных их прогнозов и совершенствования работы защитных дамб.

Начиная с первых генеральных планов Санкт-Петербурга начала XVIII века, его развитие осуществлялось в соответствии с градостроительной концепцией создания новой морской столицы российского государства, предполагавшей в том числе освоение прибрежной акватории Восточной части Финского залива и формирование морского фасада города [9]. Существующий архитектурный облик приморской части Санкт-Петербурга оформился в том числе с учетом ее

подверженности опасным подъёмам уровня моря, которые неоднократно приводили к наводнениям.

Наводнениями в Санкт-Петербурге принято считать подъёмы уровня более 160 см, относительно нуля Кронштадтского футштока (НКФ), за который принимается среднее многолетнее положение водной поверхности Балтийского моря у гидрометеорологического поста Кронштадт на о. Котлин [10]. При таких подъёмах уровня моря воды р. Невы выходят из берегов, и в Санкт-Петербурге происходят подтопления городских территорий.

Причины наводнений в Невской губе – штормовые нагоны, которые представляют собой значительные подъёмы уровня моря в прибрежной зоне, вызываемые суммарным действием вращения Земли, анемобарических сил в глубоком циклоне и длинной волны, которая генерируется под прямым воздействием сил касательного трения ветра и горизонтального градиента атмосферного давления, или же в результате резонанса этих сил с собственными колебаниями морского бассейна [3,5,11–16].

Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), совместно с администрацией города, установлены три градации наводнений: опасные, с подъёмами уровня от 161 до 210 см над НКФ; особо опасные – от 211 до 299 см над НКФ, и катастрофические, с подъёмами уровня ≥ 300 см над НКФ [10].

За всю историю Санкт-Петербурга в городе произошло 310 наводнений, из которых 236 были опасными, 71 – особо опасными и 3 – катастрофическими [10,17]. Максимальный подъем уровня в устье Невы наблюдался во время катастрофического наводнения 19 (7) ноября 1824 г. и составил 421 см над НКФ.

Из 310 зарегистрированных наводнений 239, или 76%, произошли с сентября по декабрь, с января по март отмечено 45 наводнений (15%), весной и летом (апрель-август) – 26 случаев (9%) [10,17]. Такое распределение случаев наводнений в течение года объясняется сезонным изменением интенсивности циклонической деятельности в атмосфере, и, отчасти, развитием ледяного покрова.

За прошедшие три столетия были проведены масштабные инженерно-строительные работы по хозяйственному освоению приморских территорий, повышению отметок низинных заболоченных участков, их защите от затопления и подтопления.

В качестве примеров наиболее значимых проектов последней четверти XVIII – начала XIX столетий можно привести подсыпку юго-западной части Васильевского острова при размещении на ней промышленных предприятий, формирование архитектурного ансамбля Стрелки и парадных набережных Большой Невы.

Для середины XIX века было характерно создание специальных островов в целях организации складов и развития торговли: Масляный буян, Сельдяной буян (Гутуевский остров),

Сальный буян, Тучков буян. Наиболее значимым проектом конца XIX века явилось строительство Санкт-Петербургского порта в районе Гутуевского и Вольного островов.

Наиболее масштабные работы по освоению приморских низинных территорий и прилегающей акватории для размещения на них селитебных зон произошли в XX веке. Если в довоенный период генеральным планом Л.А. Ильина предусматривалось формирование приморского зеленого каркаса города в виде непрерывной линейной системы парков от п. Ольгино на северном побережье до п. Стрельна на южном берегу Невской губы, то в середине XX века градостроительная тенденция изменилась на развитие комплексной общественно-деловой застройки на этих землях.

Работы по намыву территорий развернулись в районе Лахты, на Васильевском острове, в Юго-Западной части города. В результате общая площадь искусственных земельных участков составила более 3000 гектаров, на которых разместились кварталы типовой многоэтажной многоквартирной застройки, Южно-Приморский парк Победы, Парк имени 300-летия Санкт-Петербурга [9].

Происходящие гидротехнические работы по созданию намывных территорий, архитектурно-строительное проектирование и эксплуатация объектов капитального строительства на них осуществляются в условиях современных изменений климата, одним из последствий которых является повышение среднего уровня Мирового океана.

Для предотвращения угроз, связанных с опасными подъемами уровня моря, в 1980 г. началось строительство комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС), которое продолжалось с перерывами до 2010 г. Официальное открытие КЗС состоялось 12 августа 2012 года.

КЗС расположен приблизительно в 25 км от Санкт-Петербурга и имеет протяжённость по акватории Невской губы 22,2 км (<https://dambaspb.ru> (дата обращения: 18.11.2024)). В состав КЗС входят 2 судопропускных и 6 водопропускных сооружений, а также 11 каменно-земляных дамб, 7 мостов и автодорожный тоннель под морским каналом (<https://dambaspb.ru> (дата обращения: 18.11.2024)).

После получения сигнала об угрозе наводнения затворы КЗС начинают закрываться, когда уровень моря около дамбы достигает 70-90 см. Закрытие затворов продолжается около одного часа. После закрытия затворов КЗС Невская губа представляет собой полностью замкнутый бассейн, положение урвенной поверхности которого определяется ветровыми условиями и стоком Невы. При отсутствии ветра, закрытая дамбой Невская губа равномерно заполняется водами Невы, и для среднего многолетнего стока Невы в 2500 м³/с скорость подъема уровня в Невской губе составляет 2,27 см/ч в то время, как под действием ветра западных румбов формируется уклон водной поверхности и скорость роста уровня на востоке Невской губы будет

превышать эти значения [21]. При длительном закрытии затворов КЗС и значительном повышении уровня в Невской губе скорость притока вод Невы будет уменьшаться из-за уменьшения градиента уровня между Ладожским озером и Невской губой [21].

По данным Дирекции комплекса защитных сооружений г. Санкт-Петербурга за период эксплуатации КЗС в городе было предотвращено 35 наводнений (<https://dambaspb.ru> (дата обращения: 18.11.2024)). Однако, несмотря на работу КЗС, проблема опасных подъемов уровня остаётся насущной для районов Санкт-Петербурга и Ленинградской области, расположенных к западу от КЗС. Здесь, во время штормовых нагонов, подвержены подтоплению прибрежные территории, размываются береговая линия, пляжи Курортного района Санкт-Петербурга, участки шоссейных дорог, наносится ущерб объектам хозяйственной деятельности, построенным в береговой полосе. Численные эксперименты на гидродинамической модели показали, что работа КЗС вызывает дополнительный подъём уровня к западу от него на до 10% [22].

Было отмечено, также, несколько случаев, когда при закрытых затворах КЗС во время предотвращения угрозы наводнений уровень моря в районе станции Горный институт поднимался выше отметки 160 см над НКФ, в результате чего в городе фиксировались опасные наводнения. Так, 16 ноября 2010 г. при закрытых затворах КЗС уровень моря на востоке Невской губы поднялся до отметки 184 см. 28 декабря 2011 г. несмотря на работу КЗС уровень моря у станции Горный институт поднялся до 169 см. И, наконец, 27 сентября 2018 г. подъём уровня при закрытых створах КЗС составил 179 см. И, хотя, при проектировании КЗС допускалось, что в редких случаях при закрытии КЗС до двух суток уровень в Невской губе может достигать 180 см, следует проверить возможные сценарии формирования особо опасных и катастрофических наводнений в Санкт-Петербурге в условиях работающего КЗС.

Завершение строительства в 2011 году Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений активизировало различные градостроительные планы по освоению акватории Невской губы и Финского залива. Действующим Генеральным планом Санкт-Петербурга предусмотрен намыв территорий в размере от 1250 до 1500 га.

К настоящему времени в Невской губе сформированы следующие территории: «Морской фасад» (Васильевский остров) (238 га); порт Бронка (г. Ломоносов) (120 га); станция метро «Зенит» (Крестовский остров) (20 га). В Невской дельте произведено расширение Пироговской набережной (2 га), Приморского проспекта (1 га), строительство моста Бетанкура через р. Малую Неву в районе острова Серный (0,2 га). Практически завершён намыв второй очереди «Морской фасад» (вторая очередь освоения) (Васильевский остров) (238 га), запланирован «Северный парус» (Кронштадт) (236 га), в Финском заливе – «Новый берег» (г. Сестрорецк) (370 га) [23].

В связи с этим для принятия обоснованных проектных решений представляется необходимым проведение оценки влияния намывных территорий на формирование опасных подъёмов уровня в Невской губе при закрытых затворах КЗС.

В данном отчете представлены результаты моделирования полученные в рамках выполнения темы за период с 2020 по 2024г:

- Эксперименты с постоянным ветром, и закрытой дамбой, а также различными расходами р. Невы
- Эксперименты с проходящими циклонами разной глубины и скорости прохождения, а также различными расходами р. Невы.
- Эксперименты по воспроизведению наводнения в 1924г
- Эксперименты по воспроизведению наводнения в декабре 2015г с наличием/отсутствием намывных территорий, а также различными расходами р. Невы

Только для информационного использования
правообладатель: admspb@oceanography.ru

1. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Для моделирования опасных подъёмов уровня моря на востоке Финского залива Балтийского моря была выбрана трехмерная нелинейная бароклинная модель INMOM (Institute Numerical Mathematics Ocean Model). Эта модель была разработана в Институте вычислительной математики Российской Академии Наук [24–26].

В основе INMOM лежит полная система нелинейных примитивных уравнений гидродинамики океана в сферических координатах в приближениях гидростатики и Буссинеска. В качестве вертикальной координаты используется безразмерная величина $\sigma = (z - \zeta) / (H - \zeta)$, где z – обычная вертикальная координата; $\zeta = \zeta(\lambda, \varphi, t)$ – отклонение уровня моря от невозмущенной поверхности как функция долготы λ , широты φ и времени t ; $H = H(\lambda, \varphi)$ – глубина моря. Прогностическими переменными модели служат горизонтальные компоненты вектора скорости, потенциальная температура, соленость, отклонение уровня океана от невозмущенной поверхности. Для расчета плотности используется уравнение состояния, учитывающее сжимаемость морской воды и специально предназначенное для численных моделей [27].

В INMOM включена модель термодинамики морского льда, состоящая из 3-х модулей. Модуль термодинамики [28] описывает намерзание льда, выпадение снега с дальнейшим превращением его в лед, а также их таяние за счёт тепловых процессов. Модуль динамики льда рассчитывает скорость его дрейфа, которая изменяется за счёт воздействия ветра, поверхностных течений океана, суточного вращения Земли, наклона уровенной поверхности океана и взаимодействия льдин друг с другом, описываемого упруго-вязко-пластичной реологией [29]. Модуль переноса льда служит для расчёта эволюции ледяного и снежного покровов вследствие дрейфа, для чего используется монотонная схема переноса [30], обеспечивающая неотрицательность концентраций и массы снега и льда.

Реализация INMOM для условий Невской губы проводилась на сеточной области с переменным шагом и полюсом в Санкт-Петербурге (Рисунок 1 Рисунок). Для модели создавалась расчетная область таким образом, что в районе Невской губы шаг по пространству составил около 100-150 м, а на юго-западе Балтийского моря около 6 км, что позволило при расчете обойти проблемы вложенных сеток. По вертикали задавалось 20 неравномерно распределённых по глубине σ -уровней.

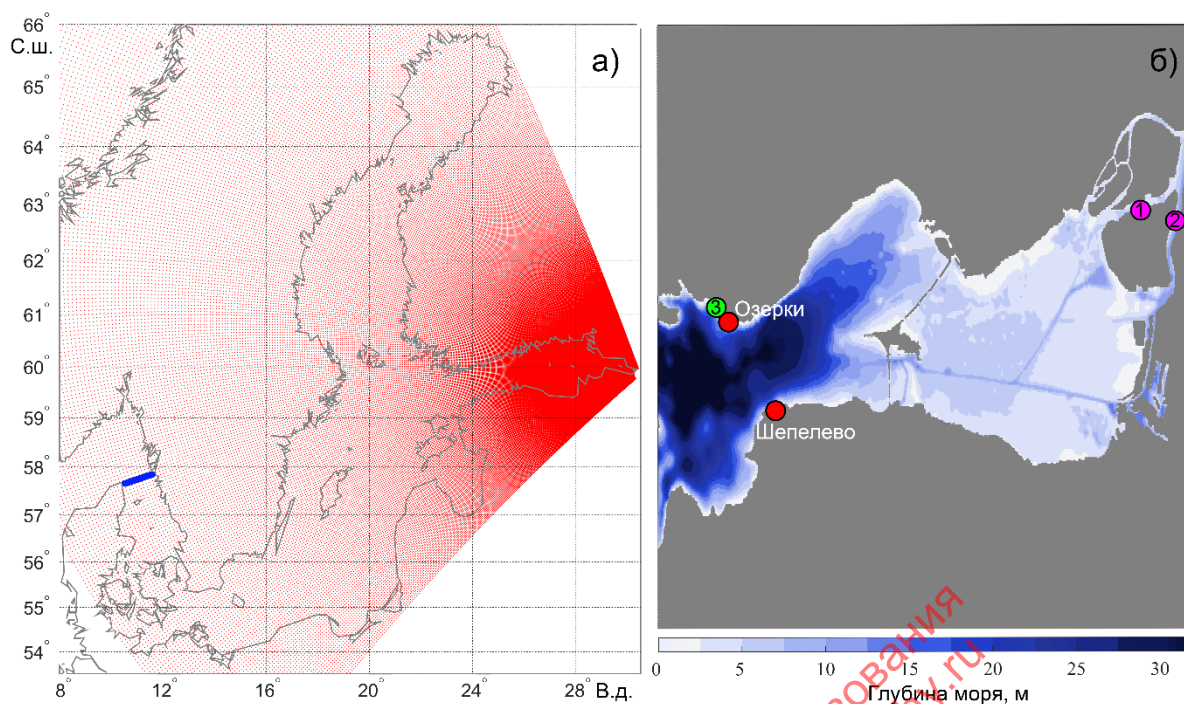


Рисунок 1 - Криволинейная сетка гидродинамической модели Балтийского моря с полюсом в Санкт-Петербурге, синей линией в Каттегате обозначена жидкая граница (а). Укрупнённый район модельной области восточной части Финского залива с Невской губой и дельтой Невы. Красной линией показана жидкая граница, где задавался речной сток Невы (б). Зелёный кружок с номером 3 обозначает ближайшую к станции Озерки точку сеточной области реанализа ERA-5. Цифрами 1 и 2 отмечены районы дельты Невы, где по результатам моделирования оценивались изменения во времени дополнительных подъёмов уровня воды, вызванные намывами территорий.

Батиметрия и маска области

Данные батиметрия формировались в узлах расчетной области. Данные, которые использовались для создания батиметрии расчетной области, были предоставлены СЗ УГМС, с разрешением 500 м.

Также в ходе работы в течении нескольких лет глубины и форма береговой линии постоянно уточнялись. Для уточнения глубин были использованы навигационные карты (Рисунок 2)

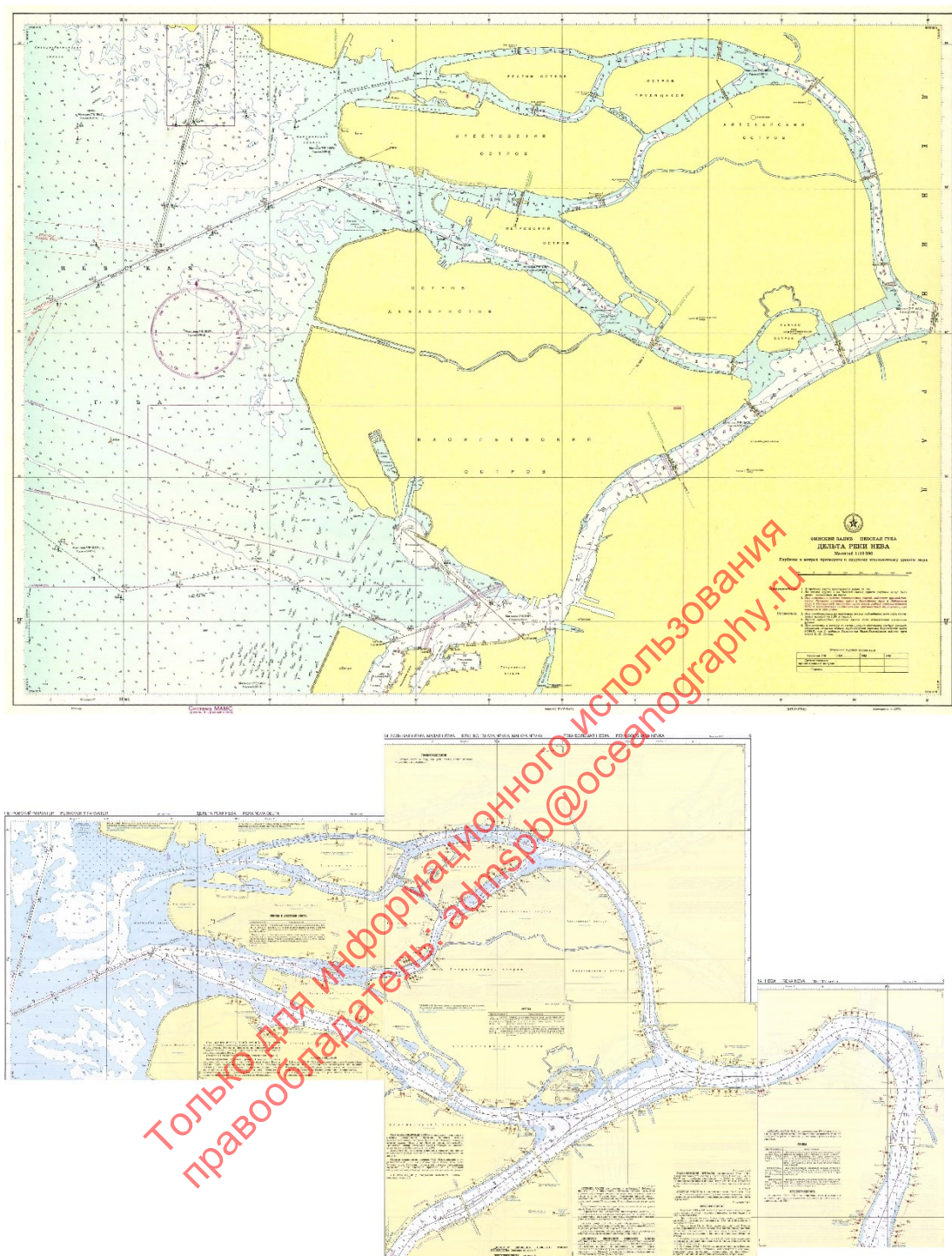


Рисунок 2 - Навигационные карты Невской губы.

После создания расчетной области была сделана маска суша/море (Рисунок 3). Маска суша/море использовалась в двух вариантах: а) настоящее состояние береговой линии и б) будущая береговая линия с учетом намыва.

Маску настоящего состояния береговой линии пришлось создавать не только учитывая батиметрию, но и руководствуясь данными об инфраструктуре города (Рисунок 4 - Рисунок 7). На основании цифрового массива, предоставленного научно-исследовательским и проектным центром Генерального плана Санкт-Петербурга, были созданы маски береговых линий

суша/море в двух вариантах (Рисунок 3), один из которых описывал состояние береговой линии до современных намывов территорий, соответствующее 1966 г. (Рисунок 3а), и береговую линию в настоящий момент времени (Рисунок 3б). Рисунок (Рисунок 3в) демонстрирует намытые за последние 57 лет территории. Хорошо видно, что наибольшие по площади намывы произведены на западе Васильевского о-ва (Рисунок 3в). Значительно меньшие по площади намывы территорий произведены на западе Крестовского о-ва (метро «Зенит»), в районе Приморского проспекта и в Малой Неве, у моста Бетанкура (Рисунок 3в).

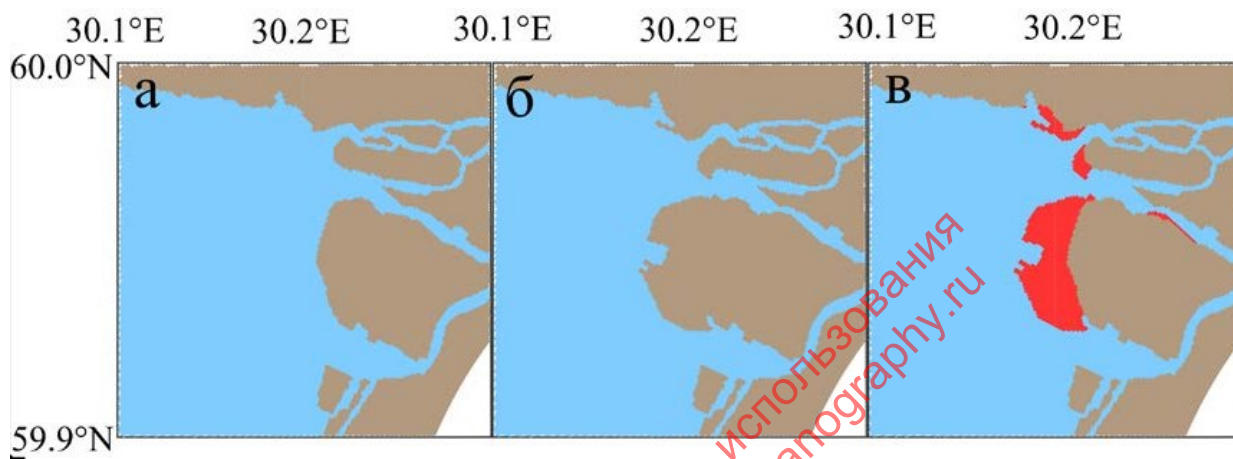


Рисунок 3 - Маски сеточной области без учета намывных территорий (а), с учетом намывных территорий (б) и их разница (в).



Рисунок 4 - Конфигурация береговой линии в районе Васильевского, Петровского и Петроградского островов Санкт-Петербурга.

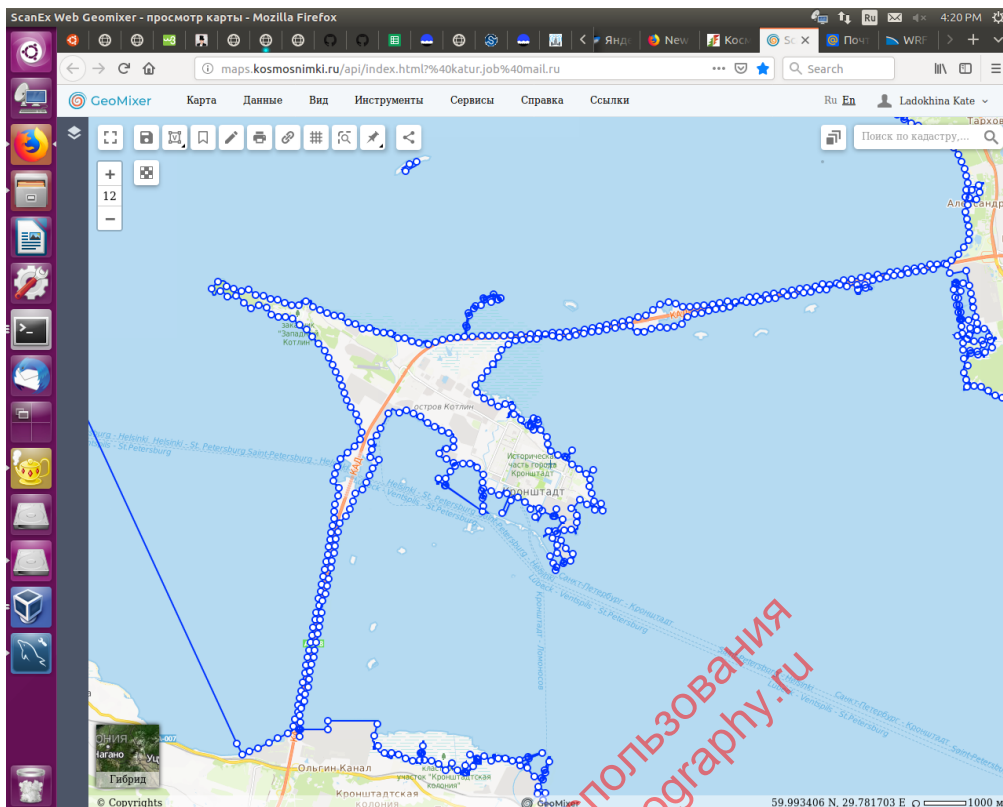


Рисунок 5 - Конфигурация береговой линии в районе Кронштадта и Дамбы.

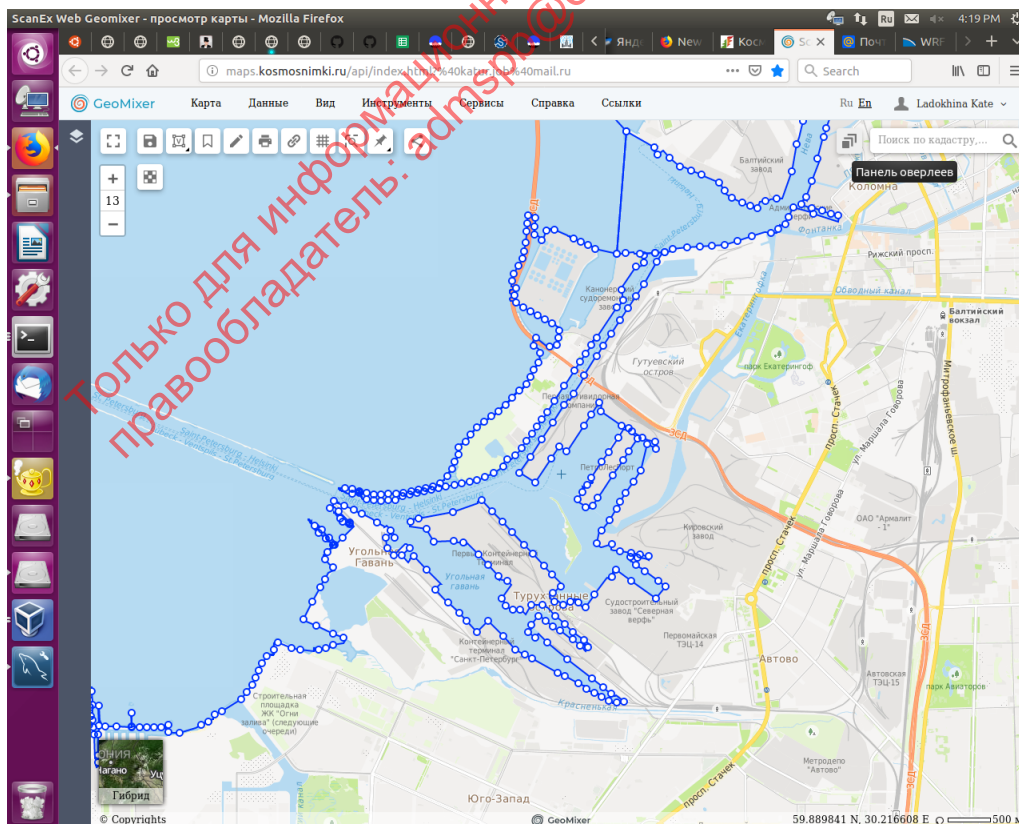


Рисунок 6 - Конфигурация береговой линии в районе порта.

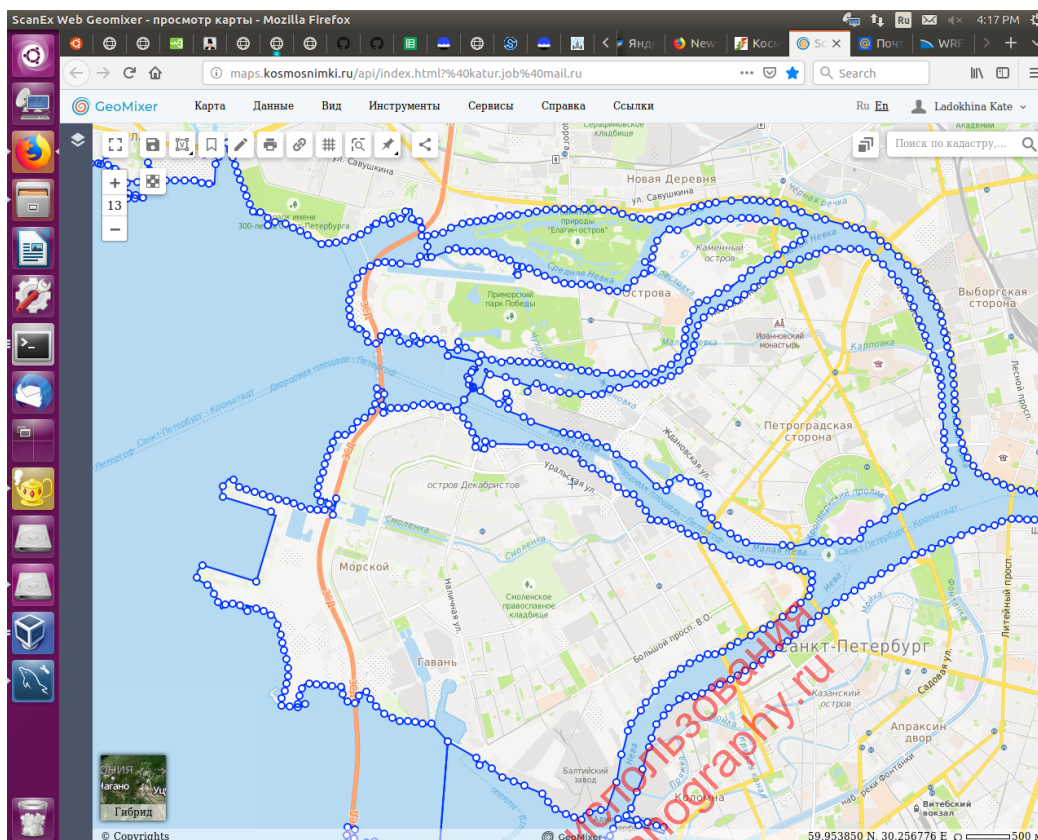


Рисунок 7 - Конфигурация береговой линии в районе Васильевского острова и Петроградской стороны.

В данном отчете представлены результаты моделирования тестовых сценариев при задании постоянного ветра, проходящих циклонов, вариаций граничных условий на жидкой границе, а также расчетов реальных наводненческих ситуаций 1924 и 2015 гг. Начальные и граничные условия для этих расчетов подготавливались отдельно.

Для проведения численных экспериментов, целью которых было оценить изменения гидрологических условий в Невской губе в условиях закрытой дамбы и экстремально высокого стока Невы, использовались следующие сценарии.

1. Береговая линия без намыва, расход Невы $4170 \text{ м}^3/\text{с}$, ветер юго-западный 11 м/с
2. Береговая линия без намыва, расход Невы $4170 \text{ м}^3/\text{с}$, ветер юго-западный 15 м/с
3. Береговая линия с намывом, расход Невы $4170 \text{ м}^3/\text{с}$, ветер юго-западный 11 м/с
4. Береговая линия с намывом, расход Невы $4170 \text{ м}^3/\text{с}$, ветер юго-западный 15 м/с
5. Береговая линия без намыва, расход Невы $2500 \text{ м}^3/\text{с}$, ветер с 00:00 часов начала счета до 18:00 часов первых суток – юго-западный 11 м/с , затем в течение 6 часов с 18:00 часов до 24:00 часов первых суток линейно увеличивается до 25 м/с и с 24:00 часов первых суток до конца счета, составляет 25 м/с .
6. Наводнение 1924г, береговая линия без намыва, речной сток 1924г, реанализ в качестве форсинга.

7. Наводнение 1924г, береговая линия без намыва, речной сток 1924г, реанализ в качестве форсинга, ветер расчетный с максимумом 22.7 м/с
8. Наводнение 1924г, береговая линия без намыва, речной сток 1924г, реанализ в качестве форсинга, ветер расчетный с максимумом 25,5 м/с
9. Наводнение 1924г, береговая линия без намыва, речной сток 1924г, реанализ в качестве форсинга, ветер расчетный с максимумом 28 м/с
10. Наводнение 2015г, береговая линия без намыва, максимальный расход Невы в осенне-зимний период (4080 м³/с)
11. Наводнение 2015г, береговая линия с намывом, максимальный расход Невы в осенне-зимний период (4080 м³/с)
12. Наводнение 2015г, береговая линия без намыва, средний расход Невы за 2015 г. (2000 м³/с)
13. Наводнение 2015г, береговая линия с намывом, средний расход Невы за 2015 г. (2000 м³/с)
14. Береговая линия с намывом, расход Невы 3000 м³/с, скорость и направление ветра 14 м/с, западный.
15. Береговая линия с намывом, расход Невы 3000 м³/с, скорость и направление ветра 16 м/с, западный.
16. Береговая линия с намывом, расход Невы 4250 м³/с, скорость и направление ветра 16 м/с, западный.
17. Береговая линия с намывом, расход Невы 3000 м³/с, скорость и направление ветра 16 м/с, юго-западный.
18. Береговая линия с намывом, расход Невы 3000 м³/с, скорость циклона 5 м/с, максимальная скорость ветра 16 м/с.
19. Береговая линия с намывом, расход Невы 3000 м³/с, скорость циклона 11 м/с, максимальная скорость ветра 16 м/с.
20. Береговая линия с намывом, расход Невы 3000 м³/с, скорость циклона 15 м/с, максимальная скорость ветра 16 м/с.
21. Береговая линия с намывом, расход Невы 3000 м³/с, скорость циклона 5 м/с, максимальная скорость ветра 22 м/с.
22. Береговая линия с намывом, расход Невы 3000 м³/с, скорость циклона 11 м/с, максимальная скорость ветра 22 м/с.
23. Береговая линия с намывом, расход Невы 3000 м³/с, скорость циклона 15 м/с, максимальная скорость ветра 22 м/с.

