

РЕФЕРАТ

Отчет 150 с., 165 рис., 35 табл., 128 источн.

НЕВСКАЯ ГУБА, УРОВЕНЬ МОРЯ, КОМПЛЕКС ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ (КЗС), ШТОРМОВЫЕ НАГОНЫ, ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА, СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ, ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, НАВОДНЕНИЯ, МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ, РЕКА НЕВА.

Объектом исследования являются климатическая, межгодовая и сезонная изменчивость гидрофизических характеристик реки Нева, Невской губы и Балтийского моря.

Цель работы:

Комплексная оценка современного гидрологического режима Невской губы и количественное определение вклада ключевых природных (изменение климата) и антропогенных (строительство КЗС, намывные территории) факторов в его многолетнюю, сезонную и экстремальную изменчивость с использованием методов статистического анализа и гидродинамического моделирования.

Только для информационного использования
 правообладатель: admspp@oceano-graph.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА С ОПИСАНИЕМ ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ, ПЛАНИРУЕМЫХ К МОДЕЛИРОВАНИЮ	7
1.1. НЕВСКИЕ НАВОДНЕНИЯ И ЗАЩИТА ОТ НИХ: NEVAE AQUAE CUSTOS	12
1.2. ПРИЧИНЫ НАВОДНЕНИЙ И ОСОБЕННОСТИ ГИДРОЛОГИИ НЕВСКОЙ ГУБЫ	14
1.3. РАННЯЯ БОРЬБА С НАВОДНЕНИЯМИ (XVIII–XIX ВВ.)	14
1.4. ПРОЕКТЫ ЗАЩИТЫ ГОРОДА ДО КОМПЛЕКСА ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ	15
1.5. ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКСА ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ	17
1.6. МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ ЗАЩИТЫ ОТ НАВОДНЕНИЙ	25
1.7. НАМЫВЫ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ: LITUS CREATUM	28
2. ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИИ О РАСХОДАХ И УРОВНЯХ ВОДЫ И ЕЁ ПОДГОТОВКА К УСВОЕНИЮ В ИСПОЛЬЗУЕМОМ МОДЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ	33
2.1. РЕЖИМ РЕЧНОГО СТОКА	33
2.2. РЕЖИМ УРОВНЯ МОРЯ В НЕВСКОЙ ГУБЕ	45
2.3. РЕЖИМ УРОВНЯ ВОДЫ В СИСТЕМЕ «РЕКА НЕВА - НЕВСКАЯ ГУБА»	76
3. ОПИСАНИЕ ОБЩЕЙ АРХИТЕКТУРЫ МОДЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА, ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ И ОСНОВНЫХ ВИДОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПРОДУКЦИИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВЕННОГО РЕЖИМА В ПРЕДЕЛАХ УСТЬЕВОГО ВЗМОРЬЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЯХ: ПРИ НАЛИЧИИ/ОТСУТСТВИИ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ; ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ; ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЛИЧИНАХ ПОСТУПАЮЩЕГО СТОКА РЕКИ. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ	99
3.1. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ	99
3.2. НАЧАЛЬНЫЕ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ	102
3.3. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НЕВСКОЙ ГУБЫ	109
Течения Невской губы	109
Уровень моря	115
3.4. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НАМЫВНЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА УРОВЕНЬ МОРЯ В АКВАТОРИИ НЕВЫ ПРИ ЗАКРЫТОЙ ДАМБЕ	123
3.5. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В НЕВСКОЙ ГУБЕ ПРИ РАЗНЫХ СКОРОСТЯХ ПРОХОДЯЩЕГО ЦИКЛОНА В ПЕРИОД НАВОДНЕНИЙ	129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	143
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	146

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие сокращения и обозначения:

ВМО - Всемирная метеорологическая организация,
ГОИН – Государственный океанографический институт,
ГЛОНАСС - Глобальная навигационная спутниковая система,
ГМС – гидрометеорологическая станция,
ГУПС - Главное управление путей сообщения,
ЕБРР - Европейский банк реконструкции и развития,
ЗСД - Западный скоростной диаметр,
ИВМ РАН - Институт вычислительной математики Российской академии наук,
КЗС – Комплекс защитных сооружений,
РГГМУ - Российский государственный гидрометеорологический университет,
СКО – среднее квадратическое отклонение,
СПУН - Система предупреждения угрозы наводнений,
ФГБУ «Северо-Западное УГМС» - Северо-западное управление гидрометслужбы,
ШН – штормовой нагон,
GPS – global position system,
GRDC - Global Runoff Data Centre,
HIRLAM - High Resolution Limited Area Model,
INMOM - Institute Numerical Mathematics Ocean Model,
MOSE - Modulo Sperimentale Elettromeccanico,
NEMO - Nucleus for European Modelling of the Ocean,

Только для информационного использования
правообладатель: adm@rpp@oceanoigraphy.ru

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время глобальное изменение климата Земли оказывает значительное влияние на состояние Мирового океана, что выражается в перестройке гидрометеорологических условий различных морских акваторий. Наиболее уязвимыми в этом отношении считаются устьевые районы крупных рек, являющиеся комплексными индикаторами как динамических процессов, протекающих на обширных водосборах, так и климатических изменений, регистрируемых непосредственно у морского побережья. Интенсивное смешение морских и речных вод в этой зоне создает уникальные физико-географические особенности региона, определяющие сложный характер взаимодействия факторов среды на границе «вода-суша». Помимо этого, устьевые области традиционно считаются местом активного расселения человека: именно по берегам крупных устьевых систем происходит сосредоточение мировых центров социально-экономической жизни общества.

Актуальность исследований современного состояния устьевых областей северо-запада Европейской части России обусловлена наблюдющейся тенденцией к усилению глобальных климатических процессов, требующих разработки своевременных мер по адаптации и смягчению неблагоприятных последствий. В рамках отмеченной государственной политики дифференцированный мониторинг многолетних изменений гидрологического режима территории становится важнейшим этапом обеспечения национальной безопасности страны на следующие десятилетия.

В данной работе содержится исторический обзор устьевой области Невы с информацией о значительных изменениях ее гидрологического режима (строительство комплекса защитных сооружений, намывные территории), актуализированная информация по гидрологическим характеристикам Невской губы за 50-80 лет, в том числе на основе данных численного гидродинамического моделирования. Для рассматриваемой области приведены результаты анализа изменений межгодовых, сезонных и экстремальных показаний расхода воды в реке Неве. Аналогичные расчёты были проведены для уровня воды в Невской губе и различных районах русла Невы. Приведено описание приливных колебаний уровня Невской губы: даны оценки средней и максимальной высоты прилива, показаны особенности сезонного хода гармонических постоянных. Проведены исследования межгодовой изменчивости штормовых нагонов (количество случаев, высота, продолжительность). Произведен анализ формы распределений ежечасных значений и суточного размаха колебаний уровня Невской губы.

1. ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА С ОПИСАНИЕМ ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ, ПЛАНИРУЕМЫХ К МОДЕЛИРОВАНИЮ.

Санкт-Петербург, основанный Петром I в 1703 году, возник на территории, подверженной частым наводнениям. Город расположен в устье Невы — единственной реки, вытекающей из Ладожского озера. Географическое положение на плоской Приневской низменности, сформировавшейся 10–12 тысяч лет назад после отступления ледника, и наличие мелководной Невской губы, расположенной в устье узкого и протяжённого Финского залива, делают Петербург уязвимым перед натиском природных бедствий, приходящих с Балтики. Нагонные волны, вызванные приходящими с запада циклонами, не раз приводили к катастрофическим наводнениям. Спустя почти два века после основания, в 2011 году, Петербург получил необходимую защиту — Комплекс защитных сооружений от наводнений (КЗС), включающий дамбы, судоходные и водопропускные узлы, автодорожный тоннель и современную систему управления. За первые 13 лет эксплуатации КЗС предотвратил более 30 угроз наводнений, включая резкие нагонные подъёмы уровня воды [1]. КЗС не только берегает город от воды — он стал частью инфраструктуры города, в который интегрированы транспортная система (включая Западный скоростной диаметр) и логистика Большого порта.