24. Береговая линия с намывом, расход Невы 4250 м³/с, скорость циклона 5 м/с, максимальная скорость ветра 22 м/с.

25. Береговая линия с намывом, расход Невы 4250 м³/с, скорость циклона 11 м/с, максимальная скорость ветра 22 м/с.

26. Береговая линия с намывом, расход Невы 4250 м³/с, скорость циклона 15 м/с, максимальная скорость ветра 22 м/с.

Начальные и граничные условия для тестовых сценариев

В качестве стока рек использовались климатические среднемесячные данные расходов воды для 28 рек Балтийского моря за исключением р. Невы.

Для подготовки граничных условий для значения стока Невы, использовались архивные данные о расходах Невы в п. Новосаратовка с 1945 по 2018 гг (Рисунок 8).

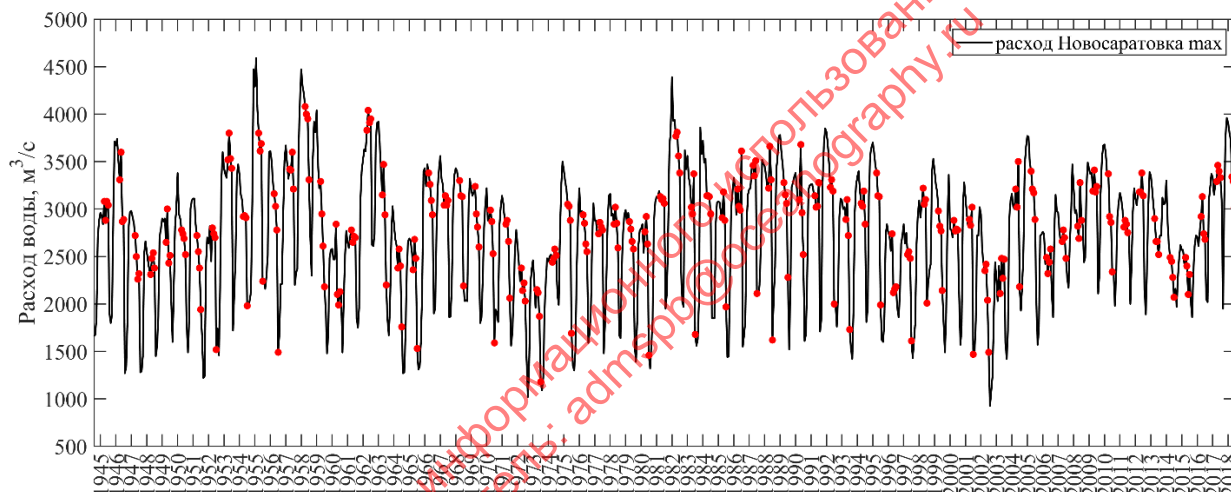


Рисунок 8 - Максимальные месячные расходы реки Невы в п. Новосаратовка с 1945 по 2018гг. Красными точками обозначены осенне-зимние месяцы.

Анализ показал, что наибольший средний расход Невы в осенне-зимний период составил 4080 м³/с, максимальный 4170 м³/с. В работе численные эксперименты на гидродинамической модели будут проводиться в нескольких вариантах: с учетом среднемесячного расхода Невы за 2015 год (см. вариант 1, Таблица 1), а также при максимальном среднем расходе Невы за осенне-зимний период в декабре (см. вариант 2, Таблица 1), а также при максимальном расходе Невы в 4170 м³/с и среднем расходе р.Нева 2500 м³/с.

Таблица 1 - Используемые в экспериментах значения среднего расхода воды р. Нева за каждый месяц, м³/с

Месяц	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сен.	Окт.	Ноя.	Дек.
Расход воды, м ³ /с	730	1760	2030	2250	2460	2450	2340	2260	2170	2080	1940	2000 (1 вариант) или 4080 (2 вариант)

Также дополнительно был проведен статистический анализ стока р. Невы за весь период наблюдений, в осенне-зимние месяцы, когда происходит наибольшее количество штормовых нагонов и в даты, когда наблюдались наводнения в Санкт-Петербурге (Рисунок 9, Таблица 2).

Согласно проведенному статистическому анализу в большинстве случаев наводнения происходят при расходах Невы около 3000 м³/с, а в 1% случаев всех наводнений, расход составляет не менее 4250 м³/с. Эти цифры будут использоваться при задании речного стока в некоторых численных экспериментах.

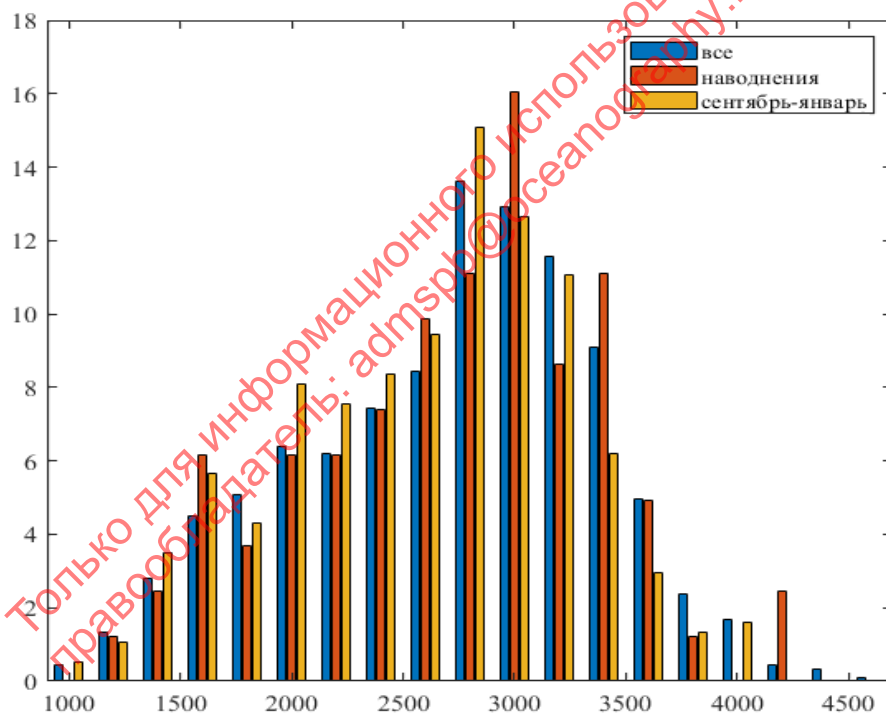


Рисунок 9 - Гистограмма расхода р. Невы в разные периоды. Синий цвет – все время наблюдений, красный – в период наводнений в Санкт-Петербурге, оранжевый – в осенне – зимний период.

Таблица 2 - Обеспеченность расхода Невы в разные периоды

	50	75	95	99
Все время	2820	3190	3701	4065
В период наводнений	2810	3175	3650	4249
Осень-зима	2720	3090	3562	3950

Итого по речному стоку, для проведенных экспериментов использовались следующие расходы р. Нева:

- 4170 и 2500 м³/с
- 4080 и 2000 м³/с
- 4250 и 3000 м³/с

Расход рек, как граничное условие, вносит свой вклад в распределение солёности района, куда впадает река, а также оказывает влияние на уровень моря, за счет объема воды, который попадает из реки в море. Для запуска модели Невской губы с учетом речного стока, был модернизирован блок учета речного стока, с учетом экстремальных значений, превышающих 4000 м³/с. Так как, такой объем речного стока в одной ячейке без огромных градиентов уровня невозможно воспроизвести, была созданная подпрограмма, распределяющая равномерно, сток реки, по некоторому заданному количеству ячеек сеточной области, что привело к более стабильно работающей модели. После чего было проведено несколько тестовых запусков модели, и в ходе отладки была настроена стабильная версия, которая может адекватно воспроизводить экстремальный сток Невы в период штормовых нагонов.

В качестве начальных условий использовались среднемесячные данные температуры и солёности воды за 2014г или 2015г с вертикальным разрешением 5 м и пространственным разрешением 3.7 или 5.6 км, полученные из системы «Copernicus Marine environment monitoring service» (<http://marine.copernicus.eu> (дата обращения: 18.11.2024)) (Рисунок 10 и Рисунок 11).

На жидкой границе в проливе Каттегат вдоль 57°44' с.ш. в буферной зоне, представляющей собой полосу шириной 15 км, значения температуры и солёности принимались равными месячным средним значениям 2014 или 2015г.

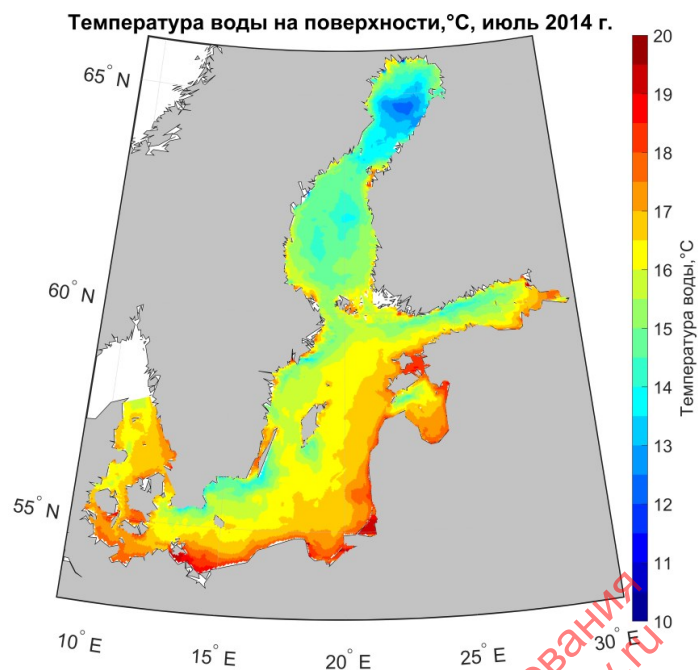


Рисунок 10 - Температура воды на поверхности в июле 2014 г., °C.

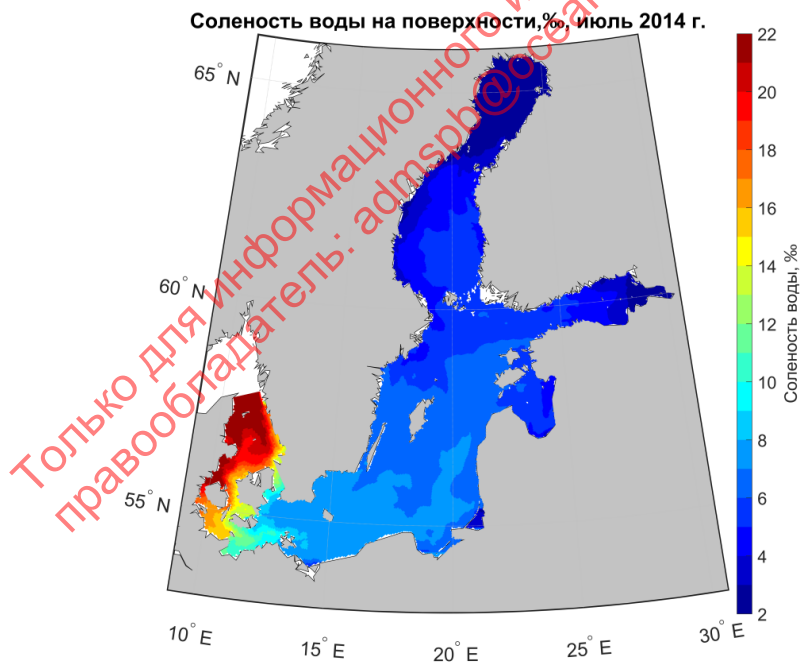


Рисунок 11 - Соленость воды на поверхности в июле 2014 г., ‰.

На твердых участках боковой границы потоки тепла и соли были заданы равными нулю, а для скорости течений использованы условия непротекания и свободного скольжения. На дне были заданы условия непротекания и квадратичного придонного трения.

В качестве форсинга в расчетах по тестовым сценариям использовался постоянный ветер западного или юго-западного направлений с максимальными скоростями от 11 до 25 м/с, влияние атмосферного давления было отключено. Данные о скоростях ветра были взяты из литературных

источников, а также из результатов предварительно проведенного статистического анализа. Для оценки значений ветра в период наводнения были выбраны даты и время всех наводненческих ситуаций с 1940 г по настоящее время. На эти даты, а также на время предшествующее наводнению с заблаговременностью 6 часов были выбраны значения ветра по реанализу ERA5 над Финским заливом. Статистический анализ ветра представлен в таблице (Таблица 3) и на рисунке (Рисунок 12).

Таблица 3 - Двумерная плотность ветра в период 6 часов до наступления наводнения в Санкт-Петербурге.

Градации м/с	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	Плотность	Обеспеч.%
0 -2.5					0,2	0,1			0,2	100
2.5 -5					0,3	0,1	0,1		0,4	99,8
5 -7.5		0,6	0,1		0,4	0,7	0,3	0,2	2,2	99,3
7.5 -10		0,06		0,1	1,1	0,6	0,8	0,5	3,1	97,1
10 -12.5	0,4			0,2241	0,3	1,9	3,4	2,2	8,5	94,0
12.5 -15	0,6				1,4	8,0	11,3	4,1	25,4	85,5
15 -17.5	0,1				0,9	11,7	18,7	5,2	36,5	60,1
17.5 -20	0,1			0,056	0,112	5,7	8,6	2,2	16,8	23,6
20 -22.5						1,5	4,1	0,6	6,2	6,8
22.5 -25						0,1	0,3	0,2	0,6	0,6
Плотность, %	1,1	0,6	0,1	0,4	4,6	30,3	47,7	15,2	100	
Среднее	13,4	6,5	7,0	10,5	11,4	15,6	16,0	15,1	15,4	
Максимум	19,1	7,5	7,0	17,8	18,3	22,6	23,6	23,1	23,6	

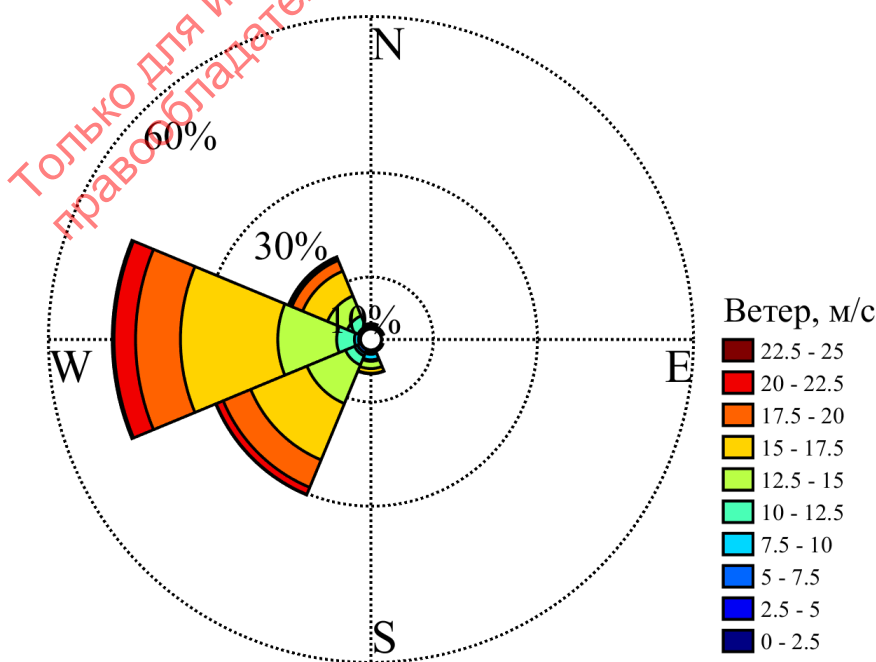


Рисунок 12 - Роза ветра в диапазоне 6 часов до наступления наводнения в Санкт-Петербурге.

Таким образом, для проведения численных экспериментов на модели INMOM, с целью проверить влияние силы и направления ветра на уровенный режим в акватории невской губы, были выбраны следующие ветра: ветра западных направлений 11, 14, 15,16, 22 м/с.

Также в качестве форсинга в некоторых расчетных сценариях использовались сгенерированные циклоны (Рисунок 13), проходящие над Балтийским морем. Скорости прохождения циклонов варьировались от 5 до 15 м/с, а скорости ветра внутри циклонов достигали 5-22 м/с. В данных расчетах влияние ветра и градиента атмосферного давления в модели учитывалось совместно.

Расчет проходящего циклона проводился по методике, описанной в работе [12]:

$$P_a = P_\infty - \frac{\Delta P}{\sqrt{1 + (r/r_t)^2}} \quad (1)$$

где P_a – атмосферное давление на изобаре с радиусом r , P_∞ -давление на достаточном удалении от центра, r_t – радиус, где скорость ветра максимальна, ΔP – разность давления в центре циклона и на изобаре, где $P=P_\infty$.

Скорость ветра рассчитывалась по формуле [12]:

$$\begin{aligned} W_x &= -\frac{K}{\rho_a f} \left[\frac{\partial P_a}{\partial y} \cos \beta + \frac{\partial P_a}{\partial x} \sin \beta \right] \\ W_y &= \frac{K}{\rho_a f} \left[\frac{\partial P_a}{\partial x} \cos \beta - \frac{\partial P_a}{\partial y} \sin \beta \right] \end{aligned} \quad (2)$$

где K – масштабирующий коэффициент (0.6-1.0), P_a – атмосферное давление, ρ_a – плотность воздуха, f – параметр Кориолиса, β – угол отклонения ветра от изобар (15°).

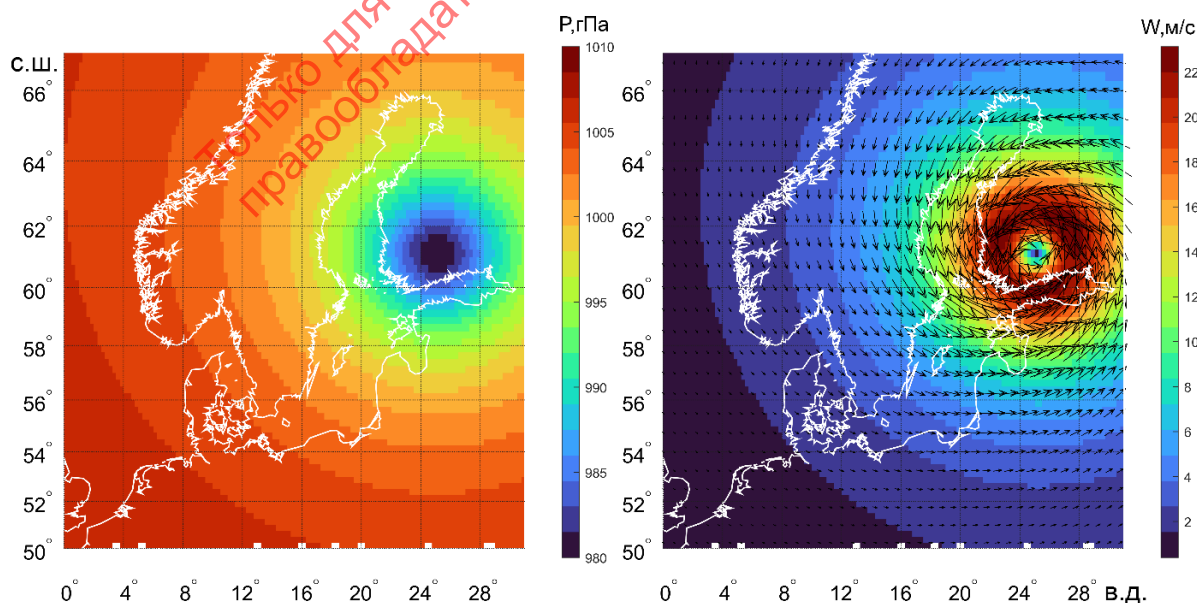


Рисунок 13 - Прохождение сгенерированного циклона над акваторией Балтийского моря.

Начальные и граничные условия для моделирования наводнений 1924 и 2015гг

Речной сток

Для задания речного стока при моделировании 1924г. использовались расходы р. Невы за 1924 год (Рисунок 14) [31] и средне климатические расходы других рек Балтийского моря. При моделировании наводнения 2015 г (Таблица 1) использовались среднемесячные расходы Невы за 2015г, а в декабре использовалось несколько вариантов (2000 и 4080 м³/с)

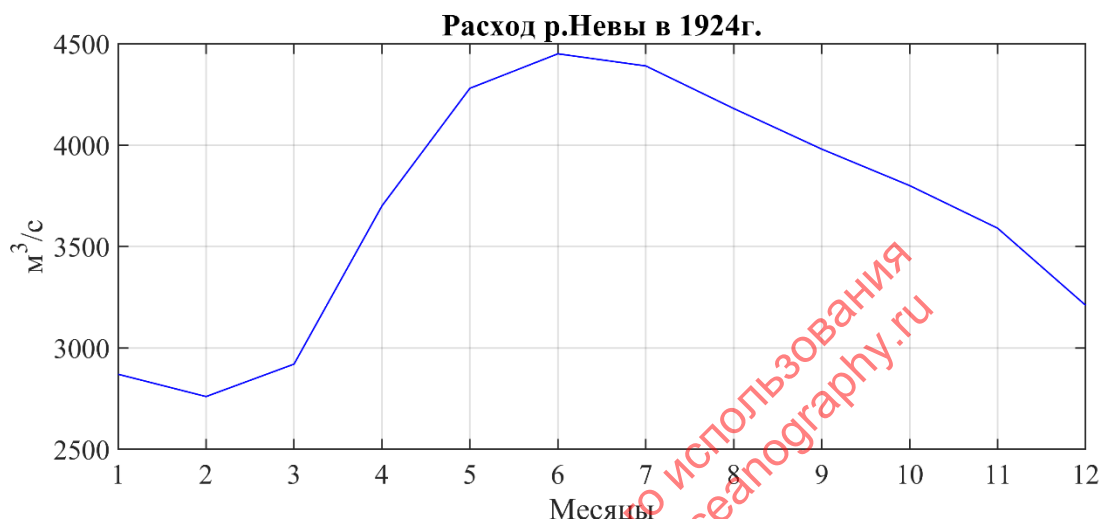


Рисунок 14 - Среднемесячный расход р.Невы в 1924г.

Термохалинные условия

В качестве начальных условий использовались среднемесячные данные температуры и солености воды с вертикальным разрешением 5 м и пространственным разрешением 3.7 или 5.6 км, полученные из системы «Copernicus Marine environment monitoring service» (<http://marine.copernicus.eu> (дата обращения: 18.11.2024)). Для моделирования наводнения 1924 г использовались данные за 2009 г, т.к. морского реанализа Балтийского моря на 1924 г не существует, а начальные условия для 2009 года являются среднестатистическими. Для моделирования наводнения 2015 г использовались данные за 2015г.

Уровень моря

На жидкой границе расчетной области были заданы ежечасные значения уровня моря, полученные со станций Смоген при моделировании наводнения 1924г. и Смоген и Гетеборг для наводнения 2015г. Данные инструментальных измерений уровня моря интерполировались в точки сетки буферной зоны вдоль всей жидкой границы. Для скорости течений здесь применялось условие протекания.

Атмосферные характеристики

Для проведения численных экспериментов по моделированию катастрофического наводнения 1924 г. были подготовлены поля метеорологических характеристик с

пространственным разрешением 0.125 градуса и временной дискретностью 3 часа для региона Балтийского моря за период с 1 января 1924 года по 31 декабря 1924 для задания граничных условий на поверхности моря.

Для подготовки метеорологических данных в качестве форсинга, сравнивались несколько реанализов: европейские – CERA20C (<https://apps.ecmwf.int/datasets/> (дата обращения: 18.11.2024)), ERA20C, ERA20CM и американский NCEP/DOE Reanalysis II, 20th Century Reanalysis (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html> (дата обращения: 18.11.2024)), а также данные синоптических карт на дату наводнения (Рисунок 15 и Рисунок 16).

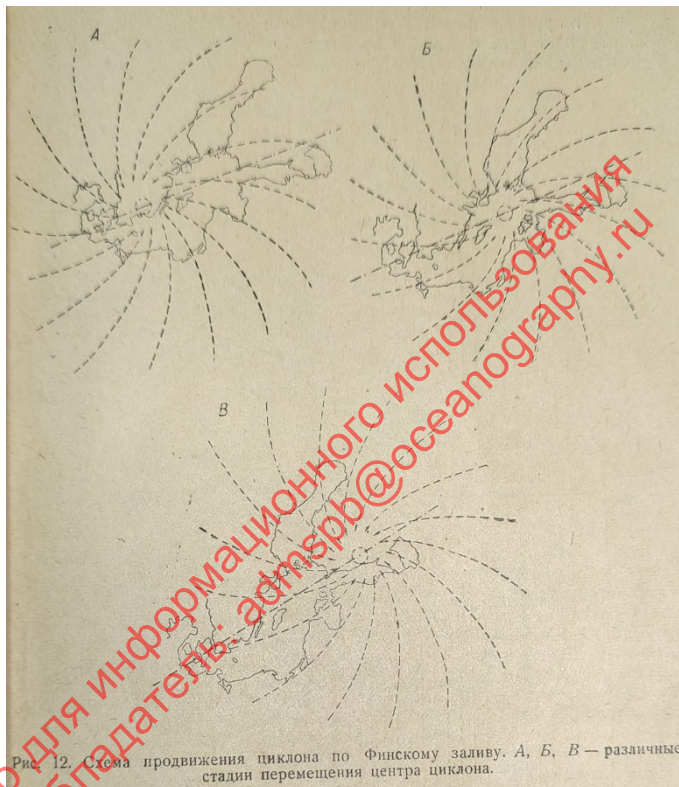


Рис. 12. Схема продвижения циклона по Финскому заливу. А, Б, В – различные стадии перемещения центра циклона.

Рисунок 15 - Схема продвижения циклона по [1] 23 сентября 1924г.

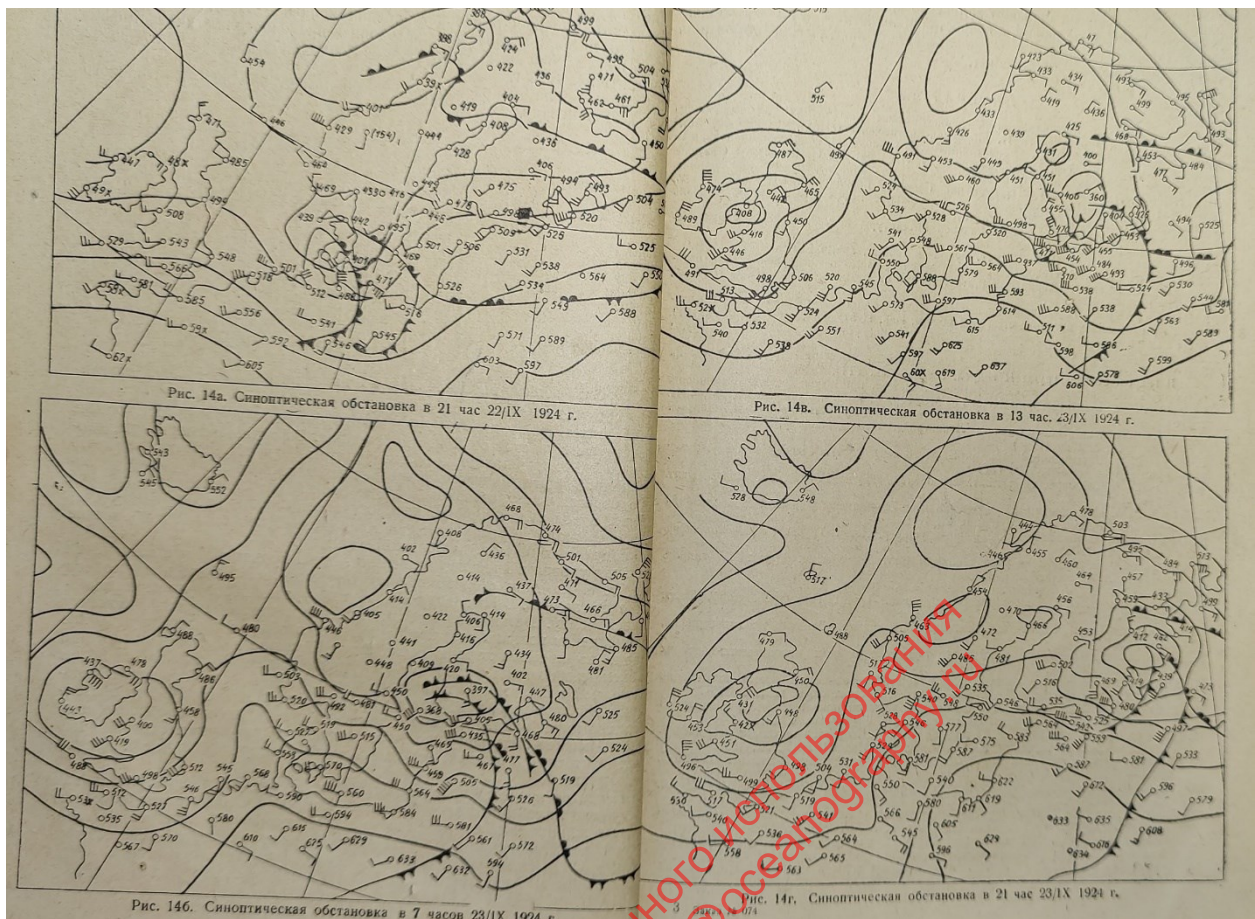


Рисунок 16 - Синоптическая обстановка на 22-23 сентября 1924г. [1]

При сравнении данных об атмосферном давлении (Рисунок 17) и ветре различных реанализов и синоптических карт было решено использовать данные реанализа CERA20C, так как этот реанализ наиболее точно согласуется с данными синоптических карт (Рисунок 15 и Рисунок 16). Американский реанализ NCEP/DOE по значениям ветра и атмосферного давления был близок к значениям реанализа CERA20C, но его пространственное разрешение оказалось очень грубым (1.8°, против 0.125° у CERA20C).

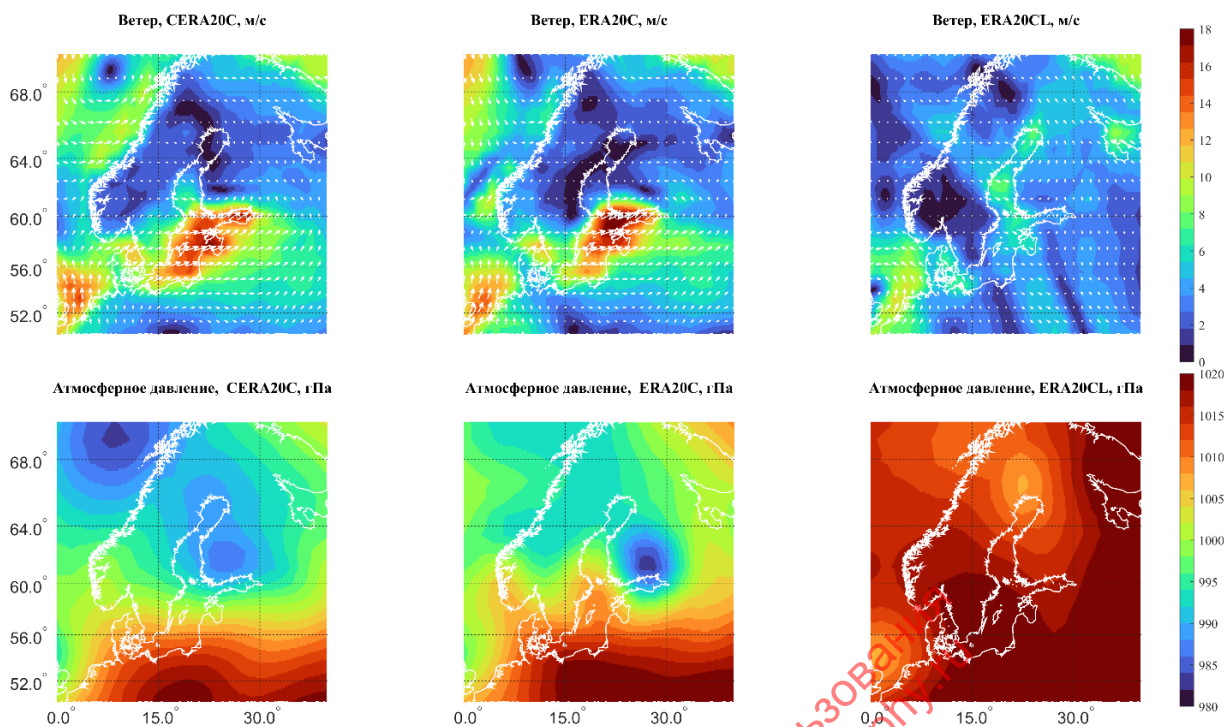


Рисунок 17 - Сравнение полей ветра и атмосферного давления 23 сентября на 12:00 по московскому времени, построенных по данным различных европейских реанализов. CERA20C - слева, ERA20C – в центре, ERA20CL – справа. Ветер – вверху, атмосферное давление -внизу.

При этом характеристики радиационных потоков, осадков, толщины снега, были взяты из реанализа ERA20CL (Рисунок 18), так как в реанализе CERA20C эта информация отсутствовала, а в CERA20C детализация информации значительно уступала ERA20CL. Данные о ледовых условиях и поверхностной температуры воды были взяты из ERA20C по причине их наилучшего соответствия фактическим данным. Сформированный из трех реанализов метеорологический форсинг, с пространственным разрешением 0.125x0.125 градуса и временным шагом 3 часа, в дальнейшем использовался для нескольких численных экспериментов.

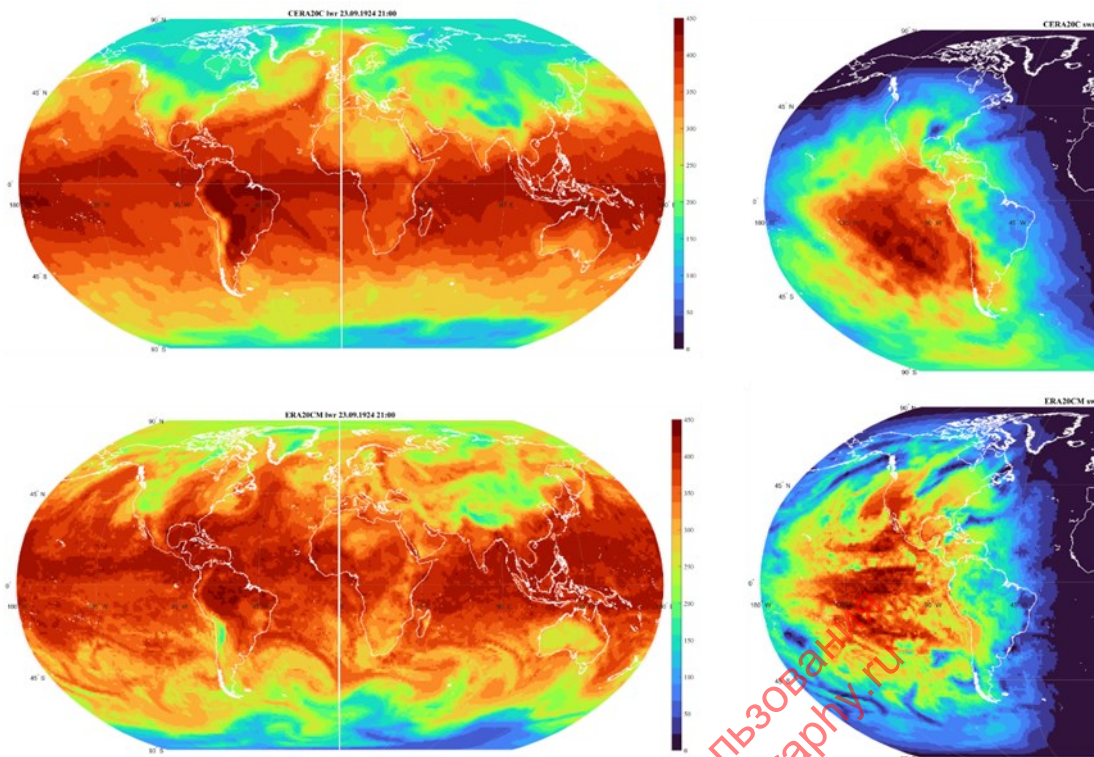


Рисунок 18 - Длинноволновая (слева) и коротковолновая (справа) радиация по реанализам: CERA20C – верх, ERA20CM- низ, 23 сентября 21:00 по московскому времени.

Так как значения скорости ветра в реанализе оказались достаточно сильно занижены по сравнению с фактическими, были рассчитаны также поля ветра по градиенту атмосферного давления с различными коэффициентами и учетом маски суша/море. Коэффициенты подбирались с учетом согласия полей ветра с данными синоптической карты (Рисунок 16)

$$\begin{aligned}
 W_x &= -\frac{K}{\rho_a f} \left[\frac{\partial P_a}{\partial y} \cos \beta + \frac{\partial P_a}{\partial x} \sin \beta \right] \cdot M; \\
 W_y &= \frac{K}{\rho_a f} \left[\frac{\partial P_a}{\partial x} \cos \beta - \frac{\partial P_a}{\partial y} \sin \beta \right] \cdot M
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

где, K – масштабирующий коэффициент (0.6-1.0), P_a – атмосферное давление, ρ_a – плотность воздуха, f – параметр Кориолиса, β – угол отклонения ветра от изобар (15°), M – коэффициент маски суша – земля, из реанализа.

При моделировании наводнения 2015г. в качестве форсинга использовался реанализ ERA5 [32], Данные взяты с (<https://cds.climate.copernicus.eu> (дата обращения: 18.11.2024)). Для задания граничных условий были подготовленные следующие поля: длинноволновая и коротковолновая радиация, температура воздуха, точка росы, влажность, испарение, осадки, толщина снега, атмосферное давление, ветер. Пространственное разрешение реанализа $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, временная дискретность – 3 часа.

Условия численных экспериментов.

Модельные расчеты проводились с 1 июля 2015 по 10 декабря 2015 г. с выводом результатов каждый час.

Для проведения численных экспериментов на модели было подготовлено 4 варианта граничных и начальных условий:

- Береговая линия без намыва, средний расход Невы за 2015 г.
- Береговая линия с намывом, средний расход Невы за 2015 г.
- Береговая линия без намыва, максимальный расход Невы в осенне-зимний период
- Береговая линия с намывом, максимальный расход Невы в осенне-зимний период

В начале декабря 2015 г. в Северной Атлантике под действием глубокого атмосферного циклона сформировался шторм «Десмонд», из-за которого страны Европы столкнулись с мощнейшими наводнениями. 5 декабря «Десмонд» подошел к Санкт-Петербургу, вызвав на востоке Финского залива 3 опасных подъёма уровня моря, которые следовали один за другим. Скорость ветра по данным Гидрометцентра России в Ленинградской области достигала значений 19-24 м/с. Из-за угрозы наводнений закрывались судопропускные и водопропускные затворы КЗС. Максимальный период их непрерывного закрытия составил 41 час.

Для проверки адекватности описания ветровых условий на востоке Финского залива данными реанализа ERA5, было проведено сравнение статистических характеристик измеренного ветра на прибрежной гидрометеорологической станции (ГМС) Озерки с данными о ветре в ближайшей к ней точке реанализа ERA-5 (Рисунок 1). Ежечасные значения ветра в Озерках были предоставлены СЗ УГМС. Перед сравнением, инструментальные измерения ветра приводились к дискретности данных реанализа ERA-5 путём осреднения до 3 часов.

На рисунке (Рисунок 19) представлен временной ход векторов скорости измеренного ветра на станции Озерки и ветра по данным реанализа ERA-5. Видно, что данные реанализа удовлетворительно описывают основные особенности изменчивости ветра в районе станции Озерки. Для более представительного сравнения измеренного и модельного ветра были оценены различные статистические характеристики изменчивости скорости и направления ветра.

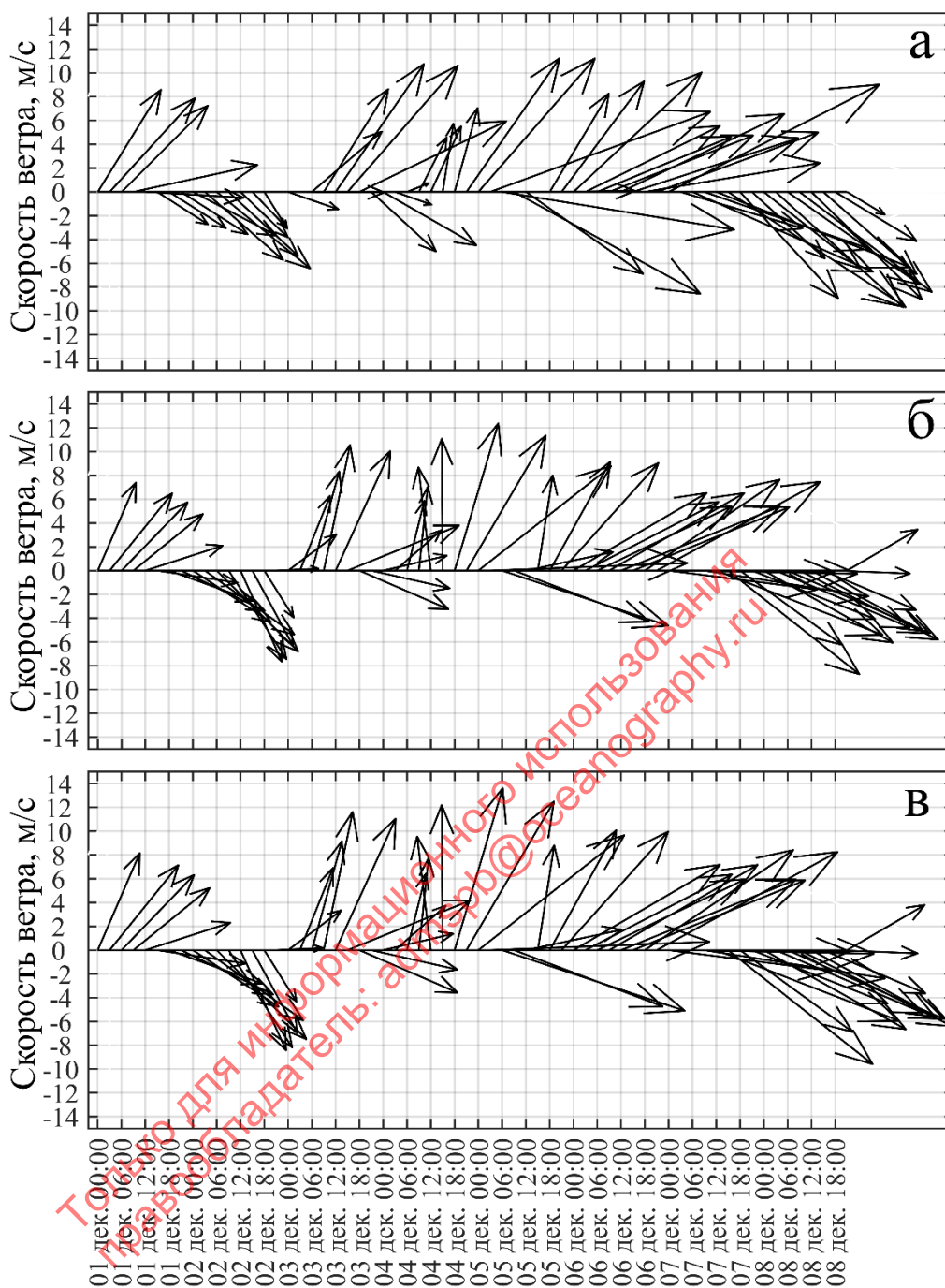


Рисунок 19 - Временной ход векторов измеренного ветра на ГМС «Озерки (а) в декабре 2015 г., и векторов ветра, оцененных в точке 3 данных реанализа ERA-5 (б, Рисунок 1), а также скорректированных значений ветра реанализа ERA-5 (в) по методике, описанной в работе [33].

Статистические характеристики изменчивости ветра оценивались с помощью векторно-алгебраического метода анализа случайных процессов [34,35]. В рамках этого метода оценивались: m_w - математическое ожидание векторного процесса (модуль $|m_w|$ и направление α_m) различные инварианты его среднеквадратического отклонения (СКО): линейный инвариант тензора СКО $[I_1(0)]^{0.5}$, где $I_1(0) = \lambda_1(0) + \lambda_2(0)$ – линейный инвариант тензора дисперсии

векторного процесса, определяемый через полудлины главных осей $\lambda_1(0)$ и $\lambda_2(0)$ эллипса дисперсии и ориентацию α° его большой оси относительно географической системы координат;

$$\lambda_{1,2}(0) = \sqrt{\frac{1}{2} \left(D_{vv} + D_{uu} \pm \sqrt{(D_{vv} - D_{uu})^2 + (D_{vu} + D_{uv})^2} \right)} \quad (4)$$

$$\alpha^\circ = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{D_{vu} + D_{uv}}{D_{vv} - D_{uu}} \right) \quad (5)$$

где D_{vv}, D_{uu} – дисперсии составляющих векторного процесса.

Для исследования изменчивости ветра W , кроме оценки эллипсов СКО, рассчитывался показатель устойчивости ветра $r = \sqrt{I_1(0)} / |m_w|$, где $|m_w|$ – модуль вектора математического ожидания. При $r > 1$ интенсивность колебательных движений в потоке ветра преобладает над интенсивностью среднего переноса, то есть ветровой поток является неустойчивым, и, наоборот, чем меньше единицы значение r , тем устойчивее поток.

Для оценки корреляции между измеренными значениями ветра на станциях и ветра по данным реанализа ERA-5, согласно методики, изложенной в работах [34,35], рассчитывались два инварианта нормированной взаимной корреляционной тензор-функции: линейный инвариант $I_1^{VU}(\tau)$ и индикатор вращения $D^{VU}(\tau)$.

Линейный инвариант $I_1^{VU}(\tau)$ равен следу матрицы корреляционной тензор - функции $K_{VU}(\tau)$ (6) и характеризует общность интенсивностей коллинеарных изменений векторных процессов $V(t)$ и $U(t)$:

$$K_{VU}(\tau) = \begin{pmatrix} K_{v_1 u_1}(\tau), K_{v_1 u_2}(\tau) \\ K_{v_2 u_1}(\tau), K_{v_2 u_2}(\tau) \end{pmatrix} \quad (6)$$

где $K_{VU}(\tau)$ - взаимно-корреляционная функция двух векторных процессов $V(t)$ и $U(t)$; τ - сдвиг по времени; v_1 - составляющая векторного процесса $V(t)$ на параллель; v_2 - составляющая векторного процесса $V(t)$ на меридиан; u_1 - составляющая векторного процесса $U(t)$ на параллель; u_2 - составляющая векторного процесса $U(t)$ на меридиан.

Индикатор вращения $D^{VU}(\tau)$ равен разности недиагональных компонентов матрицы корреляционной тензор-функции $K_{VU}(\tau)$ и характеризует общность ортогональных изменений в процессах $V(t)$ и $U(t)$, причем, если $D^{VU}(\tau) > 0$, то процесс $U(t)$ развернут в среднем относительно процесса $V(t)$ на заданном промежутке времени по часовой стрелке, если $D^{VU}(\tau) < 0$, то против часовой стрелки.

Затем рассчитывался суммарный коэффициент корреляции:

$$R_{VU}(\tau) = \sqrt{[I_1^{VU}(\tau)]^2 + [D^{VU}(\tau)]^2} \quad (7)$$

Кроме этого, оценивались максимальные модули скорости ветра $|W|_{\max}$ во время каждого из трёх опасных подъёмов уровня моря.

В таблице (Таблица 4) представлены результаты сравнения статистических характеристик измеренного ветра на станции Озерки с подобными характеристиками, полученными по данным реанализа ERA-5. Различия в направлениях (α_m) сравниваемых векторов мат. ожидания составляют 9° , а в направлениях больших осей (α°) эллипсов ср. кв. отклонения 16° . Такие расхождения не являются большими, учитывая, что точность измерения направления ветра составляет $\pm 10^\circ$. Оценки сравниваемых показателей устойчивости ветра (r) одинаковые, и они свидетельствуют, что ветровой поток, на рассматриваемом нами временном отрезке, стремится к устойчивому состоянию. Коэффициент корреляции (R) между измеренным и модельным ветром - высокий (0.84), однако оценки модуля мат. ожидания, инвариантов ср. кв. отклонения и максимумов ветра 5 и 7 декабря по данным реанализа ERA-5, являются заниженными относительно статистических характеристик измеренного ветра на ГМС Озерки. Причем, занижение значений максимумов ветра 5 и 7 декабря по данным реанализа ERA-5 является существенным, составляя 16 и 25%, соответственно.

Таблица 4 - Статистические характеристики измеренного ветра на станции Озерки и ветра по данным реанализа ERA-5 без коррекции и с коррекцией, согласно работе [33].

Станция, точка реанализа ERA-5	m_w		$[I_1(0)]^{0.5}$	$\sqrt{\lambda_1(0)}$	$\sqrt{\lambda_2(0)}$	α°	R	r	$ W _{\max, 5.12.2015}$	$ W _{\max, 6.12.2015}$	$ W _{\max, 7.12.2015}$
	$ m_w , \text{см/с}$	$\alpha_m, \text{град.}$	см/с	см/с	см/с	град.			см/с	см/с	см/с
Озерки	8.4	268	7.9	6.4	4.6	-5		0.9	19.8	15.2	19.9
т.3	7.8	259	7.3	6.2	3.8	-21	0.84	0.9	16.6	15.7	15.0
т.3 (корр.)	8.6	259	8.0	6.8	4.2	-21	0.84	0.9	18.4	17.3	16.5

В связи с этим, была проведена коррекция значений ветра реанализа ERA-5 с помощью методики, описанной в работе [33,36]. Согласно данной методики, коррекция ветра производилась по следующей формуле:

$$\begin{cases} W_{corr} = (15 + 1.5) * \exp(0.071 * [W - 15]), \text{ при } W \geq 15 \frac{\text{м}}{\text{с}} \\ W_{corr} = W + \frac{1.5}{15} * W, \text{ при } W < 15 \frac{\text{м}}{\text{с}} \end{cases} \quad (8)$$

где W_{corr} – модель ветра с учетом коррекции, W – исходный модель ветра.

На рисунке (Рисунок 19в) показан временной ход векторов скорости ветра, полученного по данным реанализа ERA-5 с учетом коррекции, а в нижней строчке таблицы (Таблица 4) представлены статистические параметры значений ветра после коррекции. Хорошо видно, что в большинстве случаев, после коррекции, статистические характеристики ветра из реанализа ERA-

5 и измеренного ветра лучше согласуются между собой. Поэтому в рамках численных экспериментов для задания граничных условий на поверхности моря использовались скорректированные значения ветра из реанализа ERA-5.

В рамках принятых начальных и граничных условий модельные расчеты проводились с 1 июля 2015 по 10 декабря 2015 г. с выводом результатов каждый час. 4 декабря, во время начала первого декабрьского опасного подъема уровня моря, когда уровень моря в районе КЗС достигал 80 см, затворы КЗС закрывались, и, далее, расчеты велись в условиях, когда Невская губа была полностью закрыта дамбой от акватории Финского залива. Таким образом, было проведено два численных эксперимента, которые воспроизводили 3 опасных подъема уровня 5, 6 и 7 декабря 2015 г. на востоке Финского залива в условиях работающего КЗС для двух разных объемов расхода Невы. В первом численном эксперименте задавался реальный сток Невы в $2000 \text{ м}^3/\text{с}$, который был отмечен в декабре 2015 г., а во втором эксперименте задавался максимальный сток Невы в $4080 \text{ м}^3/\text{с}$, который был оценен нами только за осенне-зимние периоды (сентябрь-январь) с 1945 по 2018 гг., так как, согласно статистическим данным, 86% наводнений в Санкт-Петербурге произошли с сентября по январь [10,13].

Только для информационного использования
правообладатель: admspb@oceanography.ru

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Эксперименты 1-5

В этой серии численных экспериментов, береговая линия как учитывает намывы так и используется без их учета. ветер юго-западный, 11 или 15 м/с., а также переменный ветер от 11 до 25 м/с. расход Невы 4170 или 2500 м³/с,

1. Береговая линия без намыва, расход Невы 4170 м³/с, ветер юго-западный 11 м/с
2. Береговая линия без намыва, расход Невы 4170 м³/с, ветер юго-западный 15 м/с
3. Береговая линия с намывом, расход Невы 4170 м³/с, ветер юго-западный 11 м/с
4. Береговая линия с намывом, расход Невы 4170 м³/с, ветер юго-западный 15 м/с
5. Береговая линия без намыва, расход Невы 2500 м³/с, ветер с 00:00 часов начала

счета до 18:00 часов первых суток – юго-западный 11 м/с, затем в течение 6 часов с 18:00 часов до 24:00 часов первых суток линейно увеличивается до 25 м/с и с 24:00 часов первых суток до конца счета, составляет 25 м/с.

Тестовые эксперименты проводились исходя из того, что после получения сигнала об угрозе наводнения затворы КЗС начинают закрываться. Согласно утверждённым регламентам, закрытие КЗС должно начинаться, когда уровень моря достигает отметки 1 м над нулём Кронштадтского футштока (НКФ) [21], и продолжаться около одного часа. После закрытия затворов КЗС Невская губа представляет собой полностью замкнутый бассейн, уровеньный режим которого зависит от ветровых условий и стока Невы. Учитывая, что в течение часа после начала закрытия затворов КЗС уровень моря в Невской губе ещё повысится, было принято, что затворы КЗС полностью закрыты при начальном уровне моря внутри акватории 130 см. Расчет уровня и течений проводился при закрытой дамбе, начальном уровне в 130 см, заданном ветре и расходе Невы.

Эксперименты 1-2

На рисунке (Рисунок 20) представлен один из тестовых запусков модели с учетом закрытой дамбы, юго-западного ветра 11 м/с и экстремального стока р. Невы в 4170 м³/с. Хорошо видно, что максимальный подъём уровня моря отмечается в районе Васильевского острова и составляет 225 – 230 см, а минимальный, в 190 см, - на юго-западе Невской губы. Максимальный уклон уровня моря в Невской губе составил 40 см.

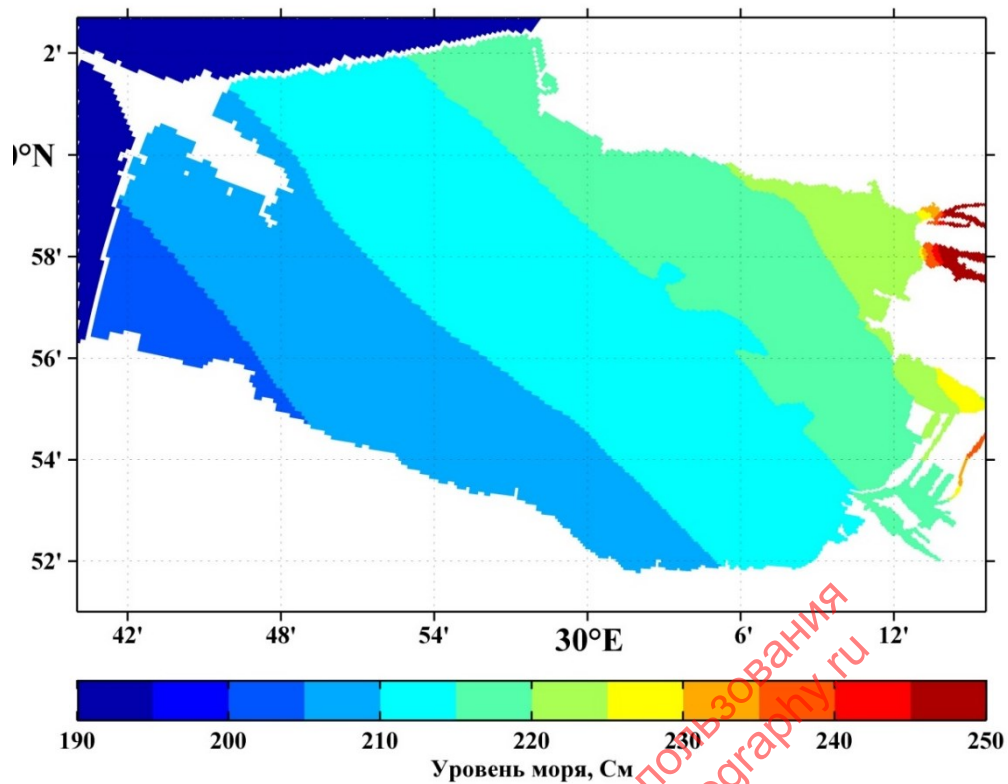


Рисунок 20 Уровень моря, через 24 часа после закрытия дамбы при стоке Невы 4170 м³/с и скорости юго-западного ветра 11 м/с, без учета намыва

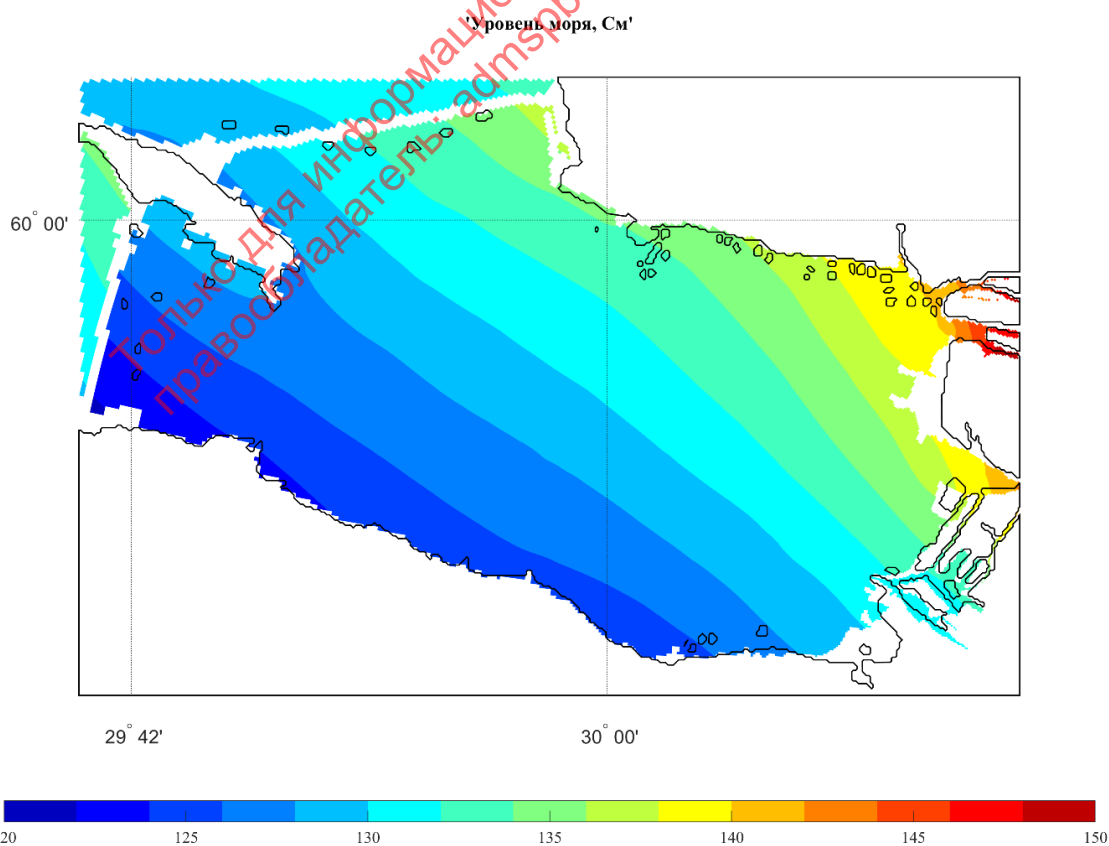


Рисунок 21 Уровень моря, через 1 час после закрытия дамбы при стоке Невы 4170 м³/с и скорости юго-западного ветра 11 м/с, без учета намыва

На рисунке (Рисунок 21). хорошо видно, что за 1 час образовался перекося уровня от западной части Невской акватории в сторону Санкт-Петербурга и составил 20 см. У берегов Васильевского острова уровень моря поднялся до 140 см.

Через 3 часа (Рисунок 22) после закрытия дамбы перекося уровня составляет также 20-25 см, а вблизи города уровень моря поднялся до 145-150 см. У закрытой дамбы с западной стороны уровень моря поднялся выше 150см.

Через 12 часов (Рисунок 23) после закрытия дамбы в акватории Невы уровень моря поднялся до 175-180 у Васильевского острова, перекося уровня составляет 20-25 см. С внешней стороны дамбы, отметка уровня превышает 180 см.

Через 24 часа (Рисунок 24) счота на модели (Рисунок 22), уровень моря вблизи Санкт-Петербурга достигает 225 см, перекося уровня составляет все также 20-25 см. За счет стока Невы уровень в акватории поднялся за сутки на 80см.