Не менее значимыми для развития города стали проекты намыва территорий. Ещё в XVIII веке начались первые работы по осушению болот, отсыпке берегов и изменению русла протоков. Но только в XX–XXI веках Петербург перешёл к масштабному намыву новых районов. Проект «Морской фасад» стал крупнейшим примером: 476 га суши, созданные в акватории Финского залива, превратились в жилую зону для сотен тысяч жителей. м³

Современный Петербург — это город, который научился защищаться и развиваться одновременно. Комплекс защитных сооружений и продуманное освоение намывных территорий делают его уникальным примером адаптации к современным климатическим вызовам.

Происхождение реки Невы неразрывно связано с геологической эволюцией Балтийского моря, развитие которого происходило в несколько этапов, отличавшихся климатическими и геологическими условиями.

Формирование долины Невы началось в голоцене, около 12 000 лет назад, с окончанием Вюрмского оледенения, продлившегося около 100 000 лет. К этому моменту Скандинавский ледниковый щит, ранее покрывавший всю территорию Северной и Центральной Европы, отступает к району Фенноскандии, оставляя за собой огромную впадину, заполненную талой водой (Рисунок 1А, Рисунок 2, Рисунок 3, Рисунок 4). Так образуется Балтийское ледниковое озеро — пресноводный водоём, изолированный от Атлантического океана ледовой преградой, уровень которого на 20 м превышает уровень Северного моря [2–4].

Дальнейшее таяние ледового покрова привело к прорыву естественного барьера к северу от горы Биллинген (центральная Швеция). Это событие, именуемое Биллингенской катастрофой, положило начало Иольдиевому морю (11 000 лет назад), названному в честь моллюска *Yoldia arctica*, населяющего тогда ил низменных берегов Швеции и Финляндии (Рисунок 1В, Рисунок 2, Рисунок 3, Рисунок 4). Понижение уровня составило 20–30 м, до отметок, близких к Мировому океану [5–7].

Параллельно с этим происходило изостатическое поднятие освобождённой суши, скорость которого значительно превышала эвстатический рост уровня Мирового океана, что привело к перекрытию водообмена в районе Среднешведской низменности и трансформации Иольдиевого моря в Анциловое озеро (около 10 000 лет назад) [8–10]. В результате происходило постепенное

обмеление пролива в Среднешведской низменности, завершившееся полным перекрытием водотока около 10 000 лет назад. Иольдивое море трансформируется в Анциловое озеро, получившее своё название от моллюсков. *Ancylus fluviatilis*, обитающих в холодной пресной воде (Рисунок 1С, Рисунок 2, Рисунок 3, Рисунок 4). Избыток вод озера изливался мощным потоком в Северное море по каналам в Южной Швеции в масштабах, превышающих расходы Ниагарского водопада (порядка 20 000 м³/с). Уровень озера находился на 3–4 м ниже современного Балтийского моря, но выше уровня Мирового океана [11,12].

Около 7500 лет назад на юге-западе Анцилового озера случилось отделение Ютландского полуострова от Южной Швеции, что привело к образованию Датских проливов. Возобновление водообмена с Северным морем стало началом зарождения Литоринового моря, названного в честь брюхоногого моллюска *Littorina littorea*, обитающего в сильно опресненных прибрежных водах [13,14] (Рисунок 1Д, Рисунок 2, Рисунок 3, Рисунок 4). Его средний уровень на 7-9 м превышал современное Балтийское море. В этот период происходит потепление, климат становится субарктическим [15–17].

За период существования Литоринового моря (7500–5500 лет назад) в его акватории одновременно происходило похолодание климата Земли и поднятие суши в районе Фенноскандии, которые в конечном итоге обусловили регрессию Литоринового моря. В результате сформировался рельеф Древне-Балтийского моря (около 4500 лет назад), уровень которого был на 4–6 м выше, по сравнению с современной Балтикой [18,19] (

Рисунок 4)

В это время в районе будущей долины Невы существовали бассейны разнонаправленных рек Тосна и Мга, разделённые водоразделом. Прообраз Ладожского озера сообщался с Анциловым бассейном через понижение в районе Приозерск–Выборг. Примерно в это же время в бассейне Ладожского залива происходит неравномерное подъёма суши: северные берега оказываются выше южных, закрывается единственный водоток через Карельский перешеек, и избыток озёрных вод начинает заполнять долину реки Мги на юго-западе. Примерно 4000 лет назад произошёл прорыв водораздела, слив потоков Мги и Тосны в единое русло, образовавшее реку Неву [20–22]. В течение последующих 2000 лет морская абразия и речной поток сформировали разветвлённую дельту и заложили современные морфологические особенности Невской губы. Нева соединяет Ладожское озеро с Финским заливом Балтийского моря, это полноводный пресноводный водоток длиной 74 километра (Рисунок 5).