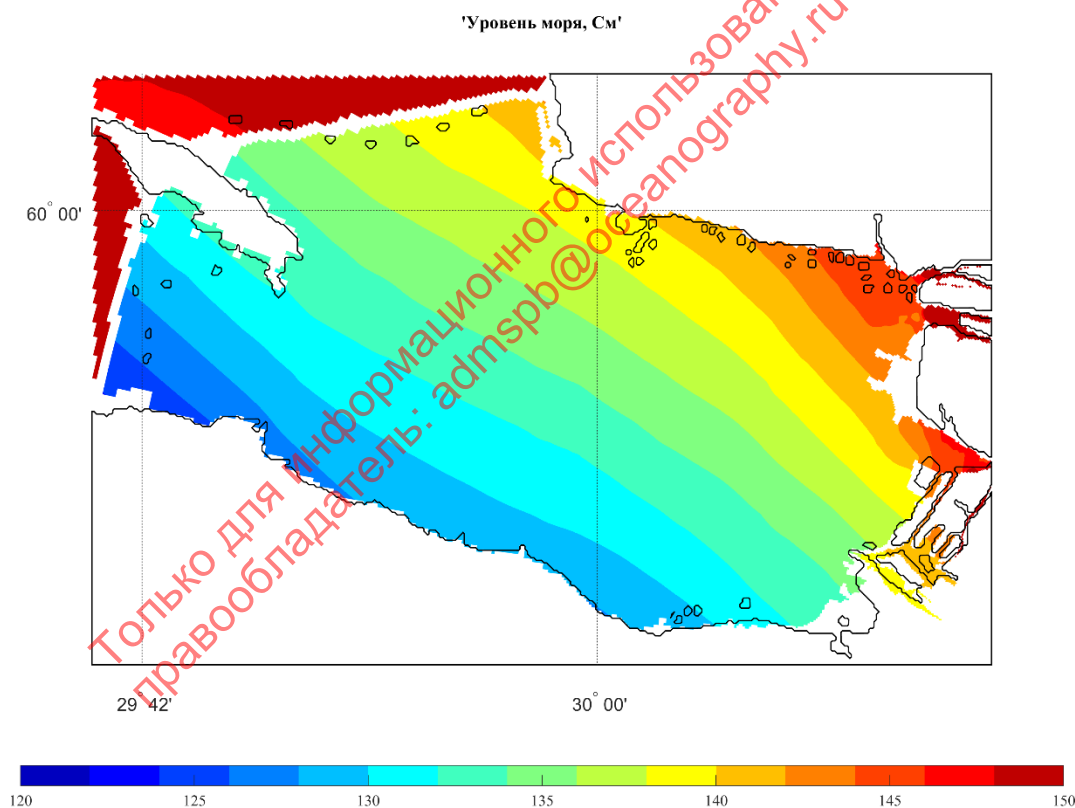


Рисунок 22 Уровень моря, через 3 часа после закрытия дамбы при стоке Невы 4170 м³/с и скорости юго-западного ветра 11 м/с, без учета намыва

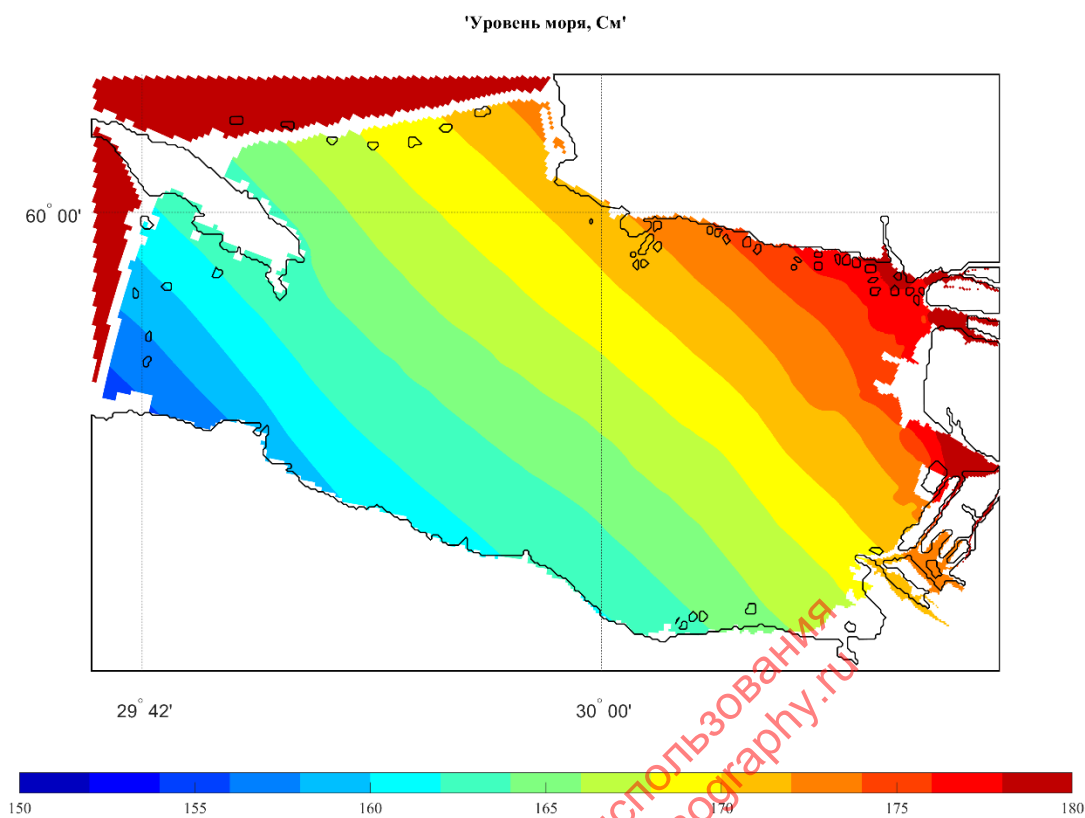


Рисунок 23 Уровень моря, через 12 часов после закрытия дамбы при стоке Невы 4170 м³/с и скорости юго-западного ветра 11 м/с, без учета намыва

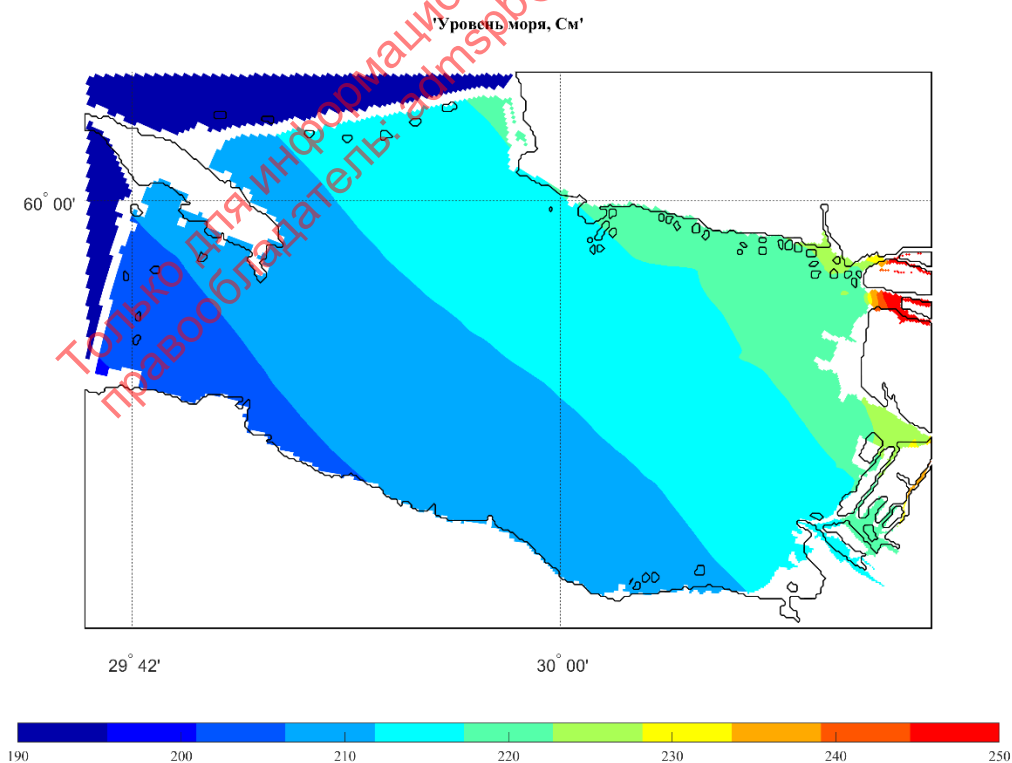


Рисунок 24 Уровень моря, через 24 часов после закрытия дамбы при стоке Невы 4170 м³/с и скорости юго-западного ветра 11 м/с, без учета намыва.

Такой же численный эксперимент был проведен, с береговой линией, в которой учитывался намыв территорий. На рисунке (Рисунок 25) представлен уровень моря через 24 часа после закрытия дамбы.

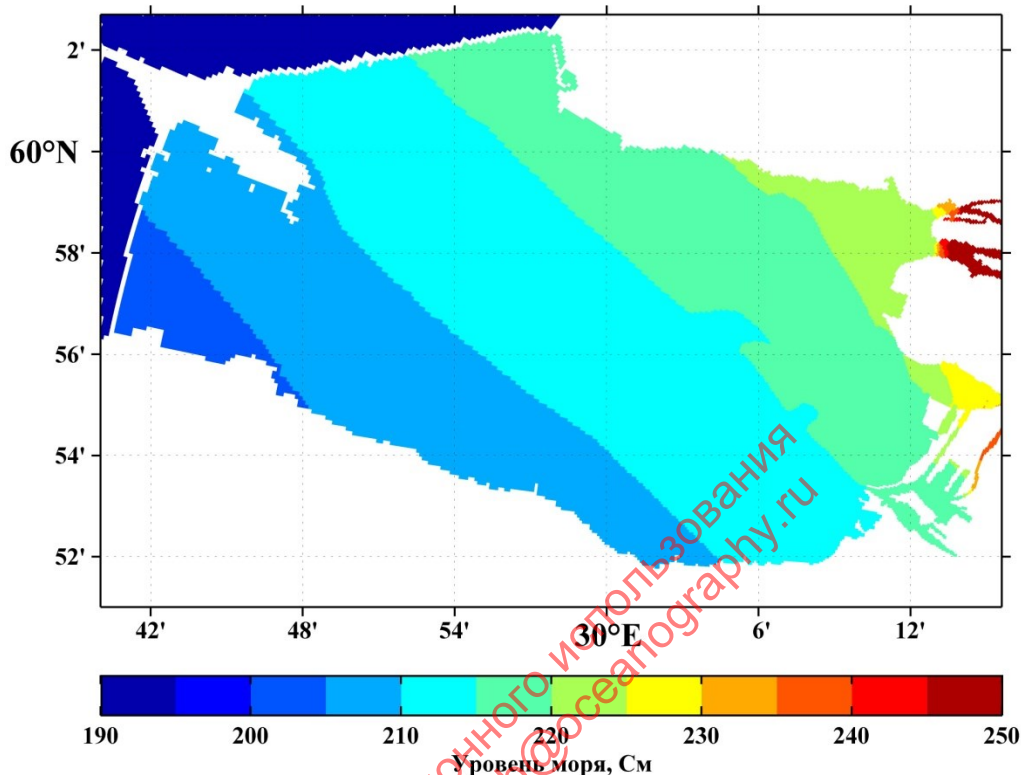


Рисунок 25 Уровень моря, через 24 часов после закрытия дамбы при стоке Невы 4170 м³/с и скорости юго-западного ветра 11 м/с, с учетом намыва.

Результаты сравнения этих экспериментов (Рисунок 26) показывают, что через 24 часа после закрытия дамбы разница в превышениях уровня между экспериментами небольшая и составляет в Невской губе от 0 см на западе до 2 см в устьевой части Б. Невы и более 5 см в М. Неве, т.е. влияние намывных территорий на уровень моря в пределах г. Санкт-Петербурга будет составлять за первые сутки + 2-5 см.

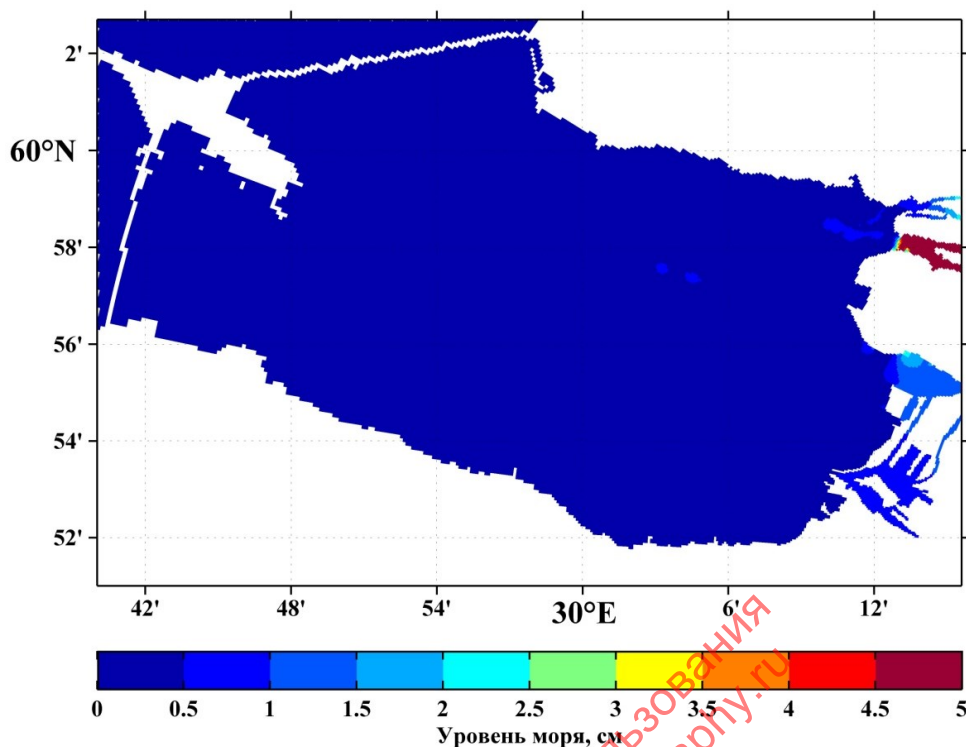


Рисунок 26 Разница уровней между экспериментом с намывом и без намыва через 24 часа.

Эксперименты 3-4.

При моделировании динамики вод в Невской губе с ветром дующим с юго-запада со скоростью 15 м/с, и расходом р. Невы $4170 \text{ м}^3/\text{с}$ в исследуемой акватории за первые 24 часа уровень воды также значительно повышается, но при этом наблюдаются различия при предыдущим расчете с меньшим ветром. На рисунке (Рисунок 27) представлена карта уровня моря через 3 часа после закрытия дамбы. Хорошо видно, что перекося уровня моря в акватории значительно больше и составляет 45-50 см. Максимальный уровень моря наблюдается вблизи Санкт-Петербурга и составляет 155 см. Через 6 часов от начала счета (Рисунок 28), уровень в море поднялся на 10 см за счет Невы, перекося уровня остается неизменным и составляет 45-50 см. На рисунках 10-11 представлены результаты расчета через 12 и 24 часа расчета. Хорошо видно, что перекося уровня не меняется и составляет 45-50 см, но высота уровня увеличивается за счет стока Невы и составляет вблизи города 190 и 230 см.

Так, следует отметить, что при более сильном ветре, в юго-западной части акватории (Рисунок 29 - Рисунок 30), вблизи дамбы, наблюдается уровень моря на отметке 190-195 см, что на 10 см ниже, чем в предыдущих экспериментах. При этом за счет сильного юго-западного ветра формируется значительный перекося уровня с его наибольшими значениями в рукавах Невы (более 250 см) и вдоль берега Васильевского острова (более 230 см), что на 10 см больше, чем в задаче с заданным ветром 11 м/с. Таким образом, перекося уровня моря за счет постоянного ветра юго-западного направления со скоростью 15 м/с, составляет 40-45 см. Результаты сравнения

экспериментов с намывом и без (Рисунок 31 - Рисунок 32) показывают, что через 24 часа после закрытия дамбы различия в превышениях уровня между ними небольшие и составляют в Невской губе от 0 см на западе до 2.5 см в устьевой части Б. Невы и более 5 см в М. Неве, т.е. за счет намывных территорий уровень моря в пределах г. Санкт-Петербурга будет выше за первые сутки на 2.5-5 см.

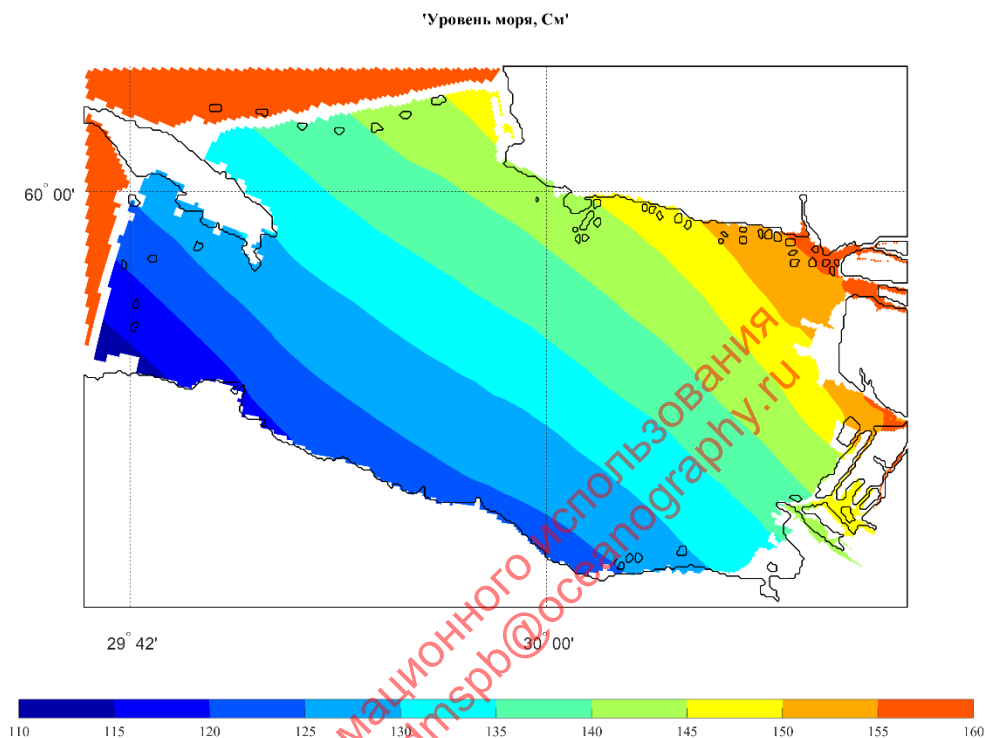


Рисунок 27 Уровень моря, через 3 часа после закрытия дамбы при стоке Невы 4170 м³/с и скорости юго-западного ветра 15 м/с, без учета намыва

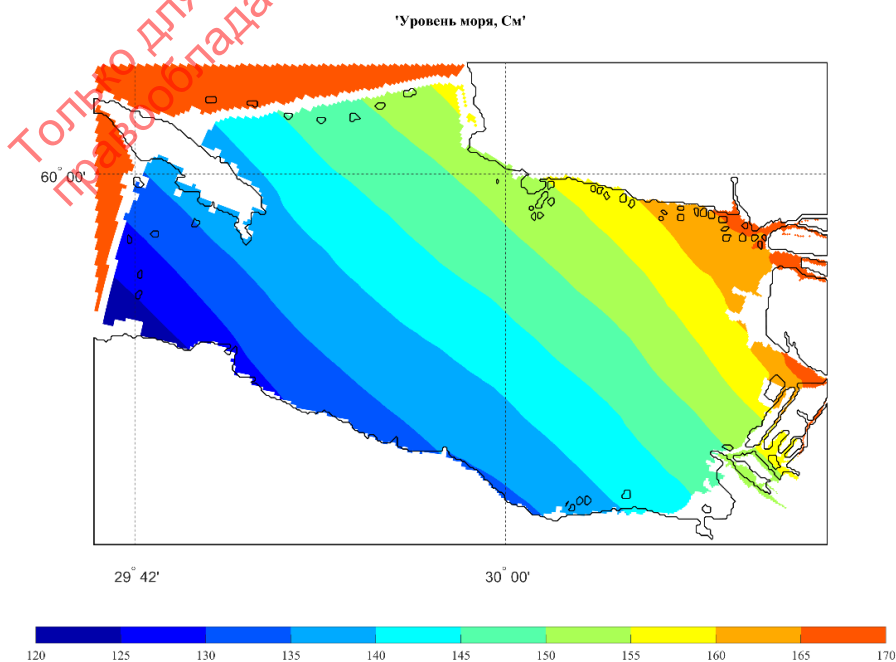


Рисунок 28 Уровень моря, через 6 часов после закрытия дамбы при стоке Невы 4170 м³/с и скорости юго-западного ветра 15 м/с, без учета намыва.

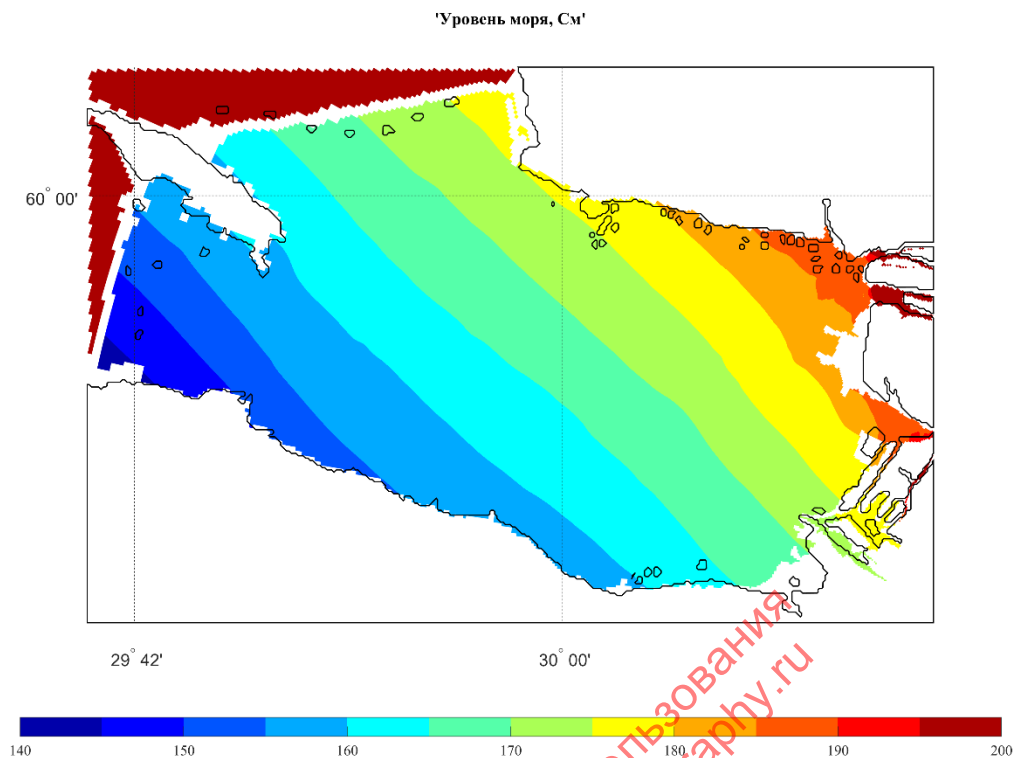


Рисунок 29 Уровень моря, через 12 часов после закрытия дамбы при стоке Невы 4170 м³/с и скорости юго-западного ветра 15 м/с, без учета намыва.

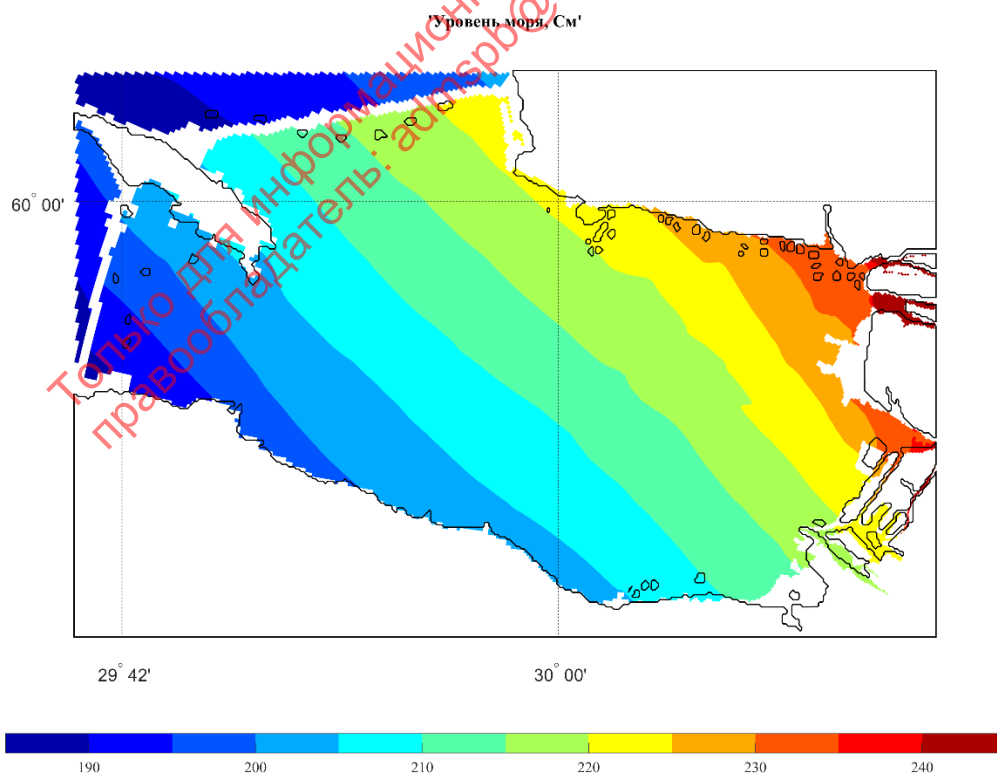


Рисунок 30 Уровень моря, через 24 часов после закрытия дамбы при стоке Невы 4170 м³/с и скорости юго-западного ветра 15 м/с, без учета намыва.

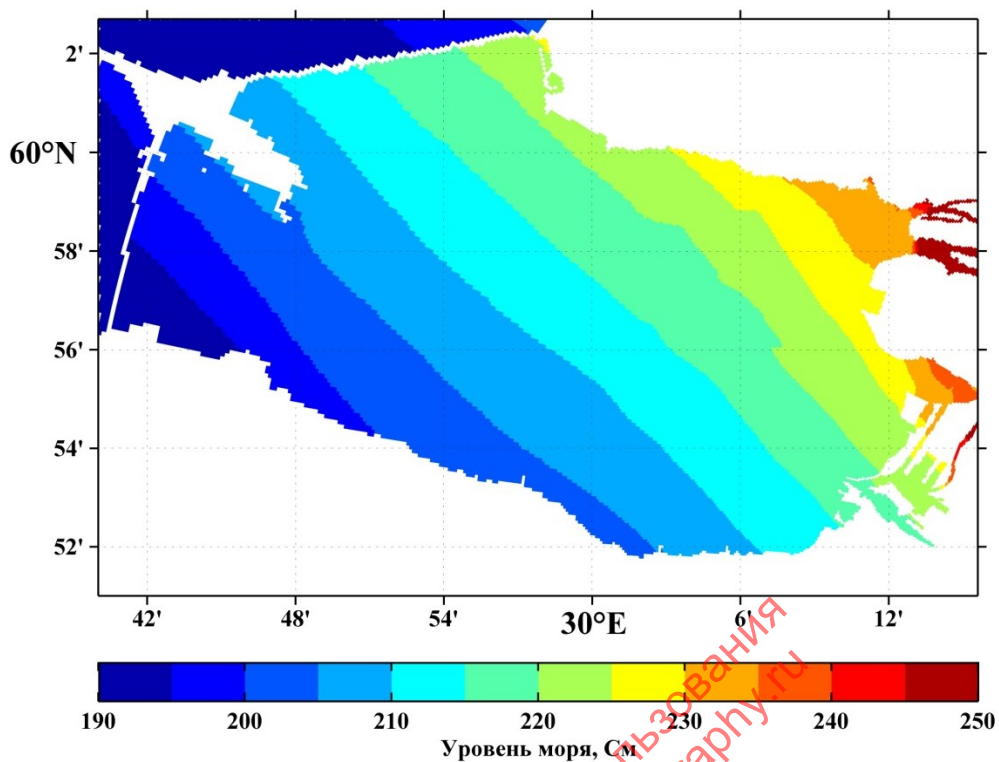


Рисунок 31 Уровень моря, через 24 часов после закрытия дамбы при стоке Невы 4170 м³/с и скорости юго-западного ветра 15 м/с, с учетом намыва.

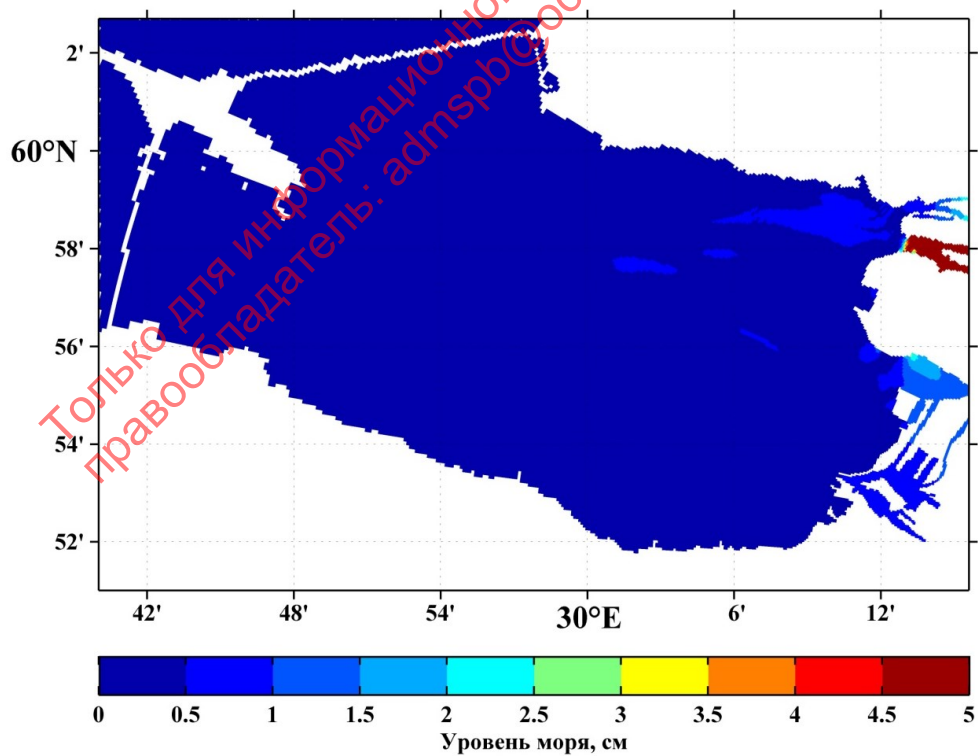


Рисунок 32 Разница уровней между экспериментом с намывом и без намыва через 24 часа.

Эксперимент 5

Последний численный эксперимент отличается от описанных выше тем, что граничные условия изменяются во времени, а расход р. Невы близок к климатическому. Начальный уровень акватории на момент закрытия дамбы задавался также равным 130 см, расход р. Невы – 2500 м³/с, скорость юго-западного ветра принималась с 0 часов до 18 часов первых суток равной 11 м/с, затем, с 18 часов до 24 часов в течение 6 часов она линейно увеличивалась до 25 м/с и с 24-го часа первых суток до конца счета, составляла 25 м/с.

В результате такого расчета через 12 часов (Рисунок 33) перекося уровня в акватории составил около 60 см, а максимальный уровень вблизи Санкт-Петербурга мог достигать 190 см. Через сутки после закрытия дамбы, за счет увеличения силы ветра, перекося уровня в Невской акватории все также был достаточно высок и достигал 60 см, максимальное значение уровня в районе Васильевского острова достигало 230 см. Т.е за счет стока речных вод уровень моря за 12 часов поднялся на 30 см.

На рисунке (Рисунок 34) представлено модельное поле уровня через 24 часа после закрытия дамбы. Как и в предыдущих экспериментах, минимальный уровень моря составляет 180-185 см в юго-западной части исследуемой акватории, а максимальный уровень моря наблюдается в пределах акватории около западной части Васильевского острова, где он составляет 235-240 см, и в рукавах Невы (250 см). Таким образом, перекося уровня от его минимального значения до Васильевского острова составил около 60 см. Данный результат показывает, что при усилении ветра, перекося уровня увеличивается.

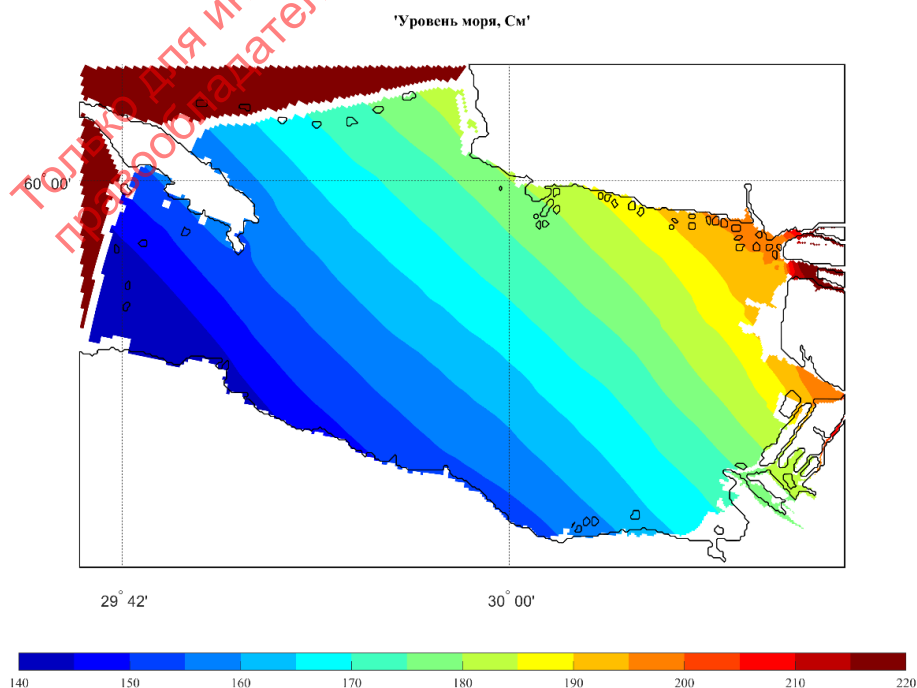


Рисунок 33 Уровень моря, через 12 часов после закрытия дамбы при стоке Невы 2500 м³/с и скорости юго-западного ветра 11-25 м/с, без учета намыва.

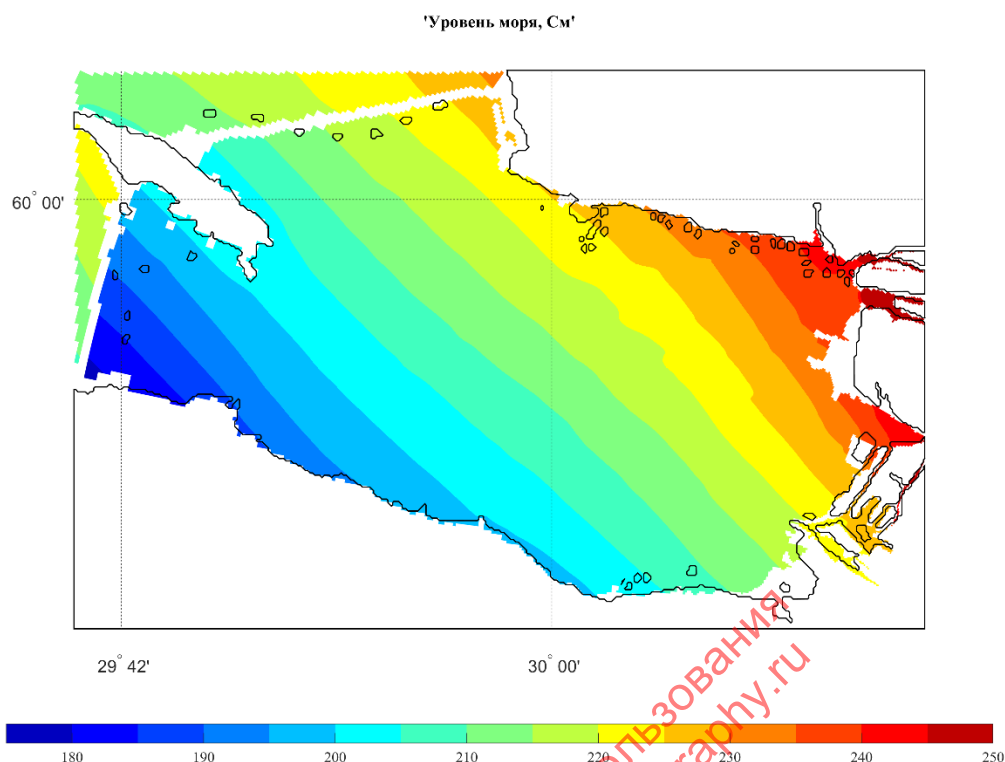


Рисунок 34 Уровень моря, через 24 часов после закрытия дамбы при стоке Невы 2500 м³/с и скорости юго-западного ветра 11-25 м/с, без учета намыва

Выводы по экспериментам 1-5

Было проведено 5 численных экспериментов на трехмерной бароклинной гидродинамической модели Балтийского моря INMOM. Все 5 расчетов проводились при закрытой дамбе и начальном уровне 130 см. Эксперименты 1 и 2 (реальная береговая линия и планируемый намыв) выполнялись при постоянном юго-западном ветре, дующем со скоростью 11 м/с и расходе Невы 4170 м³/с. Эксперименты 3 и 4 (реальная береговая линия и планируемый намыв) выполнялись при постоянном юго-западном ветре, дующем со скоростью 15 м/с и расходе Невы 4170 м³/с. Последний 5 эксперимент проводился при переменном юго-западном ветре, дующем со скоростями от 11 до 25 м/с и расходом Невы 2500 м³/с. Результаты численных экспериментов показали следующее:

1. Через 24 часа после закрытия Дамбы, при начальном уровне 130 см, расходе Невы 4170 м³/с и постоянном юго-западном ветре, дующем со скоростью 11 м/с (1 и 2 эксперименты), максимальный уровень моря в районе акватории Васильевского острова достигает 220-240 см. Такой подъем уровня по классификации наводнений относится к особо опасному наводнению.

2. Через 24 часа после закрытия Дамбы, при начальном уровне 130 см, расходе Невы 4170 м³/с и постоянном юго-западном ветре, дующем со скоростью 15 м/с (3 и 4 эксперименты), подъем уровня моря в районе акватории Васильевского острова приводит к особо опасному наводнению со значениями уровня 230-240 см

3. Через 24 часа после закрытия Дамбы, при начальном уровне 130 см, расходе Невы 2500 м³/с и переменном юго-западном ветре, дующем со скоростью от 11 до 25 м/с (5 эксперимент), максимальный уровень моря в районе акватории Васильевского острова достигает 230-245 см (особо опасное наводнение).

4. В условиях закрытой Дамбы и постоянном юго-западном ветре, дующем со скоростью 11 м/с, пространственный градиент уровня между его наименьшим значением (южнее Кронштадта) и акваторией в районе Васильевского острова составляет 25-30см, при постоянном юго-западном ветре 15 м/с, перекося уровня увеличивается до 40-45см, при переменном ветре от 11 м/с до 25 м/с, максимальный градиент уровня достигает 60 см.

5. Разница в уровне между экспериментами 1 и 2, 3 и 4, где используется реальная береговая линия и предполагаемый намыв, невелика на всей акватории Невской губы (0-1см), за исключением устьевой части Б. и М. Невы, где различия могут достигать 2-3 см, а выше по течению, до 5 см. Т.е. за счет намывных территорий уровень моря в пределах акватории Васильевского острова в период наводнений может быть выше на 2-5 см.

2.2. Эксперименты 6-9

В этой главе описывается серия экспериментов по воспроизведению наводнения 1924 г.

6. Наводнение 1924г, береговая линия без намыва, речной сток 1924г, реанализ в качестве форсинга.

7. Наводнение 1924г, береговая линия без намыва, речной сток 1924г, реанализ в качестве форсинга, ветер расчетный с максимумом 22.7 м/с

8. Наводнение 1924г, береговая линия без намыва, речной сток 1924г, реанализ в качестве форсинга, ветер расчетный с максимумом 25,5 м/с

9. Наводнение 1924г, береговая линия без намыва, речной сток 1924г, реанализ в качестве форсинга, ветер расчетный с максимумом 28 м/с

При моделировании наводнения 1924 года были использованы несколько вариантов форсинга. Были получены поля уровня в узлах регулярной сетки в период катастрофического наводнения. Описание форсинга представлено в главе «Данные и методы». Сформированный реанализ в качестве форсинга показал самые худшие результаты (Рисунок 35). Далее, форсинг с рассчитанным ветром с разными коэффициентами показал более качественные результаты моделирования наводненческой ситуации. Наиболее близко к реальной ситуации катастрофического подъема уровня моря в пункте Горный институт, приблизились результаты численного эксперимента, при котором ветер рассчитывался по градиентам атм. давления с максимальным значением 28 м/с на дату наводнения (Рисунок 35). Однако, разница рассчитанного и измеренного уровня моря составляет 54 см.

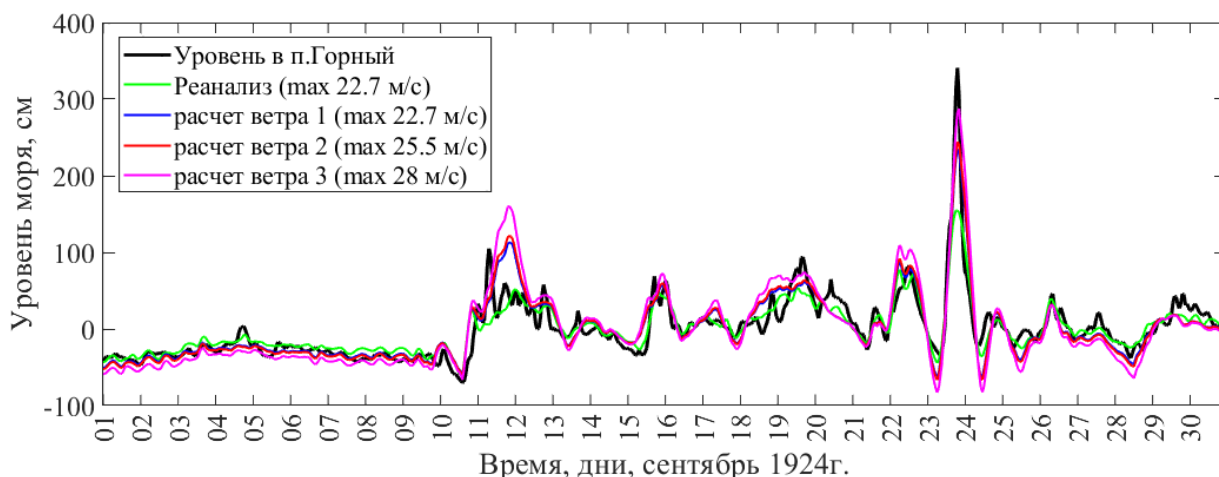


Рисунок 35 - Ход уровня моря в п. Горный, измеренный (черная линия), и рассчитанный по модели (остальные цвета).

Ниже представлены (Рисунок 36) ежечасные поля уровня моря, рассчитанные по эксперименту 4 (рассчитанный ветер около 28 м/с), в день наводнения. Модель воспроизвела распространение волны, которая перемещается с запада на восток. В 11 часов утра наблюдается небольшое повышение уровня в акватории до 50 см, затем к 13 часам уровень моря до невской акватории повышается до 150-200 см. К 15 часам высокий уровень дошел до самой восточной части Финского залива и составлял около 150 см. Наивысший уровень в районе Ленинграда наблюдался в 19 часов и превышал 300 см, затем волна начинает отходить обратно на запад и уровень снижается.

Только для информационного использования
 правообладатель: admrb@obsmatnig.ru

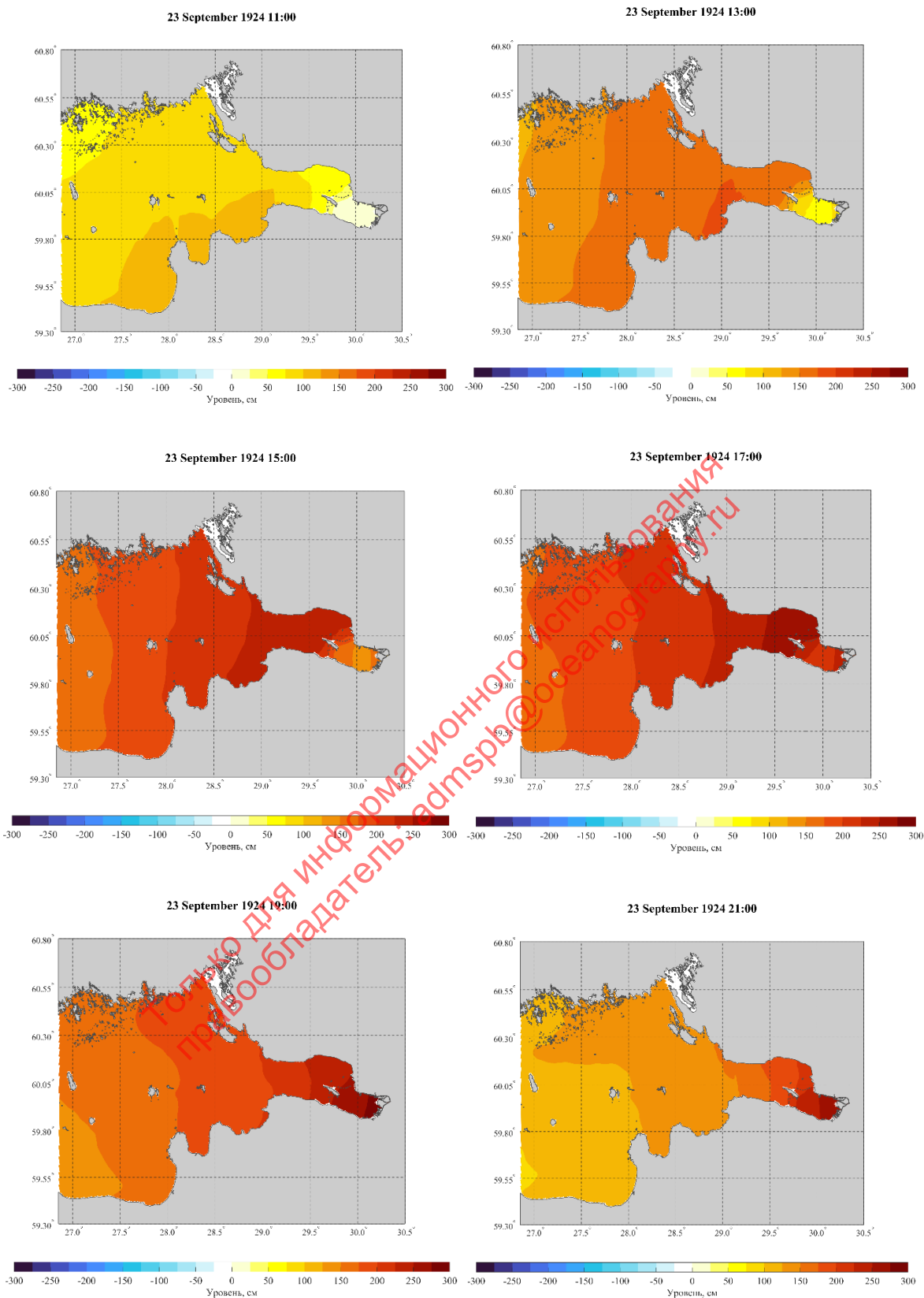


Рисунок 36 Поля уровня моря в Финском заливе на дату катастрофического наводнения 23 сентября 1924г.

Выводы по серии экспериментов 6-9

Проведённые численные эксперименты не позволили точно воспроизвести катастрофическое наводнение 1924г: разница рассчитанного и измеренного уровня моря на момент его максимального подъема составила 54 см.

Увеличение скорости ветра над Финским заливом линейно увеличивает амплитуду колебания уровня моря, что не является главной причиной такого резкого повышения уровня моря, который наблюдался в 1924г.

Качество реанализа не позволяет достоверно моделировать катастрофическое наводнение, а отсутствие подробных данных метеорологических наблюдений не позволяет правильно скорректировать форсинг, задаваемый в модели.

Данные об уровне моря в п. Смоген в 1924 г, задаваемые на жидкой границе, которые взяты с сайта (<http://marine.copernicus.eu>), при обновлении базы в современный период, показывают разные значения мат. ожидания, что может свидетельствовать о неточности привязки этих данных к Балтийской системе отсчета уровня. Это может вносить существенный вклад в формирование индуцированной длинной волны, распространяющейся из Северного моря в Балтийское. В следствие этого, ошибка расчетов наводнения в Ленинграде может быть существенной.

Возможные причины недостаточно реалистичного описания моделью катастрофического подъёма уровня моря могут быть также связаны с отсутствием подробной информации о скорости перемещения циклона, пространственно-временной изменчивости скорости ветра и точной информации о береговой линии и донной топографии в Невской губе в 1924 г.

2.3. Эксперименты 10-13

Целью данной части работы является выявление оптимального времени закрытия дамбы на примере наводнения в декабре 2015 года. Для выполнения указанной цели была проведена серия численных экспериментов на модели по следующим сценариям: закрытие дамбы происходило при достижении в районе судопропускного сооружения КЗС (С1) уровня моря 80, 90, 100 см, расходы Невы принимались 2000 м³/с или 4080 м³/с. Данные эксперименты проводились с учетом намывных территорий и без них.

Для проведения численных экспериментов на модели было подготовлено 4 вариантов граничных и начальных условий:

10. Береговая линия без намыва, средний расход Невы (2000 м³/с) за 2015 г.
11. Береговая линия с намывом, средний расход Невы (2000 м³/с) за 2015 г.
12. Береговая линия без намыва, максимальный расход Невы (4080 м³/с) в осенне-зимний период
13. Береговая линия с намывом, максимальный расход Невы (4080 м³/с) в осенне-зимний период

На рисунке (Рисунок 37) представлены результаты шести экспериментов со средним расходом Невы 2000 м³/с. Верхняя картинка, показывает ход уровня моря (с учетом намыва и без, варианты 10-11) в различных точках невской акватории при закрытии дамбы на отметке 80 см с внешней стороны дамбы. Средняя картинка показывает уровень моря с закрытием дамбы при 90 см с внешней стороны, а нижняя, закрытие дамбы на 100см.

Закрытие дамбы производится в 19:00 (20:00, 21:00) 4 декабря 2015 года. Из-за наличия намывных территорий уровень воды в Невской губе увеличивается быстрее, по сравнению с экспериментами без намыва. Разница уровня воды при наличии намывных территорий и без них растет с увеличением времени после закрытия дамбы. Результаты сравнения 3 трех экспериментов показали (Рисунок 37в), что при закрытии дамбы, когда уровень моря с внешней стороны составлял 100 см, наступление наводнения происходило через 33 (намыв) или 34 часа (без намыва), при закрытии дамбы с уровнем моря 90 см (Рисунок 37б) – через 39 -41 час, и при 80 см (Рисунок 37а) -44-46 часов (Таблица 5).

Хорошо видно, что при угрозе повторного наводнения (второй подъем уровня моря) дамбу можно держать закрытой и избежать наводнения в Санкт-Петербурге возможно лишь при условии, что ворота дамбы изначально были закрыты при 80-90 см уровня с внешней стороны ворот. В остальных случаях возникает угроза наводнения либо за счет стока Невы внутри закрытой акватории и перекося уровня моря или при открытии дамбы и пришедшей второй волны наводнения.

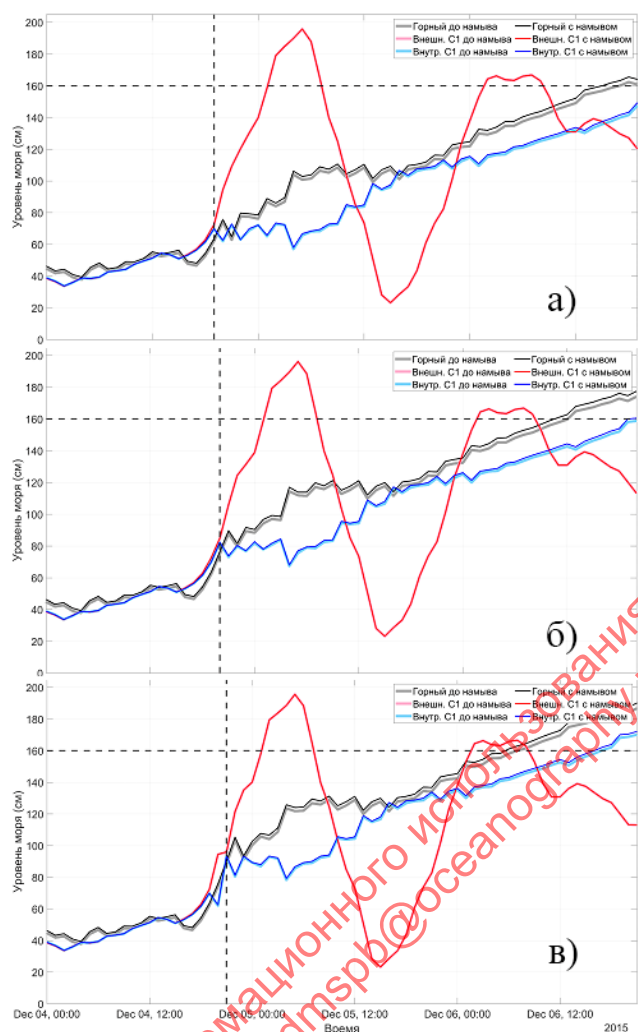


Рисунок 37 - Уровень моря (см) при закрытии дамбы с уровнем моря с внешней стороны: а)80см, б)90 см, в)100 см. Вертикальная штриховая линия – закрытие дамбы. Горизонтальной штриховой линией показан уровень моря 160 см.

Таблица 5 - Значения промежутков времени после закрытия затворов КЗС, когда уровень моря в Невской губе у Горного института повышается до наводненческого значения 161 см

Закрытие дамбы	Время после закрытия дамбы до уровня 161 см (ч). без намыва/ с намывом
Уровень моря 80 см, расход Невы 2000 м ³ /с	46/44
Уровень моря 90 см, расход Невы 2000 м ³ /с	41/39
Уровень моря 100 см, расход Невы 2000 м ³ /с	34/33
Уровень моря 80 см, расход Невы 4080 м ³ /с	27/26

При увеличении расхода Невы до 4080 м³/с (варианты 12-13) и при закрытии дамбы при 80 см с внешней стороны, (Рисунок 38) уровень моря в закрытой акватории растет быстрее и достигает отметки в 160 см через 27 без намыва и 26 часов с намывом. Т.е. во избежание резкого подъема уровня моря внутри закрытой акватории до опасных отметок, необходимо открыть дамбу сразу, как только снаружи ворот уровень начнет снижаться, но не позднее 26 – 27 часов от закрытия дамбы.

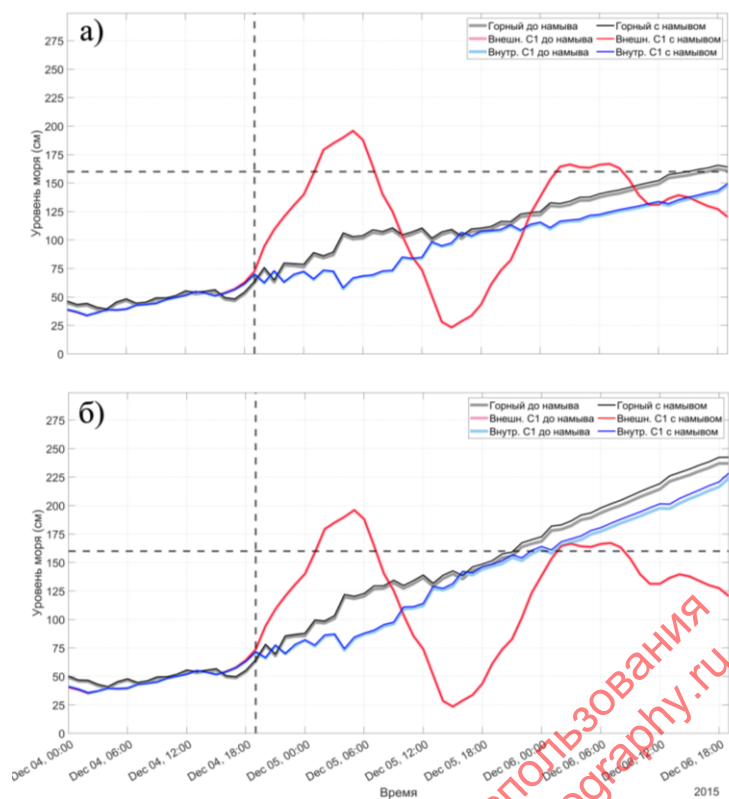


Рисунок 38 - Уровень моря (см) а) при среднем стоке Невы; б) при максимальном за осенне-зимний период расходе в р. Нева. Вертикальной штриховой линией показано время закрытия дамбы – 19:00 4 декабря 2015 г.; горизонтальной штриховой линией показан уровень моря 160 см.

На рисунке (Рисунок 39) показаны результаты численных экспериментов со стоком Невы 2000 м³/с. Через 12 часов после закрытия затворов КЗС, уровень на востоке Невской губы повысился до 105 см, а градиент уровня между Кронштадтом и Васильевским островом составил 25 см. В дельте Невы уровень достиг значений 140-150 см. Разница уровней между двумя экспериментами (без намывов и с намывами) в Невской губе не превышала 1 см (Рисунок 39).

Через 24 часа после закрытия дамбы уровень моря в Невской губе повысился до 120 см, а в дельте Невы – до 150 см. Разница между значениями уровня моря в двух экспериментах составляла на большей акватории Невской губы около 1 см, и только на востоке губы она достигала 2 см (Рисунок 39).

Через 48 часов после закрытия затворов КЗС уровень моря повысился до 140 см на западе Невской губы и до 165 см на её востоке, а в дельте Невы подъем уровня достиг 200 см. Дополнительный подъем уровня моря за счет намывов в Невской губе составил от 2 до 3 см (Рисунок 39).

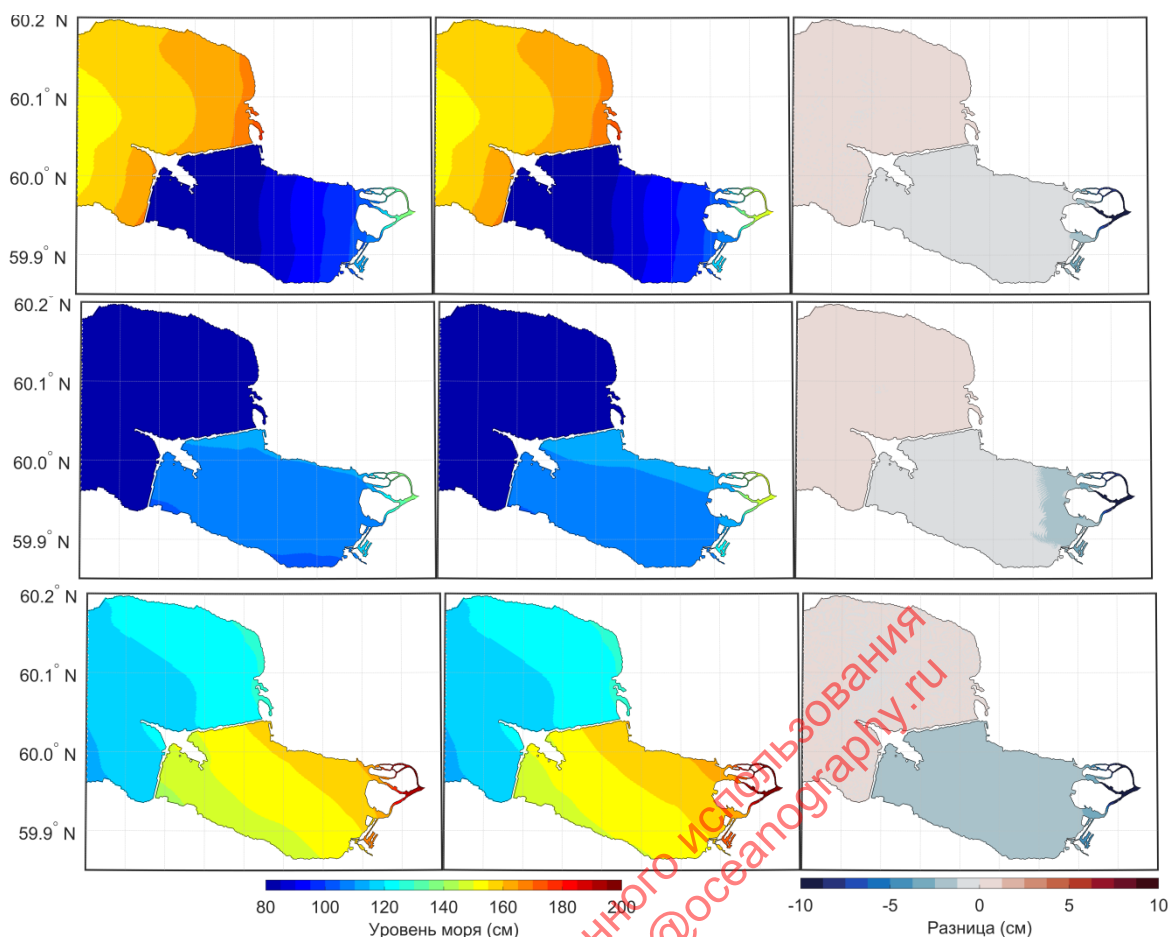


Рисунок 39 - Положение уровневой поверхности в Невской губе и дельте Невы для стока Невы 2000 м³/с, при отсутствии намывов (левая колонка), с намывами (центральная колонка) и разность между ними (правая колонка), через 12 (вверху), 24 (в центре) и 48 (внизу) часов после закрытия затворов КЗС.

На рисунке (Рисунок 40) показаны результаты численных экспериментов с объемом стока Невы 4080 м³/с. Через 12 часов после закрытия затворов КЗС уровень моря на западе Невской губы достигает 85 см, а на востоке 130 см. Дополнительный подъем уровня из-за намывов равен на всей акватории Невской губы 2 см. В дельте Невы подъем уровня повышается до 150 см.

Через 24 после закрытия дамбы уровень моря на севере Невской губы повышается до 155 см, а на юге – до 145 см. Дополнительный подъем уровня моря из-за намывов территорий составляет в Невской губе 2-4 см.

Через 48 часов после закрытия затворов КЗС в Невской губе отмечается особо опасное наводнение с подъемом уровня до 225-245 см. Дополнительный подъем уровня моря из-за современных намывов территорий в Невской губе составляет 4 – 5 см.

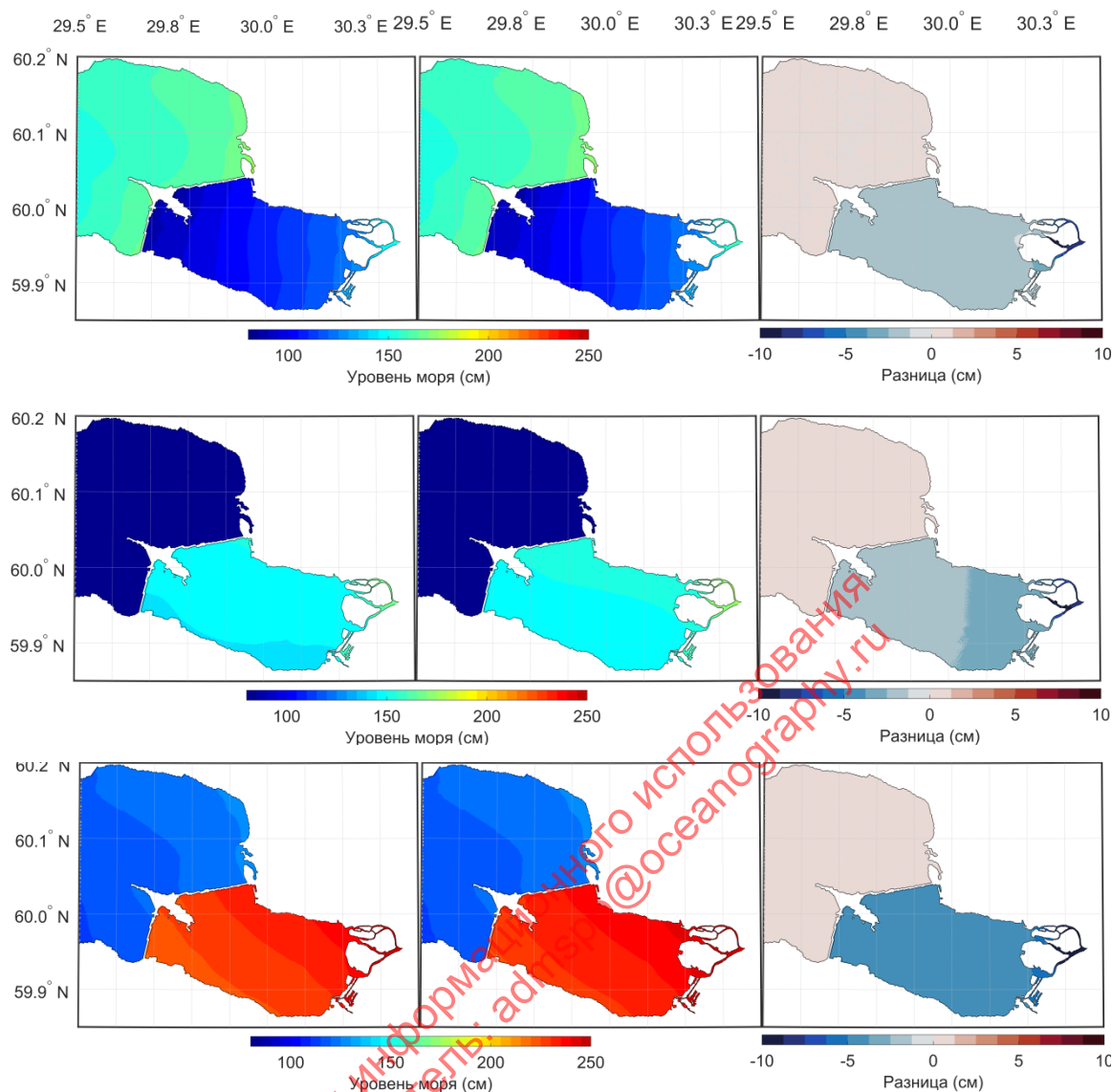


Рисунок 40 - Положение уровневой поверхности в Невской губе и дельте Невы для максимального стока Невы 4080 м³/с, при отсутствии намывов (левая колонка), с намывами (центральная колонка) и разность между ними (правая колонка), через 12 (вверху), 24 (в центре) и 48 (внизу) часов после закрытия затворов КЗС.

На рисунках (Рисунок 39 и Рисунок 40 верхний ряд), представлено сравнение ситуаций через 12 часов после закрытия дамбы в расчетах со средним стоком Невы и максимальным. Хорошо видно, что за счет расхода Невы, в закрытой акватории уровень моря вблизи Горного достигает 125см, в то время как при среднем расходе Невы – только 100см.

На рисунке (Рисунок 39 и Рисунок 40 нижний ряд) представлено сравнение ситуаций через 48 часов после закрытия дамбы в расчетах со средним стоком Невы и максимальным. Хорошо видно, что за счет расхода Невы, в закрытой акватории уровень моря вблизи Горного достигает 240см, в то время как при среднем расходе Невы – только 165см.

На рисунке (Рисунок 41) показан средний уровень по всей внутренней акватории Невской губы за каждый момент времени, ограниченной закрытой дамбой для вариантов с намывом и без

намыва, а также их разница. Установлено, что намывные территории практически никак не влияют на уровень воды при открытой дамбе. Однако после закрытия дамбы разница начинает резко увеличиваться, достигая через 48 часов после закрытия значений около 2 см при среднем расходе воды в р. Невы и около 4,5 см при наибольшем речном стоке. При этом за счет нагонного действия ветра и увеличения перекоса уровня в закрытой акватории, эти значения в районе Васильевского острова, Горного и Малой Невы значительно увеличиваются, что способствует уменьшению времени наступления наводнения при 160 см в Горном.

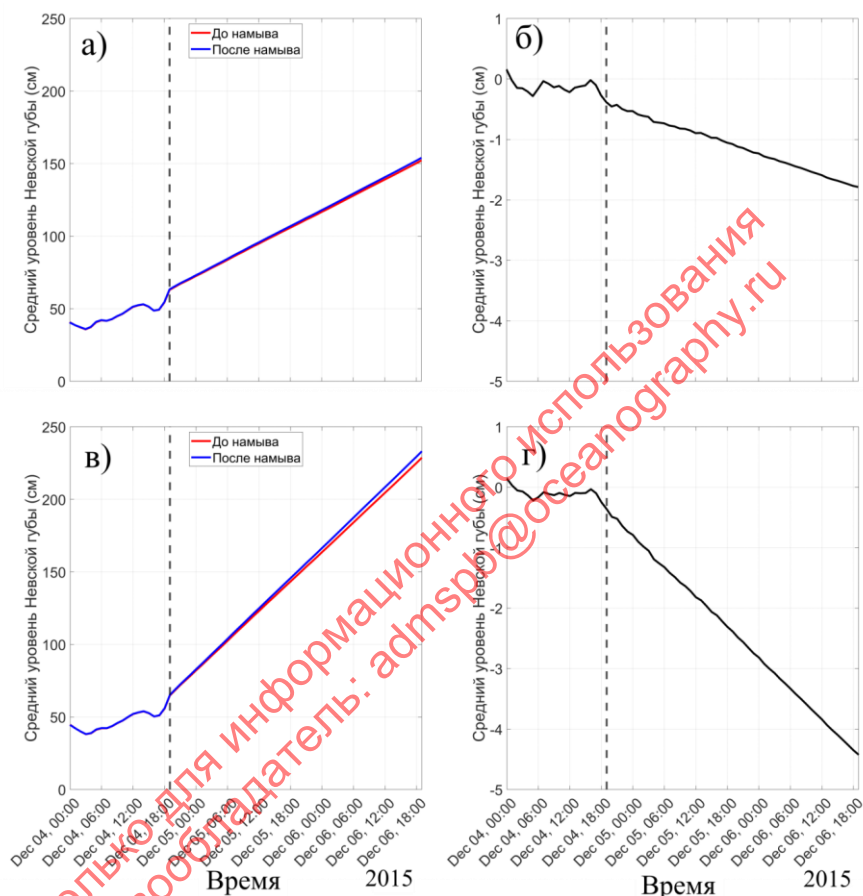


Рисунок 41 - а-в) средний уровень по внутренней акватории Невской губы ограниченной закрытой дамбой; б- г) разница уровней между намывом и без. Верхний ряд, расход Невы 2000м³/с, нижний ряд – 4080 м³/с. Штрихом обозначено время закрытия дамбы;

Выводы по серии экспериментов 10-13

Произведённые в последние полвека намывы территорий не оказывают заметных изменений в положении урвенной поверхности Невской губы при закрытых затворах КЗС во время опасных подъёмов уровня моря, вызванных штормовыми нагонами. Дополнительные подъёмы уровня из-за намывов в Невской губе при закрытых в течение 12 - 48 часов затворах КЗС составляют 1 - 3 см, когда расход Невы был 2000 м³/с и 2-5 см, когда объём стока Невы составлял 4080 м³/с. Однако подъём уровня до 161 см у Горного института, при котором в Санкт-Петербурге фиксируются наводнения, происходит из-за намывов раньше на 1-2 часа.

При максимальном для осенне-зимнего периода объеме стока Невы в 4080 м³/с, через 27 часов после закрытия затворов КЗС, в Невской губе у пункта Горный институт фиксируется опасный подъем уровня в 161 см, а через 48 часов – особо опасный подъем уровня в 240 см.

2.4. Эксперименты 14-17

Серия численных экспериментов на модели с постоянным ветром, различными расходами р.Невы, и берегом с учетом намыва.

14. Береговая линия с намывом, расход Невы 3000 м³/с, скорость и направление ветра 14 м/с, западный.

15. Береговая линия с намывом, расход Невы 3000 м³/с, скорость и направление ветра 16 м/с, западный.

16. Береговая линия с намывом, расход Невы 4250 м³/с, скорость и направление ветра 16 м/с, западный.

17. Береговая линия с намывом, расход Невы 3000 м³/с, скорость и направление ветра 16 м/с, юго-западный.

Данные эксперименты строились следующим образом: расход р.Невы задавался 3000 или 4250 м³/с. Скорость ветра 16 или 14 м/с, направление юго-запад или запад. Всего проведено 4 эксперимента. Задание ветра и расхода р.Невы выбирались исходя из статистического анализа метеорологических характеристик в период наводнения и стока Невы за весь период наблюдений в осенне-зимние месяцы и в период наводнений (глава 1. Данные и методы). При запуске эксперимента отслеживались значения уровня снаружи ворот дамбы. Когда уровень моря повышался до 80 см, створки дамбы закрывались и затем продолжался счет.

Эксперимент 14.

При таких условиях, ветер в акватории не представляет угрозы для Санкт-Петербурга. Максимальный уровень моря (Рисунок 42 и Рисунок 43) в п. Горный составил около 130 см, затем произошло падение уровня до 70 см в течение 13 часов, а затем опять медленный рос уровня до тех же 130 см с последующим падением. Период этих колебаний составляет около 29-30 часов, что близко к собственным колебаниям бассейна [37]. Перекос уровня за счет ветра западного направления и скоростью 14 м/с составляет 32 см.

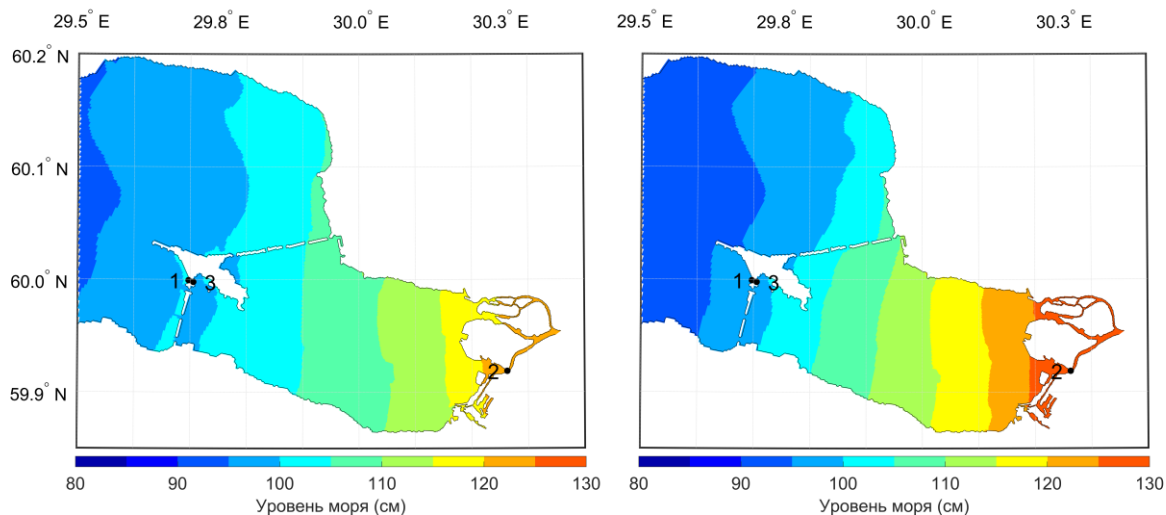


Рисунок 42 - Уровень моря (см). Слева – в момент максимума у дамбы (17 час), справа – в момент максимума у Горного (18 час).

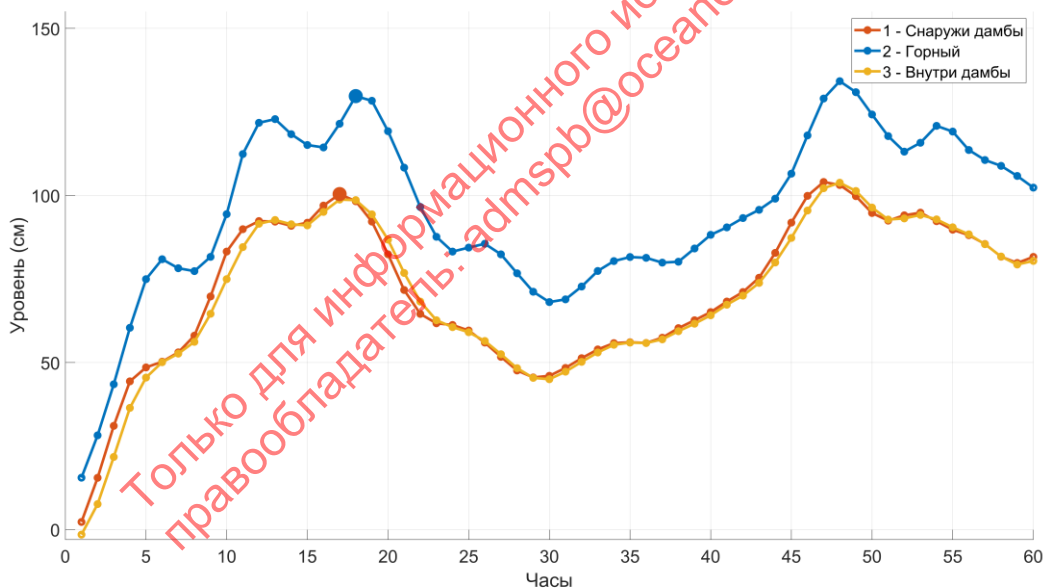


Рисунок 43 - Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Большими точками отмечены максимумы у дамбы и Горного (17 и 18 час, соответственно).

Эксперимент 15

Закрытие дамбы произошло на 9 час счета, а отметка уровня моря в п. Горный в 160 см отмечается на 27 часу (Рисунок 44, Рисунок 45), перекося уровня моря внутри акватории закрытой дамбы, за счет ветра составил 35 см. Таким образом наводнение произошло на 18 час закрытия дамбы за счет стока Невы и перекося уровня моря. Открытие дамбы рекомендуется на 20 час расчета, что может предотвратить наводненческую ситуацию.

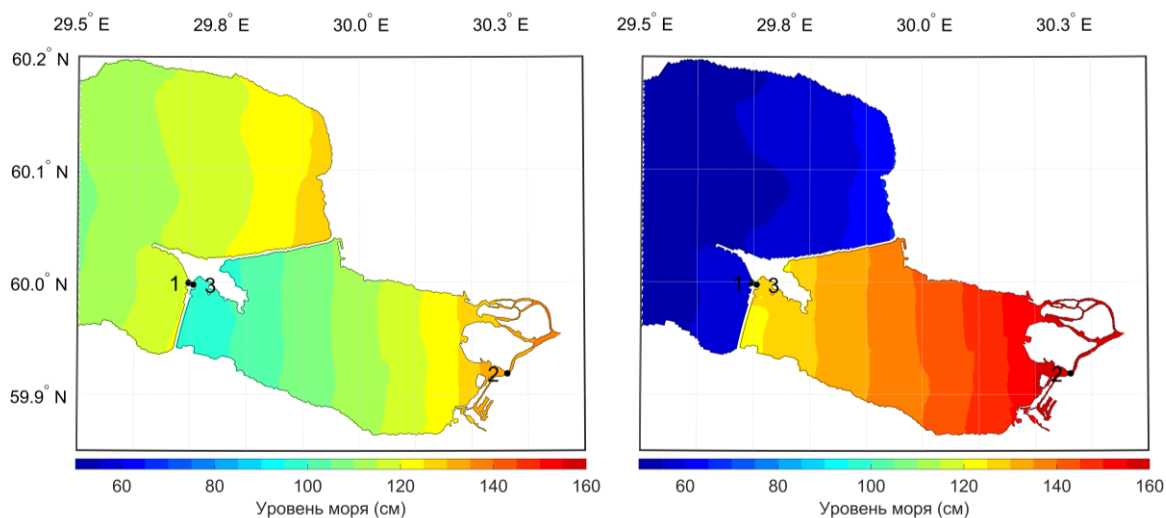


Рисунок 44 - Уровень моря (см). Слева – в момент максимума у дамбы (17 час), справа – в момент уровня 160 см у Горного (27 час).

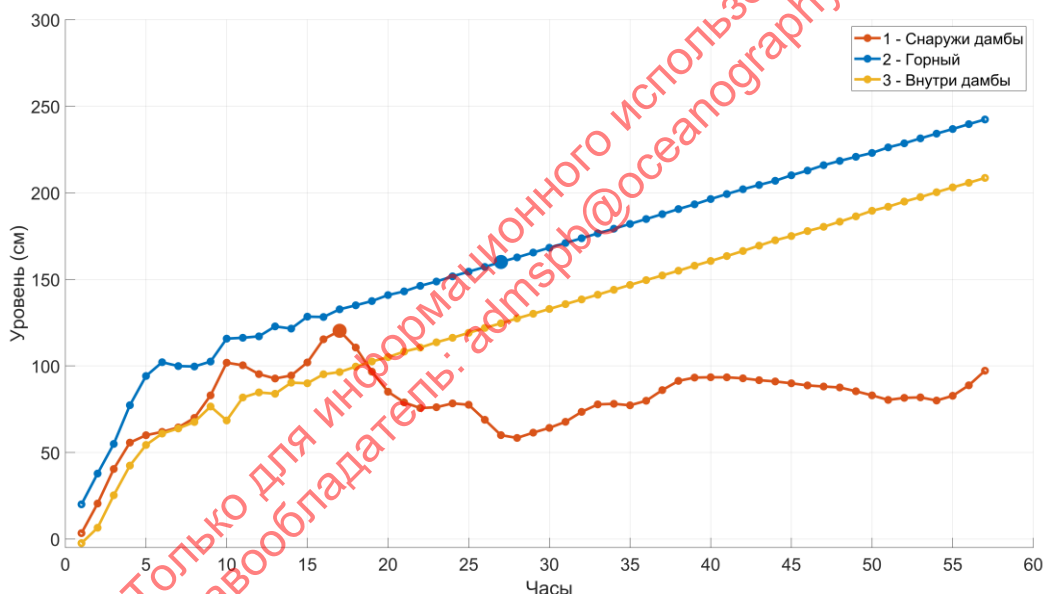


Рисунок 45 - Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Большими точками отмечены максимумы у дамбы и уровень 160 см Горного (17 и 27 час, соответственно).

Эксперимент 16

Закрытие дамбы произошло на 9 час счета, а отметка уровня моря в п. Горный в 160 см отмечается на 23 часе (Рисунок 46, Рисунок 47), перекося уровня моря внутри акватории закрытой дамбы, за счет ветра составил 35 см. Таким образом наводнение произошло на 14 час закрытия дамбы за счет стока Невы и перекося уровня моря. Открытие дамбы рекомендуется проводить на 19 час расчета, что составляет 10 часов закрытия дамбы. При этом следует помнить о собственных колебаниях бассейна и второй волне, при текущем ветре, амплитуда которой будет сравнима с первой волной.

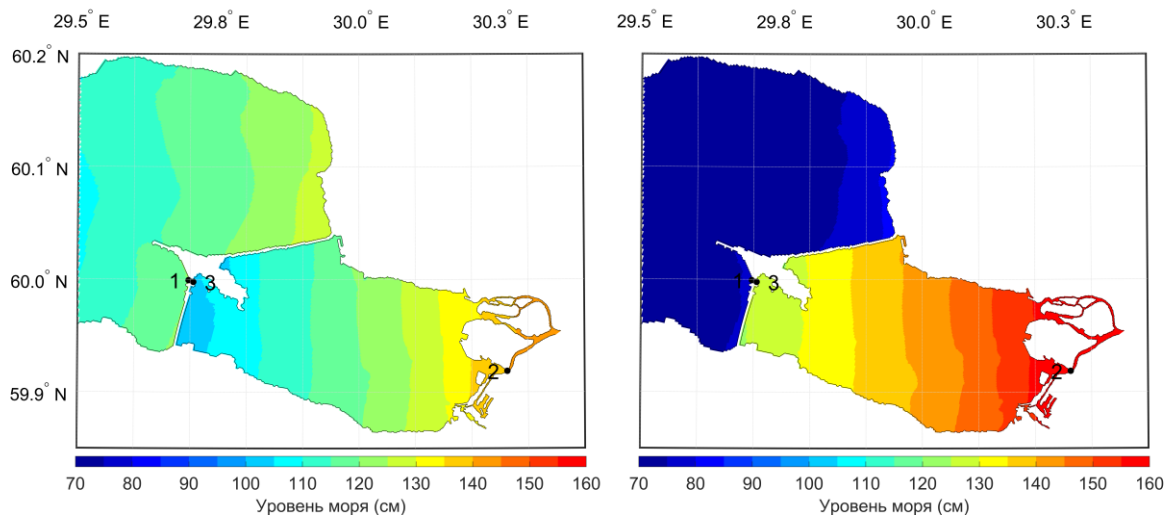


Рисунок 46 - Уровень моря (см). Слева – в момент максимума у дамбы (17 час), справа – в момент уровня 160 см у Горного (23 час).

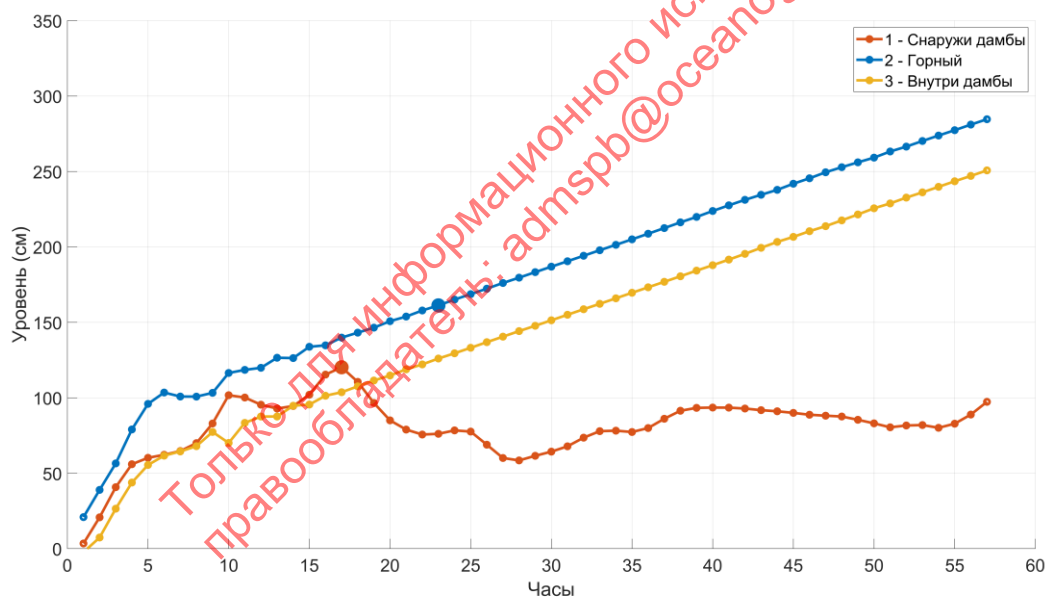


Рисунок 47 - Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Большими точками отмечены максимумы у дамбы и уровень 160 см у Горного (17 и 23 час), соответственно

Эксперимент 17

Рассмотрим вариант расчета на модели при береговой линии с намывом, расход Невы 3000 м³/с, скорость и направление ветра 16 м/с, юго-западный. В данном эксперименте дамба также закрывалась на 9 часу расчета, но максимальный уровень моря снаружи дамбы, при юго-западном ветре имеет другой характер (Рисунок 48). Максимум достигается за 10 часов и

держится еще 7 часов, и только потом начинает падать. Внутри дамбы наступление отметки в 160 см у п. Горный происходит несколько позже, на 31й час счета, т.е. до наводненческой ситуации дамба может быть закрыта около 22 часов, перекоп уровня составил внутри дамбы всего 20см.

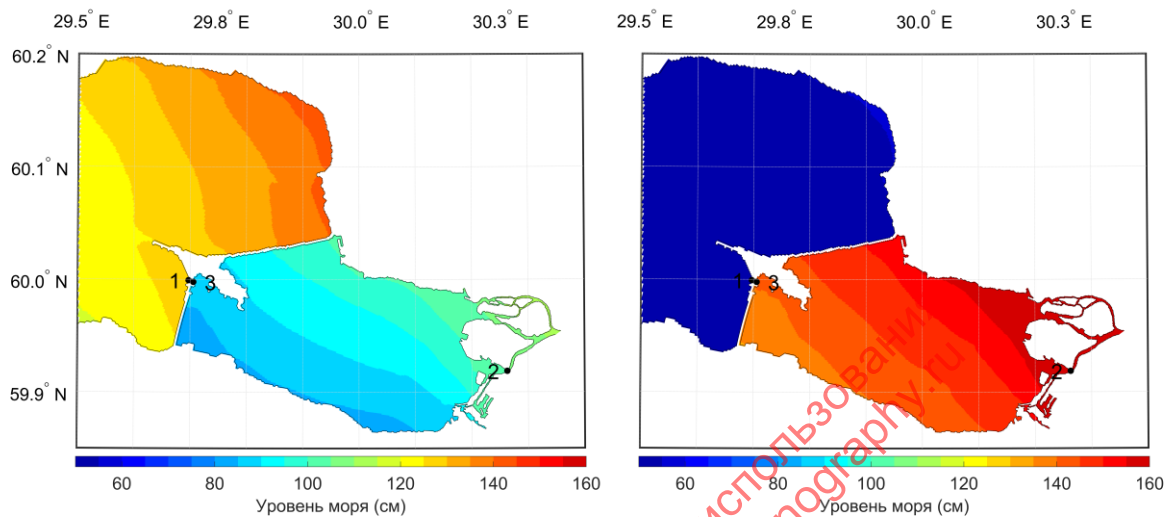


Рисунок 48 - Уровень моря (см). Слева – в момент максимума у дамбы (11 час), справа – в момент уровня 160 см у Горного (31 час).

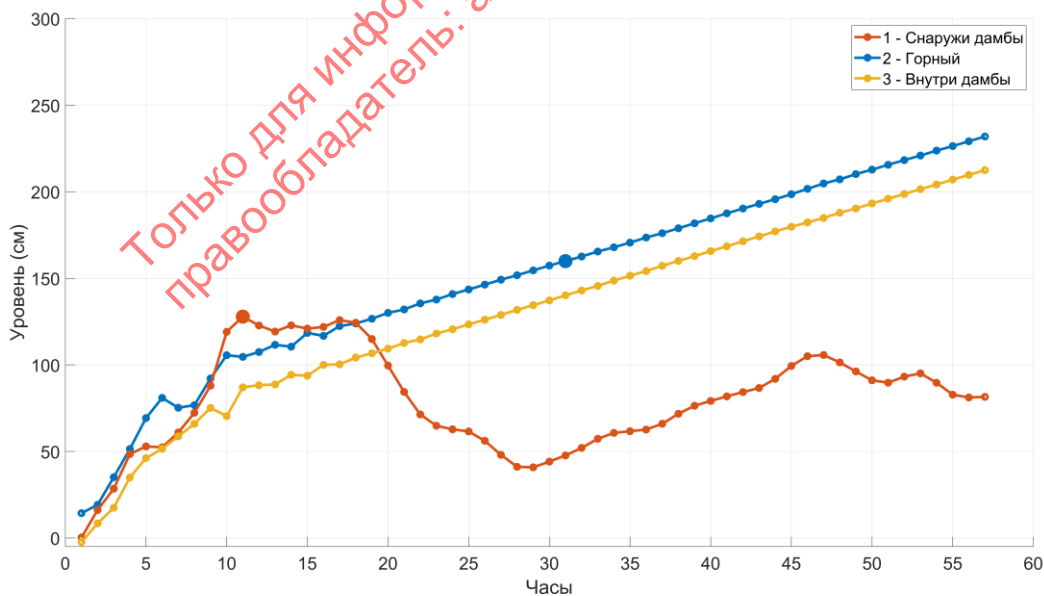


Рисунок 49 - Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Большими точками отмечены максимумы у дамбы и уровень 160 см Горного (11 и 31 час, соответственно).

Выводы по серии экспериментов 14-17

По результатам серии проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

Угроза наводнения возникает при западных и юго-западных ветрах. Сила ветра должна быть выше 16 м/с. Результаты анализа тестовых экспериментов с постоянным ветром западных направлений, показали, что наводненческая ситуация возникает при скоростях ветра от 16 м/с и более. Юго-западные ветра способствуют более продолжительному пику подъема уровня моря в невской акватории.

2.5. Эксперименты 18 - 26

В этой главе описана серия экспериментов, где в качестве форсинга задавался сгенерированный циклон.

18. Береговая линия с намывом, расход Невы 3000 м³/с, скорость циклона 5 м/с, максимальная скорость ветра 16 м/с.

19. Береговая линия с намывом, расход Невы 3000 м³/с, скорость циклона 11 м/с, максимальная скорость ветра 16 м/с.

20. Береговая линия с намывом, расход Невы 3000 м³/с, скорость циклона 15 м/с, максимальная скорость ветра 16 м/с.

21. Береговая линия с намывом, расход Невы 3000 м³/с, скорость циклона 5 м/с, максимальная скорость ветра 22 м/с.

22. Береговая линия с намывом, расход Невы 3000 м³/с, скорость циклона 11 м/с, максимальная скорость ветра 22 м/с.

23. Береговая линия с намывом, расход Невы 3000 м³/с, скорость циклона 15 м/с, максимальная скорость ветра 22 м/с.

24. Береговая линия с намывом, расход Невы 4250 м³/с, скорость циклона 5 м/с, максимальная скорость ветра 22 м/с.

25. Береговая линия с намывом, расход Невы 4250 м³/с, скорость циклона 11 м/с, максимальная скорость ветра 22 м/с.

26. Береговая линия с намывом, расход Невы 4250 м³/с, скорость циклона 15 м/с, максимальная скорость ветра 22 м/с.

Серия экспериментов проводилась следующим образом: в качестве форсинга задается сгенерированный циклон. Параметры циклона – глубина циклона соответствует тому, что максимальный рассчитанный ветер в циклоне равен 16 м/с или 22 м/с, скорость перемещения циклона 5, 11, 15 м/с. Траектория перемещения центра циклона соответствует 62° северной широты. Методика расчета атмосферного давления и ветра описана в главе 1 Данные и методы. Расходы Невы задавались 3000 или 4250 м³/с, береговая линия учитывает намывные территории.

При наличии угрозы наводнения дамба закрывается на отметке 80 см с внешней стороны дамбы. Затем проводится расчет до момента, когда уровень моря снаружи начинает падать и становится меньше, чем уровень моря у ворот дамбы с внутренней стороны. Затем ворота дамбы открываются.

Эксперимент 18

Скорость циклона 5 м/с, максимальный ветер 16 м/с, расход Невы 3000 м³/с. При таких условиях, угрозы наводнения в Санкт-Петербурге не возникает (Рисунок 50, Рисунок 51). Уровень моря в п. Горный поднимается до отметки 95 см и начинает плавно понижаться, период волны, которую сгенерировал циклон, составляет около 50 часов.

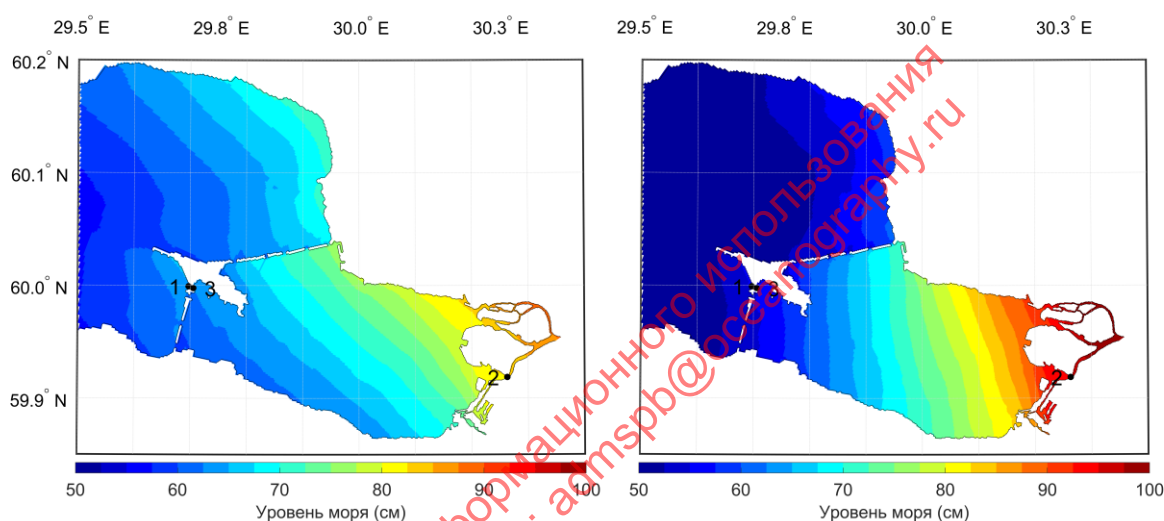


Рисунок 50 - Уровень моря (см). Слева – в момент максимума у дамбы (87 час), справа – в момент максимального уровня у Горного (89 час).

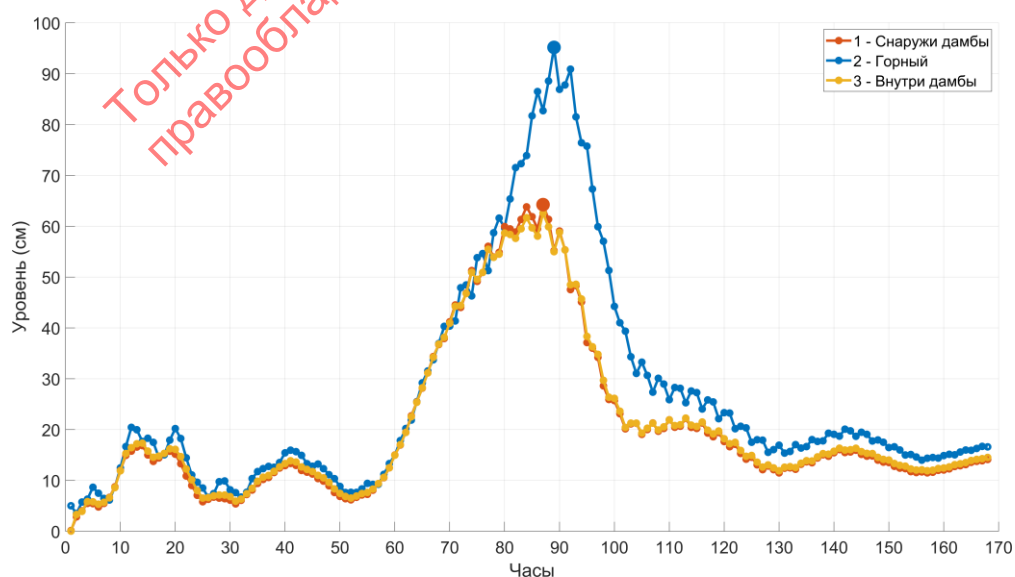


Рисунок 51 - Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Большими точками отмечены максимумы у дамбы и Горного (87 и 89 час, соответственно).

Эксперимент 19

Скорость циклона 11 м/с, максимальный ветер 16 м/с, расход Невы 3000 м³/с. При таких условиях, угрозы наводнения в Санкт-Петербурге также не возникает (Рисунок 52, Рисунок 53). Уровень моря в п. Горный поднимается до отметки 115 см и начинает резко понижаться, период волны, которую сгенерировал циклон, составляет около 20 часов.

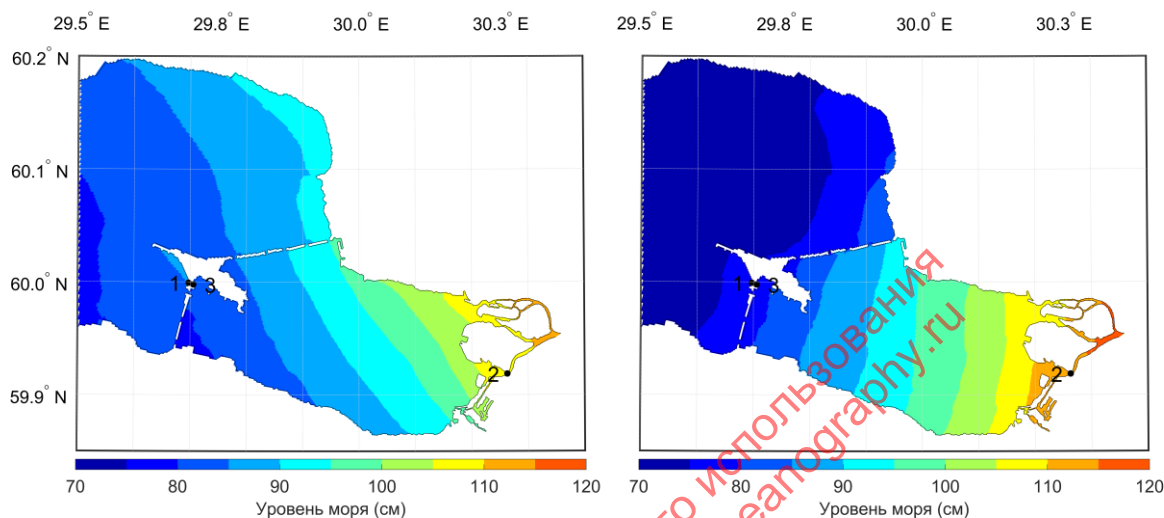


Рисунок 52 - Уровень моря (см). Слева – в момент максимума у дамбы (104 час), справа – в момент максимального уровня у Горного (106 час).

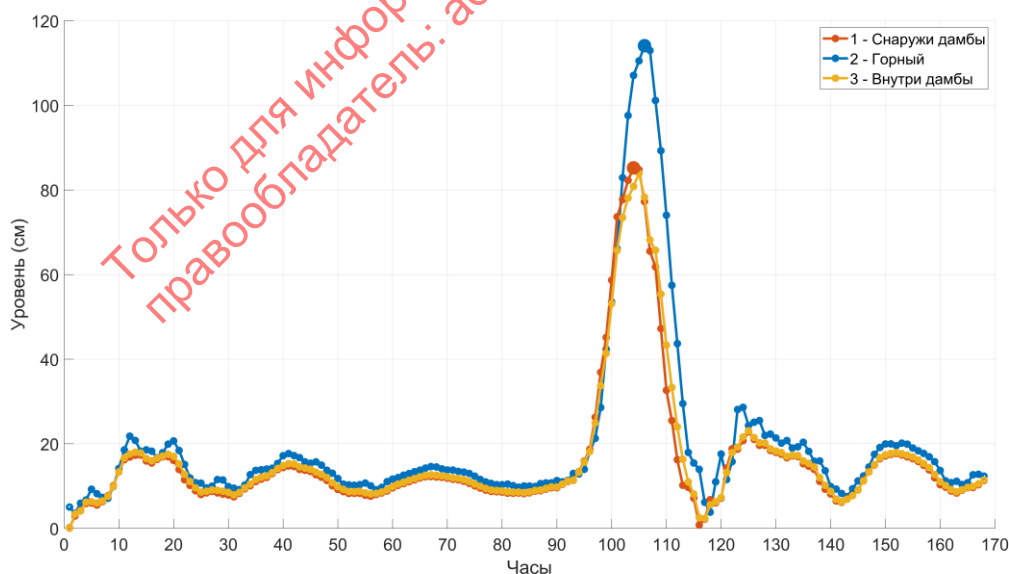


Рисунок 53 - Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Большими точками отмечены максимумы у дамбы и Горного (104 и 106 час, соответственно)

Эксперимент 20

Скорость циклона 15 м/с, максимальный ветер 16 м/с, расход Невы 3000 м³/с. При таких условиях, угрозы наводнения в Санкт-Петербурге также не возникает (Рисунок 54, Рисунок 55). Уровень моря в п. Горный поднимается до отметки 135 см и начинает резко понижаться, период волны, которую сгенерировал циклон, составляет около 18 часов.

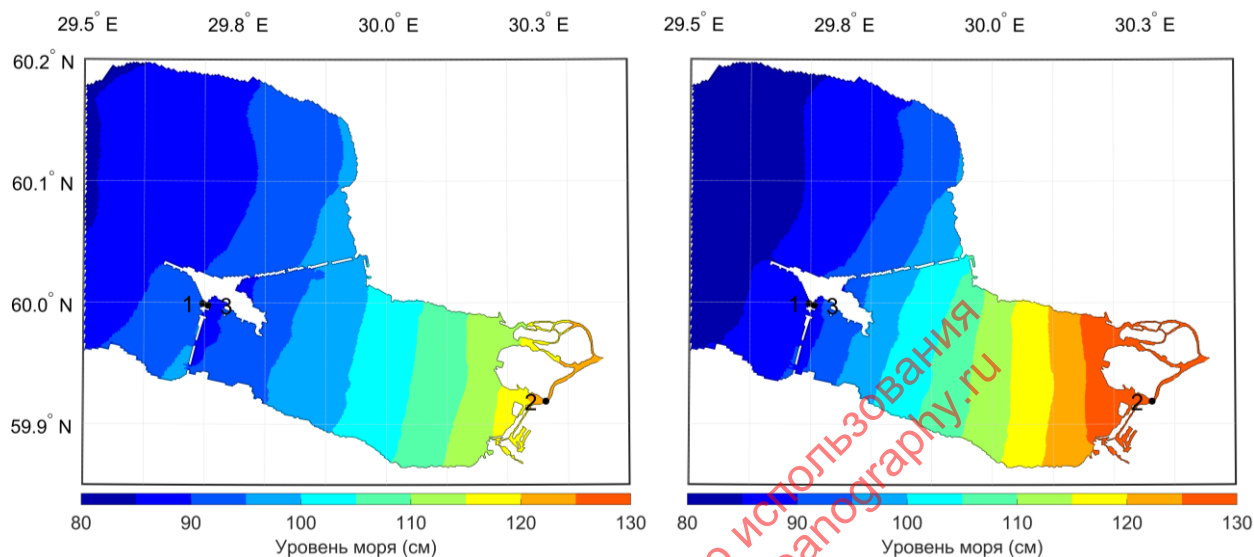


Рисунок 54 - Уровень моря (см). Слева – в момент максимума у дамбы (109 час), справа – в момент максимального уровня у Горного (110 час).

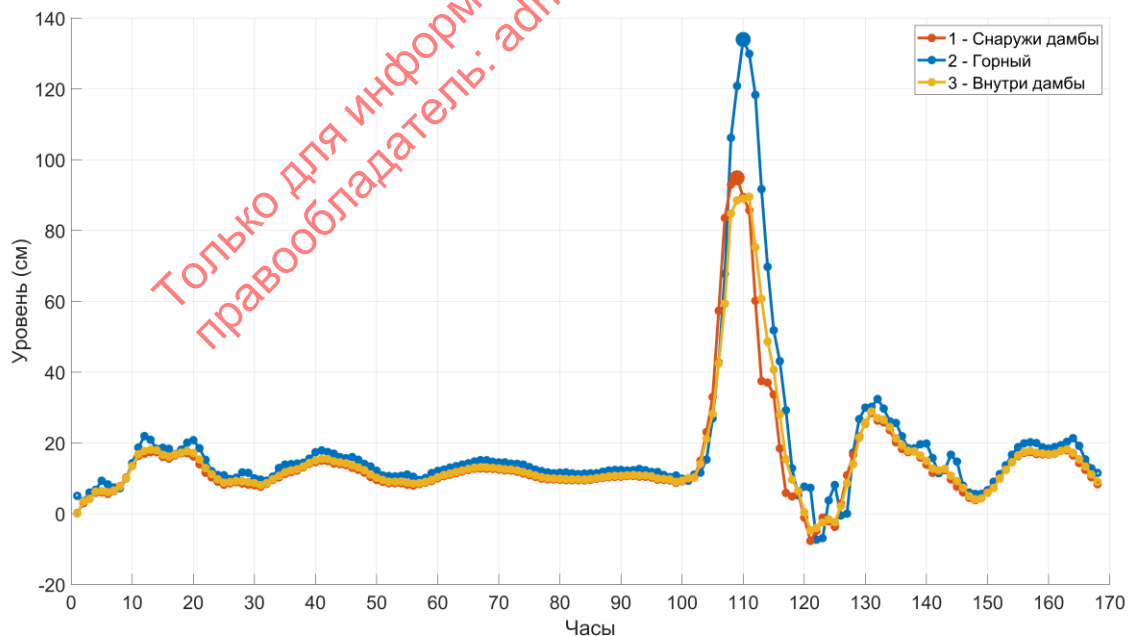


Рисунок 55 - Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Большими точками отмечены максимумы у дамбы и Горного (109 и 110 час, соответственно).

Эксперименты 21, 24

Скорость циклона 5 м/с, расход р. Невы 3000 м³/с, максимальная скорость ветра 22 м/с. При заданных условиях, угроза наводнения в Санкт-Петербурге возникает (Рисунок 56, Рисунок 57). Уровень моря в п. Горный поднимается до отметки 197 см и начинает плавно понижаться, период волны, которую сгенерировал циклон, составляет около 55 часов.

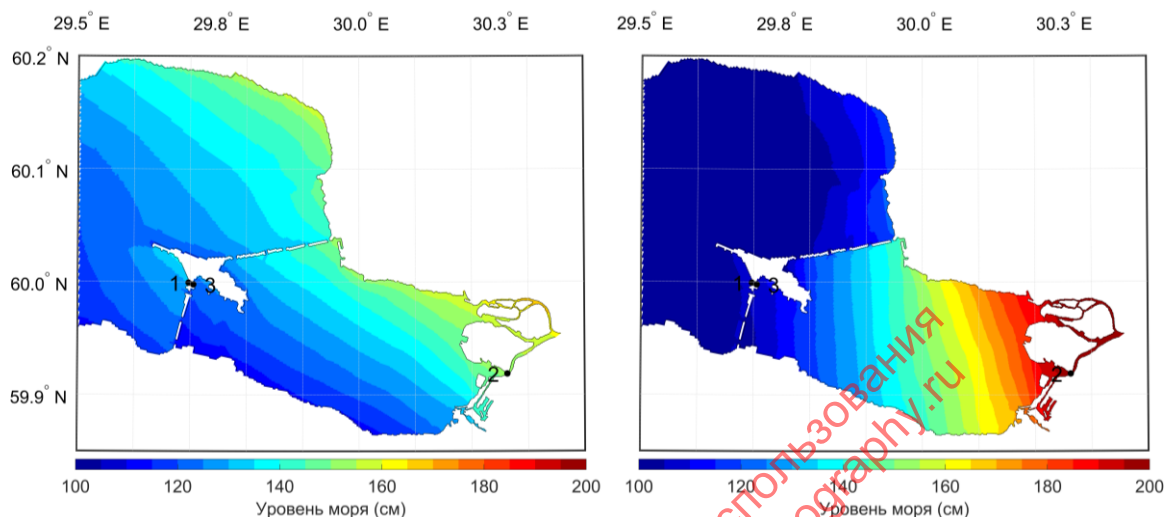


Рисунок 56 - Уровень моря (см). Слева – в момент максимума у дамбы (84 час), справа – в момент максимального уровня у Горного (89 час).

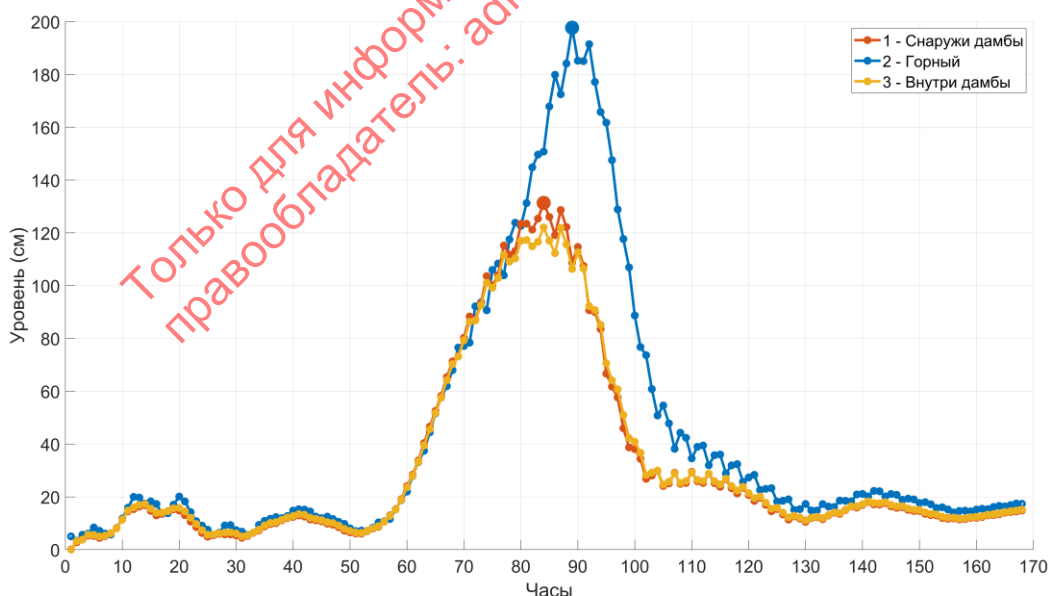


Рисунок 57 - Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Большими точками отмечены максимумы у дамбы и Горного (84 и 89 час, соответственно).

Последующие проведенные тесты по закрытию и открытию дамбы показали (Рисунок 58, Рисунок 59) что, при закрытии ворот дамбы на отметке уровня с внешней стороны в 80 см, в п.

Горный, уровень моря продолжает стремительно расти за счет нагонного действия ветра и стока р. Невы. Значение уровня моря в 160 см отмечается на 18 часу закрытой дамбы, при этом открыть дамбу возможно только на 22 час с момента ее закрытия, т.к. с внешней стороны уровень хотя и начал понижаться, но был выше уровня моря с внутренней стороны в районе ворот. Максимальное значение уровня в Санкт-Петербурге при закрытой дамбе составило 182 см. Перекос уровня моря от ворот дамбы до п. Горный, в момент максимального значения уровня в Санкт-Петербурге, при таких неблагоприятных условиях, составил 84 см.

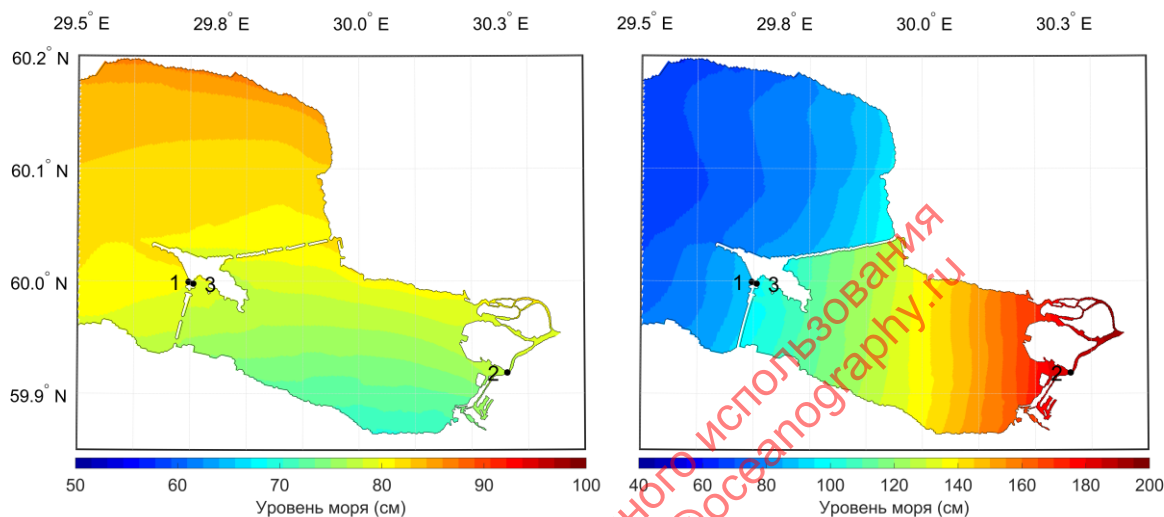


Рисунок 58 - Уровень моря (см). Слева – в момент закрытия дамбы (70 час), справа – в момент открытия дамбы и максимального уровня у Горного (92 час).

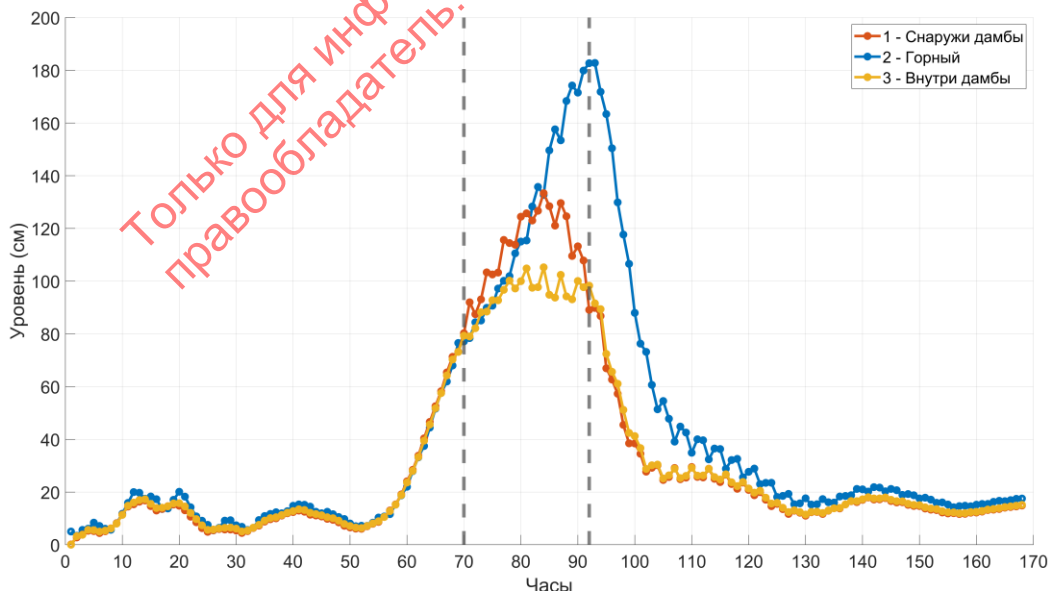


Рисунок 59 - Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Пунктиром отмечено время закрытия и открытия дамбы (70 и 92 час, соответственно).

Последующий сценарий меняет расход р. Невы на $4250 \text{ м}^3/\text{с}$, в ходе которого, проведенные тесты по закрытию и открытию дамбы показали (Рисунок 60, Рисунок 61) что, при закрытии ворот дамбы на отметке уровня с внешней стороны в 80 см, в п. Горный, уровень моря продолжает стремительно расти за счет нагонного действия ветра и стока р. Невы. Значение уровня моря в 160 см отмечается на 17 часу закрытой дамбы, при этом открыть дамбу возможно только на 22 час с момента ее закрытия, т.к. с внешней стороны уровень хотя и начал понижаться, но был выше уровня моря с внутренней стороны в районе ворот. Максимальное значение уровня в Санкт-Петербурге при закрытой дамбе составило 200 см. Перекос уровня моря от ворот дамбы до п. Горный, в момент максимального значения уровня в Санкт-Петербурге, при таких неблагоприятных условиях, составил 84 см.

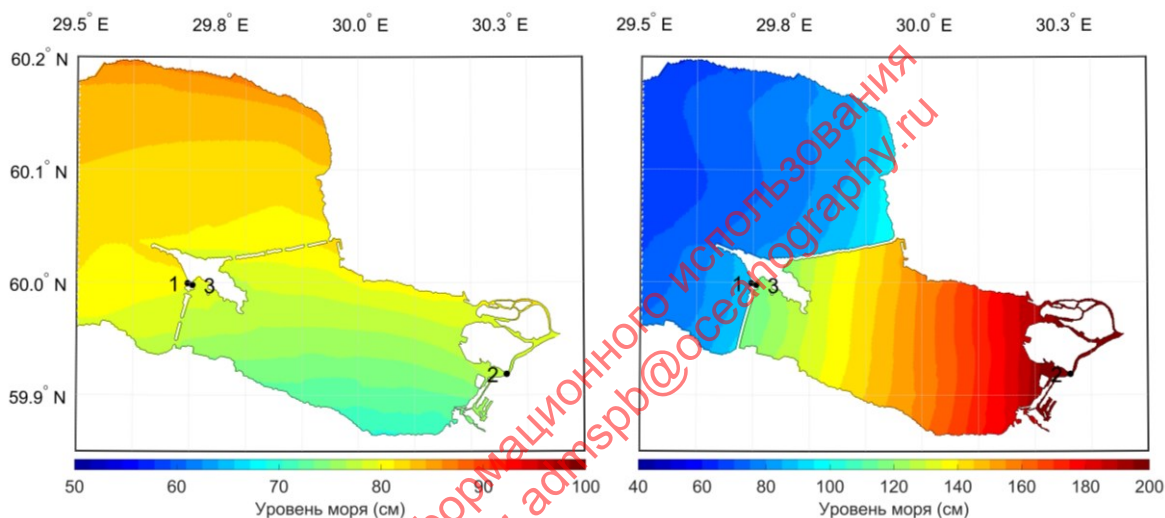


Рисунок 60 - Уровень моря (см). Слева – в момент закрытия дамбы (70 час), справа – в момент максимального уровня у Горного и открытия дамбы (92 час).

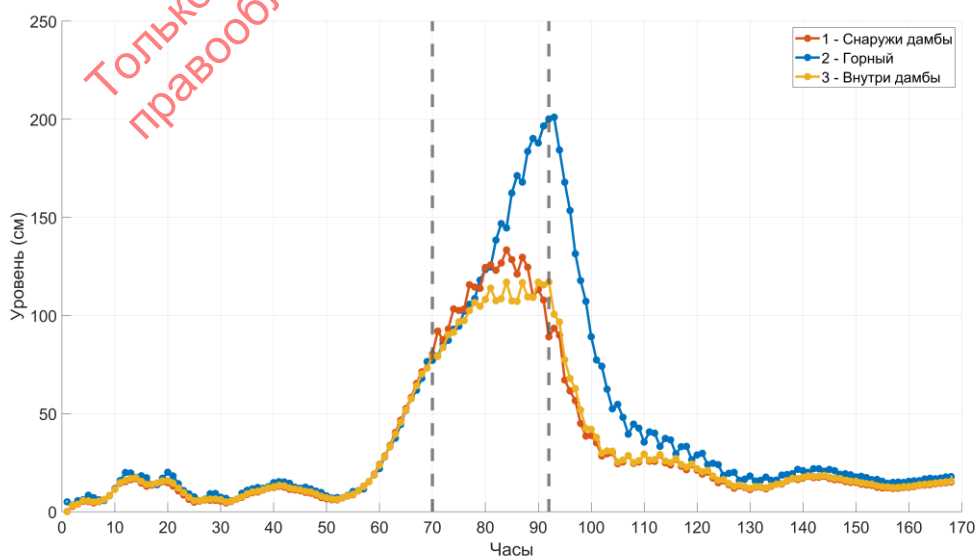


Рисунок 61 - Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Пунктиром отмечено время закрытия и открытия дамбы (70 и 92 час, соответственно).

Эксперименты 22, 25

Скорость циклона 11 м/с, расход р. Невы 3000 м³/с, максимальная скорость ветра 22 м/с. При заданных условиях, угроза наводнения в Санкт-Петербурге возникает (Рисунок 62, Рисунок 63). Уровень моря в п. Горный поднимается до отметки 236 см и начинает резко понижаться, период волны, которую сгенерировал циклон, составляет около 20 часов.

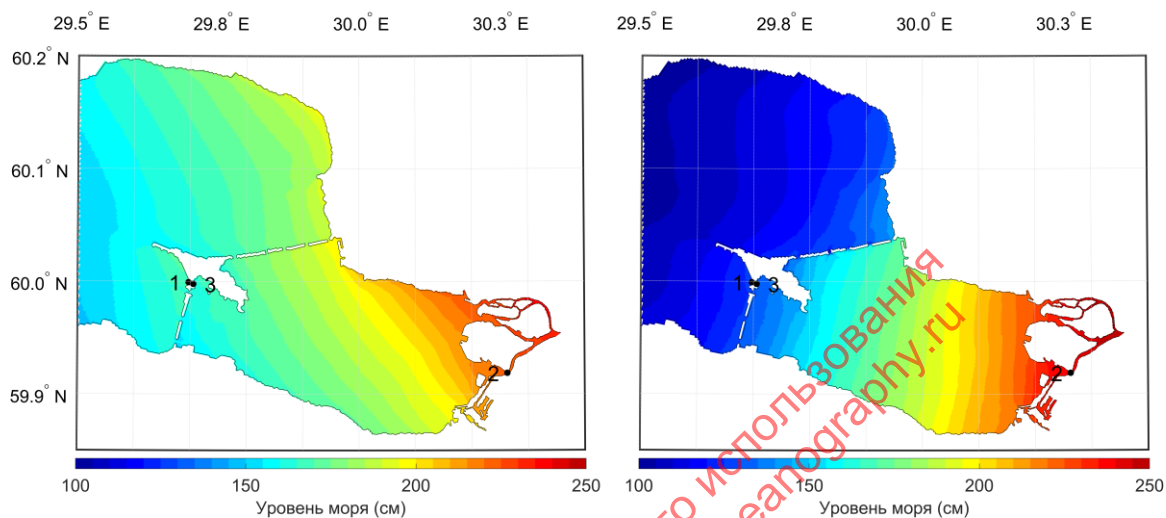


Рисунок 62 - Уровень моря (см). Слева – в момент максимума у дамбы (105 час), справа – в момент максимального уровня у Горного (107 час).

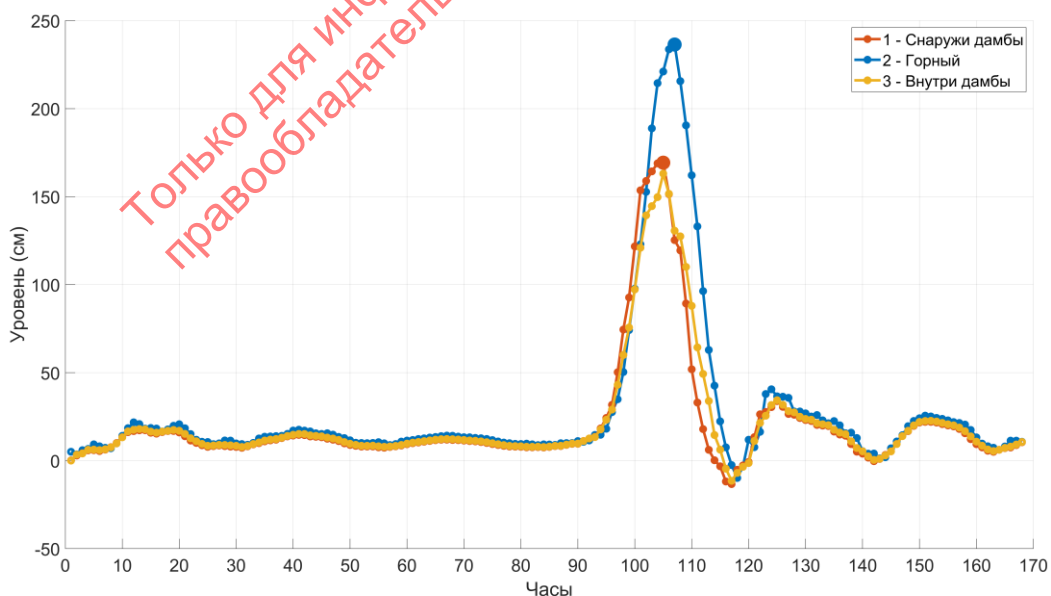


Рисунок 63 - Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Большими точками отмечены максимумы у дамбы и Горного (105 и 107 час, соответственно).

Последующие проведенные тесты по закрытию и открытию дамбы показали (Рисунок 64, Рисунок 65) что, при закрытии ворот дамбы на отметке уровня с внешней стороны в 80 см, в п. Горный, уровень моря продолжает стремительно расти за счет нагонного действия ветра и стока р. Невы, но критических значений не достигает. Максимальное значение уровня моря п. Горный составляет 149 см и отмечается на 8 часу закрытой дамбы, открытие дамбы производится через 11 часов после закрытия т.к. с внешней стороны уровень моря начал понижаться, и стал ниже уровня моря с внутренней стороны в районе ворот. Перекос уровня моря от ворот дамбы до п. Горный, в момент максимального значения уровня в Санкт-Петербурге, при таких неблагоприятных условиях, составил 88 см.

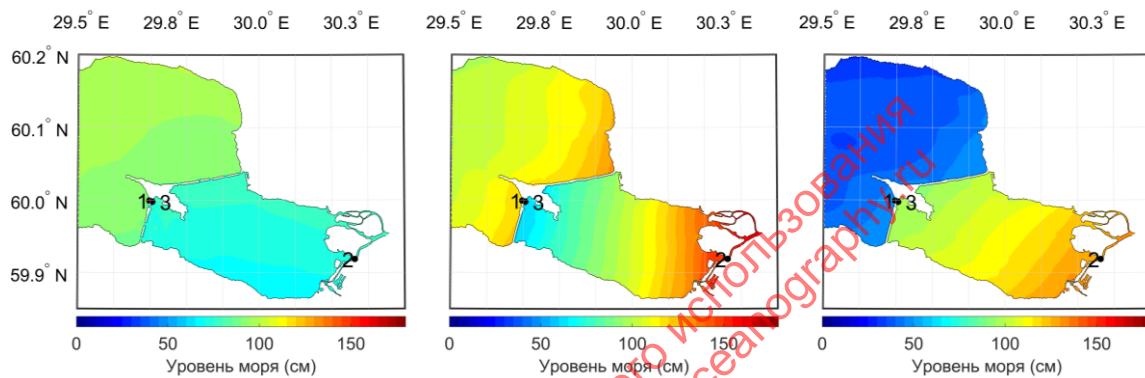


Рисунок 64 - Уровень моря (см). Слева – в момент закрытия дамбы (99 час), в центре – в момент максимального уровня у Горного (107 ч) справа – в открытия дамбы (110 час).

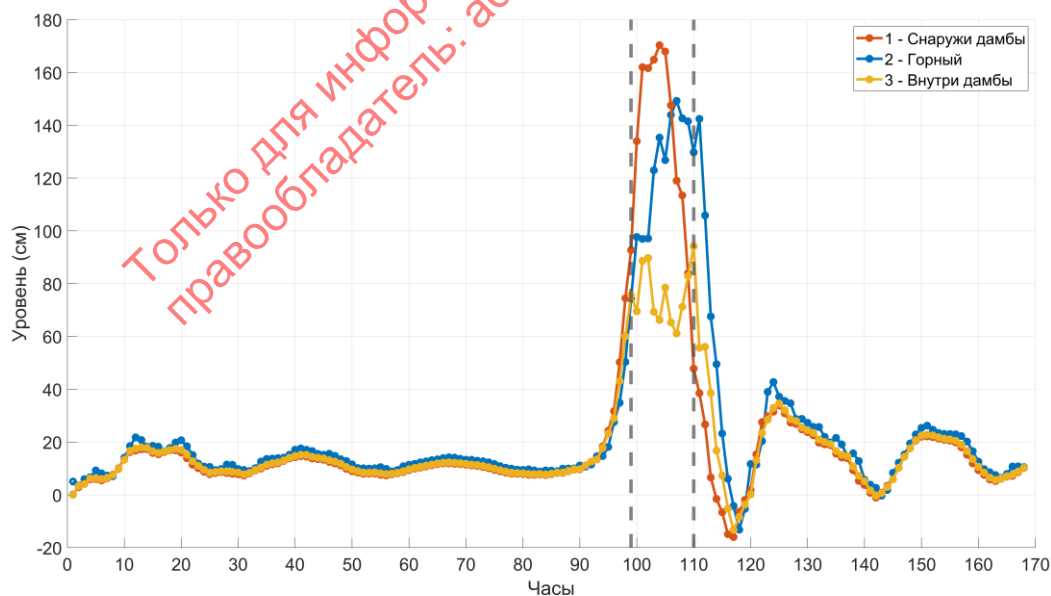


Рисунок 65 - Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Пунктиром отмечено время закрытия и открытия дамбы (99 и 110 час, соответственно).

Последующий сценарий меняет расход р. Невы на 4250 м³/с, в ходе которого, последующие проведенные тесты по закрытию и открытию дамбы показали (Рисунок 66,

Рисунок 67) что, при закрытии ворот дамбы на отметке уровня с внешней стороны в 80 см, в п. Горный, уровень моря продолжает стремительно расти за счет нагонного действия ветра и стока р. Невы, но критических значений не достигает. Максимальное значение уровня моря п. Горный составляет 156 см и отмечается на 8 часу закрытой дамбы, открытие дамбы производится через 11 часов после закрытия т.к. с внешней стороны уровень моря начал понижаться, и стал ниже уровня моря с внутренней стороны в районе ворот. Перекос уровня моря от ворот дамбы до п. Горный, в момент максимального значения уровня в Санкт-Петербурге, при таких неблагоприятных условиях, составил 89 см.

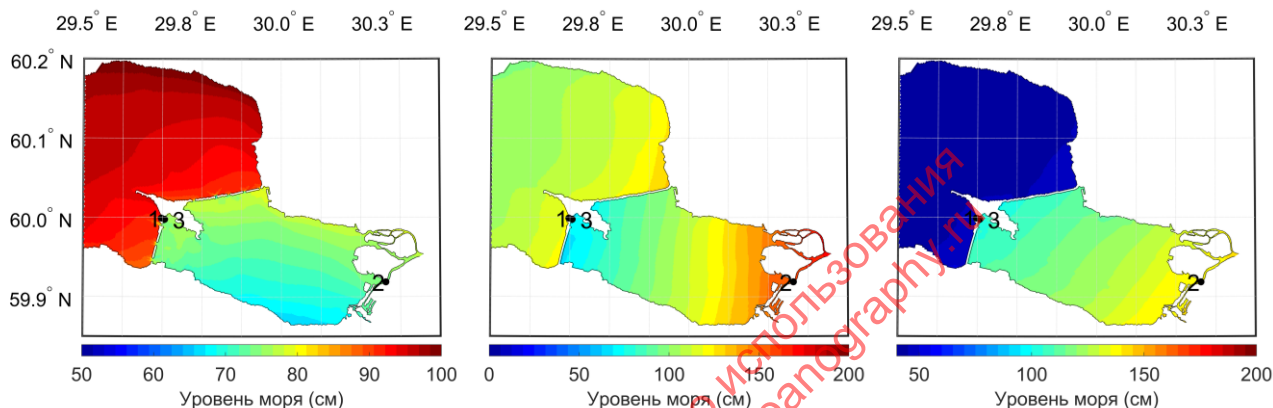


Рисунок 66 - Уровень моря (см). Слева – в момент закрытия дамбы (99 час), в центре – в момент максимального уровня у Горного (107ч) справа – в открытия дамбы (110 час).

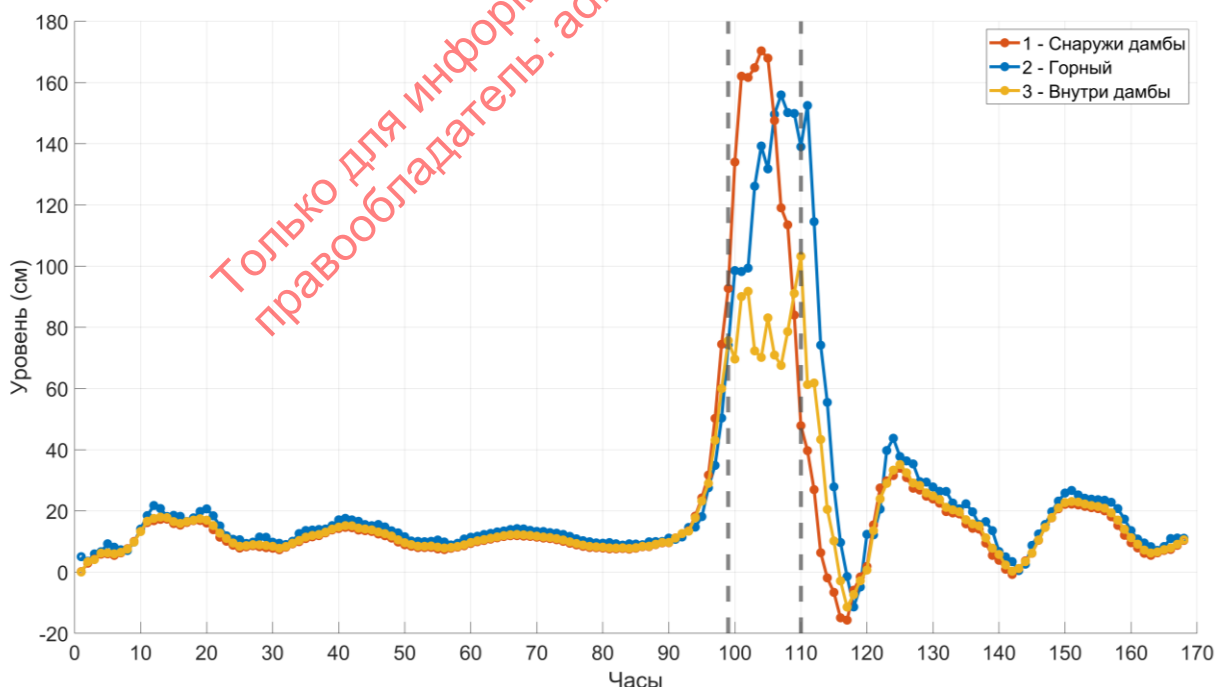


Рисунок 67 - Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Пунктиром отмечено время закрытия и открытия дамбы (99 и 110 час, соответственно).

Эксперименты 23, 26

Скорость циклона 15 м/с, расход р. Невы 3000 м³/с, максимальная скорость ветра 22 м/с. При заданных условиях, угроза наводнения в Санкт-Петербурге возникает (Рисунок 68, Рисунок 69). Уровень моря в п. Горный поднимается до отметки 255 см и начинает резко понижаться, период волны, которую сгенерировал циклон, составляет около 20 часов.

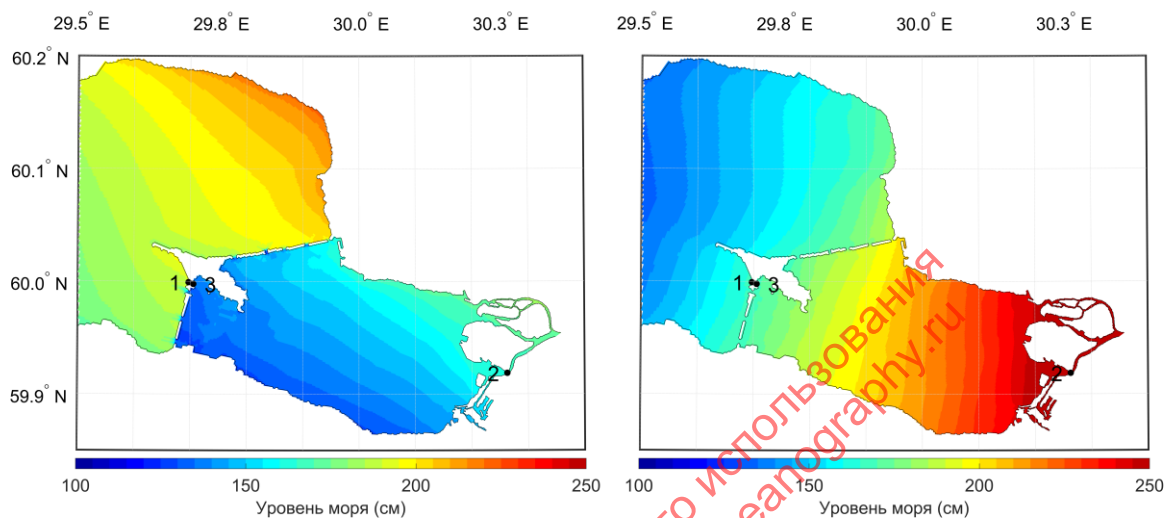


Рисунок 68 - Уровень моря (см). Слева – в момент максимума у дамбы (108 час), справа – в момент максимального уровня у Горного (111 час).

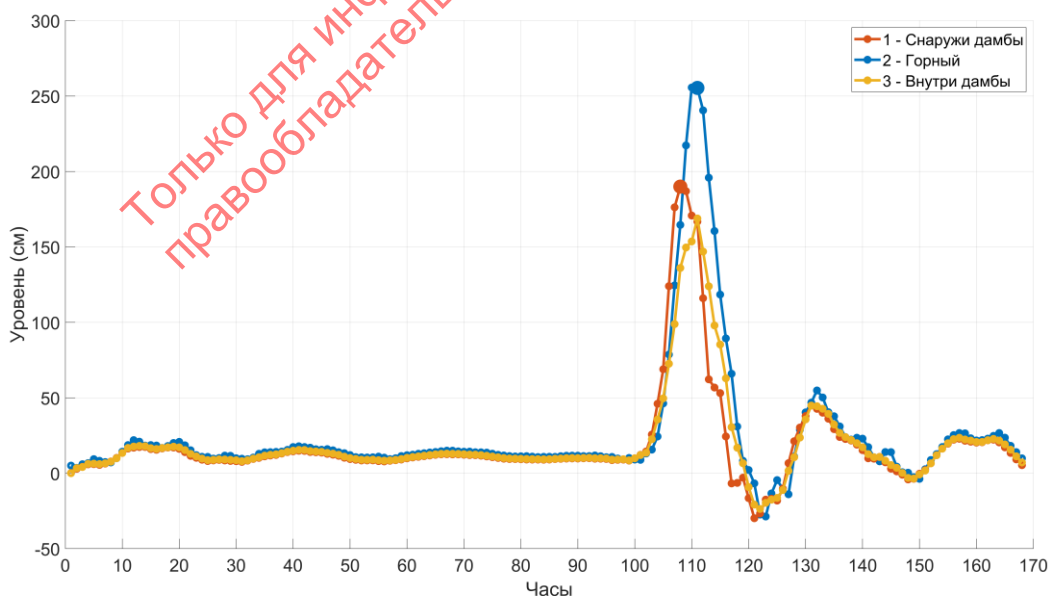


Рисунок 69 - Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Большими точками отмечены максимумы у дамбы и Горного (108 и 111 час, соответственно).

Последующие проведенные тесты по закрытию и открытию дамбы показали (Рисунок 70, Рисунок 71) что, при закрытии ворот дамбы на отметке уровня с внешней стороны в 80 см, в п. Горный, уровень моря продолжает стремительно расти за счет нагонного действия ветра и стока р. Нева, но критических значений не достигает. Максимальное значение уровня моря п. Горный составляет 154 см и отмечается на 2 часу закрытой дамбы, открытие дамбы производится через 7 часов после закрытия т.к. с внешней стороны уровень моря начал понижаться, и стал ниже уровня моря с внутренней стороны в районе ворот. Перекос уровня моря от ворот дамбы до п. Горный, в момент максимального значения уровня в Санкт-Петербурге, при таких неблагоприятных условиях, составил 109 см.

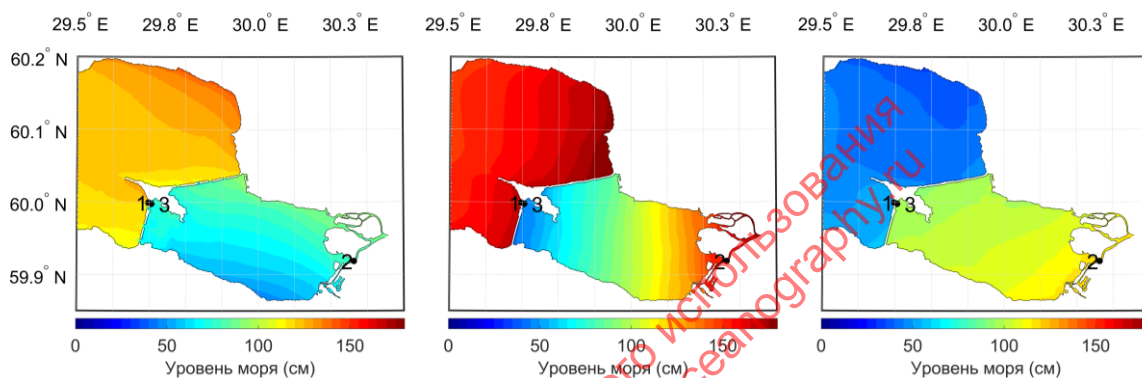


Рисунок 70 - Уровень моря (см). Слева – в момент закрытия дамбы (106 час), в центре – в момент максимального уровня у Горного (108 ч) справа – в открытия дамбы (113 час).

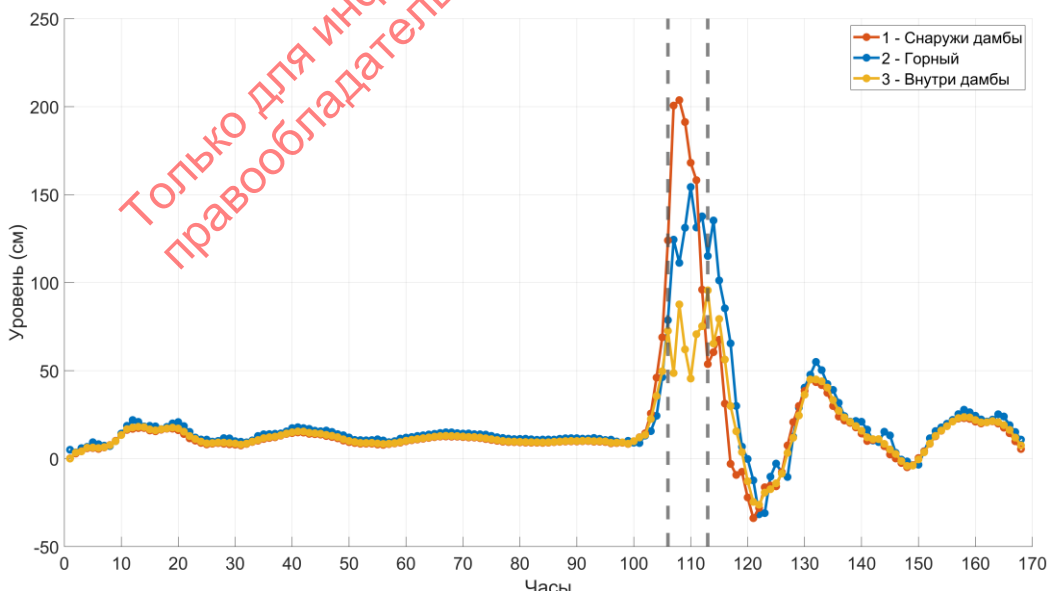


Рисунок 71 - Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Пунктиром отмечено время закрытия и открытия дамбы (106 и 113 час, соответственно).

Последующий сценарий меняет расход р. Невы на $4250 \text{ м}^3/\text{с}$, в ходе которого, проведенные тесты по закрытию и открытию дамбы показали (Рисунок 72, Рисунок 73) что, при закрытии ворот дамбы на отметке уровня с внешней стороны в 80 см, в п. Горный, уровень моря продолжает стремительно расти за счет нагонного действия ветра и стока р. Нева, но критических значений не достигает. Максимальное значение уровня моря п. Горный составляет 157 см и отмечается на 2 часу закрытой дамбы, открытие дамбы производится через 7 часов после закрытия т.к. с внешней стороны уровень моря начал понижаться, и стал ниже уровня моря с внутренней стороны в районе ворот. Перекос уровня моря от ворот дамбы до п. Горный, в момент максимального значения уровня в Санкт-Петербурге, при таких неблагоприятных условиях, составил 109 см.

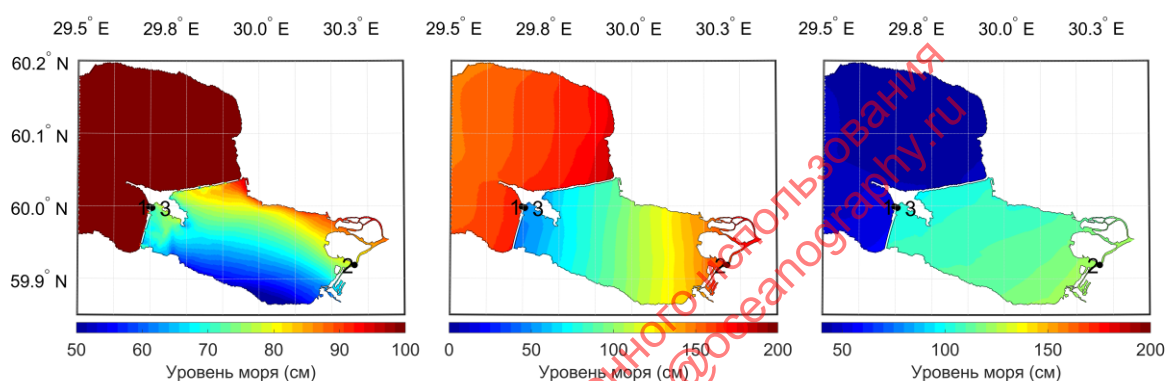


Рисунок 72 - Уровень моря (см). Слева – в момент закрытия дамбы (106 час), в центре – в момент максимального уровня у Горного (110 ч) справа – в открытия дамбы (113 час).

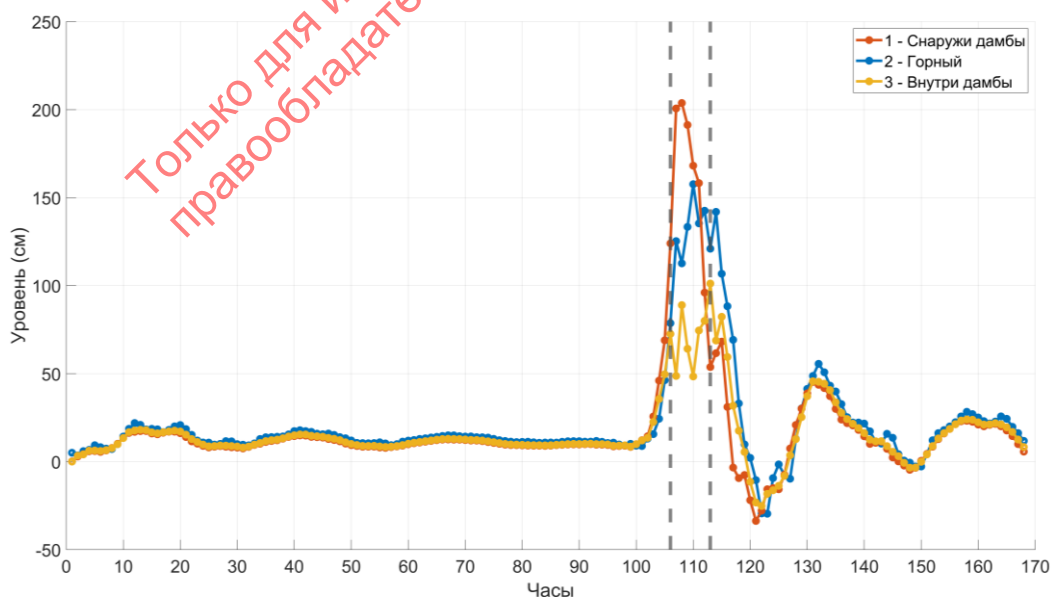


Рисунок 73 - Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Пунктиром отмечено время закрытия и открытия дамбы (106 и 113 час, соответственно).

Выводы по экспериментам 18-26

Возникновение угрозы наводнения происходит при любой скорости прохождения циклона, но при этом максимальная скорость ветра должна быть более 16 м/с. Скорость прохождения циклона влияет на скорость роста и падения уровня. Чем меньше скорость циклона, тем больше период нагонной волны, и тем больше вероятность возникновения наводнения при закрытой дамбе.

Речной сток влияет на уровень воды в акватории только при закрытии дамбы. С обеспеченностью в 50% сток Невы в период штормовых нагонов превышает 3000 м³/с. При этом увеличенный сток Невы относительно среднего, при закрытой дамбе, сокращает время наступления максимума уровня внутри акватории и соответственно длительность периода закрытия дамбы. При этом дамбу не всегда можно открыть при достижении уровня моря внутри акватории, критических значений, т.к. с внешней стороны дамбы может наблюдаться еще более высокий уровень моря.

Только для информационного использования
правообладатель: admspb@oceanography.ru

3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАБОТЕ КЗС

1. Результаты численных экспериментов показали, что закрытие дамбы следует проводить при достижении отметки 80 см над нулём Кронштадтского футштока (НКФ). При расходе Невы около $4080 \text{ м}^3/\text{с}$ и при закрытии дамбы при 80 см с внешней стороны, во избежание резкого подъема уровня моря внутри закрытой акватории до опасных отметок, необходимо открыть дамбу сразу, как только снаружи ворот уровень начнет снижаться, но не позднее 26 – 27 часов от закрытия дамбы.

2. При прохождении над Балтийским морем атмосферного циклона со скоростью 5 м/с, расходе р. Невы $3000 \text{ м}^3/\text{с}$ и максимальной скорости ветра 22 м/с в Санкт-Петербурге возникает угроза наводнения. Рекомендуется закрыть ворота дамбы на отметке уровня с внешней стороны в 80 см. Открытие дамбы рекомендуется не позже, чем через 22 часа с момента ее закрытия.

3. При прохождении над Балтийским морем атмосферного циклона со скоростью 5 м/с, расходе р. Невы $4250 \text{ м}^3/\text{с}$ и максимальной скорости ветра 22 м/с в Санкт-Петербурге возникает угроза наводнения. Рекомендуется закрыть ворота дамбы на отметке уровня с внешней стороны в 80 см. Открытие дамбы рекомендуется не позже, чем через 22 часа с момента ее закрытия.

4. При прохождении над Балтийским морем атмосферного циклона со скоростью 11 м/с, расходе р. Невы $3000 \text{ м}^3/\text{с}$ и максимальной скорости ветра 22 м/с в Санкт-Петербурге возникает угроза наводнения. Рекомендуется закрыть ворота дамбы на отметке уровня с внешней стороны в 80 см. Открытие ворот дамбы рекомендуется не позже, чем через 11 часов с момента ее закрытия.

5. При прохождении над Балтийским морем атмосферного циклона со скоростью 11 м/с, расходе р. Невы $4250 \text{ м}^3/\text{с}$ и максимальной скорости ветра 22 м/с в Санкт-Петербурге возникает угроза наводнения. Рекомендуется закрыть ворота дамбы на отметке уровня с внешней стороны в 80 см. Открытие ворот дамбы рекомендуется не позже, чем через 11 часов с момента ее закрытия.

6. При прохождении над Балтийским морем атмосферного циклона со скоростью 15 м/с, расходе р. Невы $3000 \text{ м}^3/\text{с}$ и максимальной скорости ветра 22 м/с в Санкт-Петербурге возникает угроза наводнения. Рекомендуется закрыть ворота дамбы на отметке уровня с внешней стороны в 80 см. Открытие ворот дамбы рекомендуется не позже, чем через 7 часов с момента ее закрытия.

7. При прохождении над Балтийским морем атмосферного циклона со скоростью 15 м/с, расходе р. Невы $4250 \text{ м}^3/\text{с}$ и максимальной скорости ветра 22 м/с в Санкт-Петербурге возникает угроза наводнения. Рекомендуется закрыть ворота дамбы на отметке уровня с внешней стороны в 80 см. Открытие ворот дамбы рекомендуется не позже, чем через 7 часов с момента ее закрытия.

8. Для повышения эффективности работы КЗС и уменьшения экономических издержек при опасных подъемах уровня моря в Невской губе и закрытия створов КЗС рекомендуется провести

разработку и внедрение в опытную эксплуатацию, а затем и в оперативную работу новую гидродинамическую модель. Для прогноза возможных опасных подъемов уровня моря использовать качественные исходные данные и проводить их детальный анализ, что позволит определить слабые стороны текущих данных, такие как недостаточная детализация или недооценка скоростей ветра.

8.1. Рекомендуется разработать методы корректировки данных реанализа на основе измерений локальных станций. Например, использовать методы масштабирования и калибровки, учитывающие особенности регионального атмосферного циркуляционного режима.

8.2. Включить коррекцию ветрового поля для повышения точности моделирования подъёмов уровня моря, учитывая возможность значительного занижения экстремальных значений ветра в исходных данных реанализа.

8.3. Адаптировать прогнозные модели уровня моря и наводнений с использованием скорректированных атмосферных данных. Это позволит учесть локальные особенности формирования штормовых нагонов и их взаимодействие с расходами р. Невы.

8.4. Проводить регулярную актуализацию моделей и реанализа по мере появления новых данных и методов обработки, обеспечивая оперативность и надежность прогнозов.

8.5. Внедрить корректировку атмосферных и гидрологических данных в автоматизированные системы предупреждения угроз наводнений (СПУН), чтобы повысить точность и заблаговременность прогнозов.

8.6. На основании результатов моделирования разработать регламенты эксплуатации КЗС для каждого типа наводнения, включая:

- Временной интервал и уровень воды, при которых необходимо начинать закрытие затворов.
- Порядок и скорость открытия/закрытия затворов в зависимости от условий внутри и вне Невской губы.
- Меры по предотвращению опасного подъема уровня внутри акватории Невской губы при длительном закрытии дамбы.
- Создать сценарии аварийной эксплуатации КЗС в условиях неожиданных или крайне быстрых изменений метеорологических и гидрологических условий.

8.7. Разработать алгоритмы автоматизированного управления затворами на основе оперативных данных мониторинга уровня воды, скорости ветра, атмосферного давления и стока Невы. Эти алгоритмы должны учитывать разработанные сценарии и быть способны быстро адаптироваться к изменяющимся условиям.

8.8. Организовать обучение операторов КЗС по новым регламентам, включая работу с адаптивными алгоритмами и автоматизированными системами.

8.9. Проводить регулярные учения с моделированием различных сценариев наводнений, чтобы обеспечить готовность персонала к любой чрезвычайной ситуации.

9. Выполнить моделирование подъёмов уровня моря и их воздействия как на внутренние, так и на внешние территории, прилегающие к КЗС. Для внутренних территорий, таких как Невская губа и дельта р. Невы, провести оценку влияния работы КЗС на подтопления, вызванные уклоном уровня воды и накоплением речного стока. Для внешних территорий, находящихся к западу от КЗС, оценить влияние штормовых нагонов и размыва береговой линии, связанных с повышением уровня моря при закрытых затворах.

10. Проводить корректировку градостроительных планов с учетом рисков для внутренних и внешних территорий.

Внутренние территории:

- Учитывать увеличение уровня моря в зонах Большой и Малой Невы из-за уклона водной поверхности при закрытых затворах.
- Проектировать и модернизировать инфраструктуру с учётом рисков подтопления, включая подъем отметок жилых и промышленных объектов.

Внешние территории:

- Разработать меры защиты от размыва и подтопления берегов, включая строительство волнозащитных сооружений и укрепление природных барьеров.
- Включить элементы адаптации к штормовым нагонным ситуациям в проекты развития пляжных и прибрежных зон.

11. Создать систему управления рисками на внутренних и внешних территориях

11.1. Установить систему раннего предупреждения для внутренних и внешних территорий, чтобы минимизировать ущерб от экстремальных событий.

11.2. Разработать планы восстановления территорий после наводнений, включая реабилитацию инфраструктуры и укрепление повреждённых участков.

12. Создать единый план развития территорий вокруг КЗС с учетом прогнозируемого роста уровня моря и изменения частоты штормов. Обеспечить взаимодействие между проектами внутренних и внешних зон, чтобы минимизировать общий риск для Санкт-Петербурга и прилегающих территорий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Глобальное повышение уровня Мирового океана и более быстрый рост уровня Балтийского моря, особенно в восточной части Финского залива, создают значительные риски для прибрежных территорий. Средняя скорость повышения уровня Балтики превышает показатели Мирового океана, достигая 5-6 мм/год в Финском заливе. Это увеличивает вероятность штормовых нагонов, наводнений и эрозии берегов, что требует развития систем защиты и адаптации.

Комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга (КЗС) успешно предотвращает большинство наводнений, но имеет ограничения. В случаях длительного закрытия затворов возникают опасные подъемы уровня в Невской губе, особенно при сильных западных ветрах и высоком стоке р. Невы. Также отмечено негативное воздействие КЗС на прибрежные районы к западу от сооружений, включая увеличение уровня воды до 10% в штормовые периоды.

Моделирование показало, что намывные территории в Невской губе оказывают локальное влияние на уровень моря, увеличивая его на 2-5 см вблизи Васильевского острова и несколько больше. Это подчеркивает необходимость учета гидродинамических изменений при планировании и реализации проектов намывных земель.

Проведенные эксперименты с использованием модели INMOM подтвердили её способность воспроизводить опасные подъёмы уровня моря с учетом различных сценариев ветра, стока р. Невы и конфигурации береговой линии. Расчеты показали, что сильные юго-западные ветры (до 25 м/с) и экстремальный сток Невы (до 4170 м³/с) могут привести к особо опасным уровням моря (до 245 см) даже при работающем КЗС.

Воспроизведение катастрофического наводнения 1924 года позволило оценить ограничения модели и выявить недочеты в данных форсинга. Наиболее точные результаты были получены при использовании уточненного ветрового поля с максимальными скоростями до 28 м/с.

Актуальные проекты намыва территорий и градостроительного освоения Невской губы требуют тщательной оценки их влияния на уровень моря. Учитывая прогнозируемые изменения климата и рост экстремальных событий, важным является интеграция выводов отчета в градостроительные планы Санкт-Петербурга.

Рекомендуется проводить дальнейшие исследования с учетом изменений климата, новых данных спутникового мониторинга и улучшения моделей.

Важно оценивать кумулятивное воздействие намывных территорий, изменения стока р. Невы и климатических факторов на уровенный режим в Невской губе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Макринова О.В. Природа ленинградских наводнений // Труды ГГИ. 1954. Vol. 23. P. 5–36.
2. Сводный научно-технический отчет по теме 176 «Метод прогноза Ленинградских наводнений. Ленинград, 1966.
3. Лабзовский Н.А. Непериодические колебания уровня моря. Ленинград: Гидрометеиздат, 1971. 238 p.
4. Померанец К.С. Несчастья невских берегов. Санкт-Петербург: ООО “МиМ-Дельта” М.: Центрполиграф, 2009. 432 p.
5. Захарчук Е.А., Тихонова Н.А. О пространственно-временной структуре и механизмах формирования невских наводнений // Метеорология и гидрология. 2011. Vol. 8. P. 54–64.
6. Madsen K.S. et al. Sea Level Trends and Variability of the Baltic Sea From 2D Statistical Reconstruction and Altimetry // Front Earth Sci (Lausanne). 2019. Vol. 7.
7. Leppäranta M., Myrberg K. Physical Oceanography of the Baltic Sea // Physical Oceanography of the Baltic Sea. 2009.
8. Vitousek S. et al. Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea-level rise // Sci Rep. 2017. Vol. 7, № 1.
9. Павловский А.А., Епифанова Н.Н., Шамшурин В.И. О градостроительных особенностях формирования искусственных земельных участков Санкт-Петербурга. // Охрана окружающей среды Санкт-Петербурга. 2021. Vol. 4, № 22. P. 26–30.
10. Померанец К.С. О статистике наводнений в Петербурге // Метеорология и гидрология. 1999. Vol. 8. P. 105–110.
11. Исанин Н. Морской энциклопедический справочник: в двух томах. Том 2. / ed. Исанин Н.Н. Ленинград: Судостроение, 1986. 520 p.
12. Аверкиев А.С., Клеванный К.А. Определение траекторий и скоростей циклонов, приводящих к максимальным подъемам воды в Финском заливе // Метеорология и гидрология. 2007. Vol. 8. P. 55–63.
13. Захарчук Е.А., Сухачев В.Н., Тихонова Н.А. Механизмы опасных подъёмов уровня моря в Финском заливе. Санкт-Петербург: Петербург-XXI Век, 2017. 151 p.
14. Захарчук Е.А., Сухачев В.Н., Тихонова Н.А. О пространственной структуре и распространении волн невских наводнений // Метеорология и гидрология. 2020. Vol. 4. P. 42–53.
15. Horsburgh K. et al. “Grey swan” storm surges pose a greater coastal flood hazard than climate change // Ocean Dyn. 2021. Vol. 71, № 6–7.

16. Захарчук Е.А., Сухачев В.Н., Тихонова Н.А. Штормовые нагоны в Финском заливе Балтийского моря // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. Науки о Земле. 2021. Vol. 66, № 4. P. 781–805.
17. Захарчук Е.А. et al. Нестационарность гидрометеорологических процессов Балтийского моря в условиях меняющегося климата. // Труды ГОИН. 2017. Vol. 218. P. 6–62.
18. Guérou A. et al. Current observed global mean sea level rise and acceleration estimated from satellite altimetry and the associated measurement uncertainty // Ocean Science. 2023. Vol. 19, № 2.
19. Passaro M. et al. Absolute Baltic Sea Level Trends in the Satellite Altimetry Era: A Revisit // Front Mar Sci. 2021. Vol. 8.
20. Захарчук Е.А., Тихонова Н.А., Сухачев В.Н. Изменчивость уровня Балтийского моря. Ростов-на-Дону: Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг. Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. , 2023. 57–62 р.
21. Клеванный К.А., Колесов А.М., Мостаманди М.-С.В. Прогноз наводнений в Санкт-Петербурге и восточной части Финского залива в условиях работы комплекса защитных сооружений // Метеорология и гидрология. 2015. Vol. 2. P. 61–70.
22. Клеванный К.А., Аверкиев А.С. Влияние работы комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений на подъем уровня воды в восточной части Финского залива. // Научно-теоретический журнал «Общество Среда Развитие». 2011. Vol. 1. P. 204–209.
23. Павловский А.А., Менжулин Г.В. Изменения климата и оценка перспективы использования в петербургском градостроительстве искусственных намывных территорий. // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2019. Vol. 593. P. 70–84.
24. Дианский Н.А. et al. Моделирование муссонной циркуляции Индийского океана с высоким пространственным разрешением // Океанология. 2006. Vol. 46, № 4. P. 421–442.
25. Zalesny V.B. et al. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2012. Vol. 27, № 1.
26. Дианский Н.А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. Москва: Физматлит, 2013. 272 р.

27. Brydon D., Sun S., Bleck R. A new approximation of the equation of state for seawater, suitable for numerical ocean models // *J Geophys Res Oceans*. 1999. Vol. 104, № C1.
28. Яковлев Н.Г. Восстановление крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана в 1948-2002 гг. Часть 1: Численная модель и среднее состояние // *Изв. РАН. ФАО*. 2009. Vol. 45, № 3. P. 1–16.
29. Briegleb В.Р. et al. Scientific description of the sea ice component in the Community Climate System Model, version three. Technical Note NCAR/TN-463+STR. Boulder, Colorado, 2004.
30. Hunke E.C., Dukowicz J.K. An elastic-viscous-plastic model for sea ice dynamics // *J Phys Oceanogr*. 1997. Vol. 27, № 9.
31. Гидрология устьевой области Невы / ed. Байдин С.С. М.: Гидрометеиздат, 1965. 1–384 p.
32. Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146, № 730.
33. Malakar P. et al. Comparison of Reanalysis Data Sets to Comprehend the Evolution of Tropical Cyclones Over North Indian Ocean // *Earth and Space Science*. 2020. Vol. 7, № 2.
34. Бельшев А.П., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А. Вероятностный анализ морских течений. Ленинград: Гидрометеиздат, 1983. 264 p.
35. Методическое письмо по вероятностному анализу векторных временных рядов скоростей течений и ветра / ed. Рожков В.А. Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. 61 p.
36. Li X. et al. Tropical Cyclone Wind Field Reconstruction and Validation Using Measurements from SFMR and SMAP Radiometer // *Remote Sens (Basel)*. 2022. Vol. 14, № 16.
37. Zakharchuk E. et al. Spatiotemporal structure of Baltic free sea level oscillations in barotropic and baroclinic conditions from hydrodynamic modelling // *Ocean Science*. 2021. Vol. 17. P. 543–559.