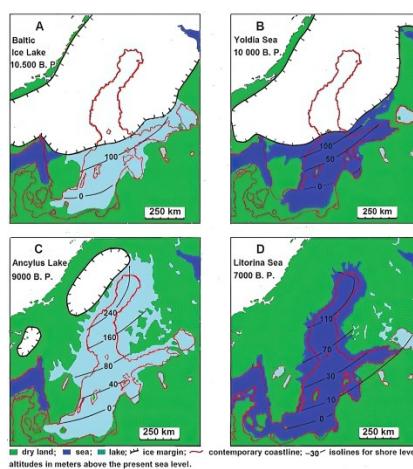


Рисунок 1. Основные геологические этапы развития Балтийского моря [17]

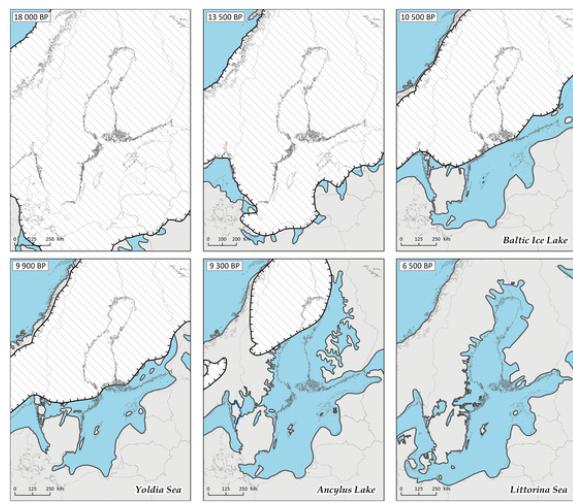


Рисунок 2. Основные геологические этапы развития Балтийского моря [23]

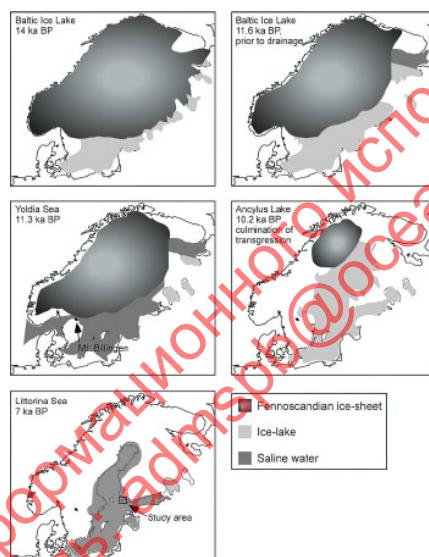


Рисунок 3. Основные геологические этапы развития Балтийского моря [24]

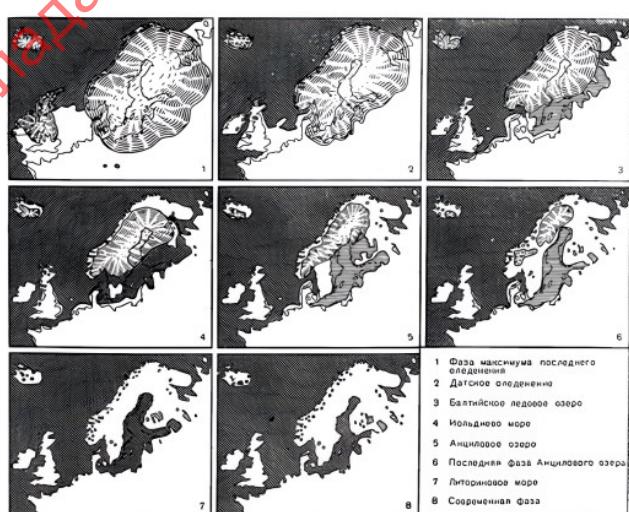


Рисунок 4. Основные геологические этапы развития Балтийского моря [25]

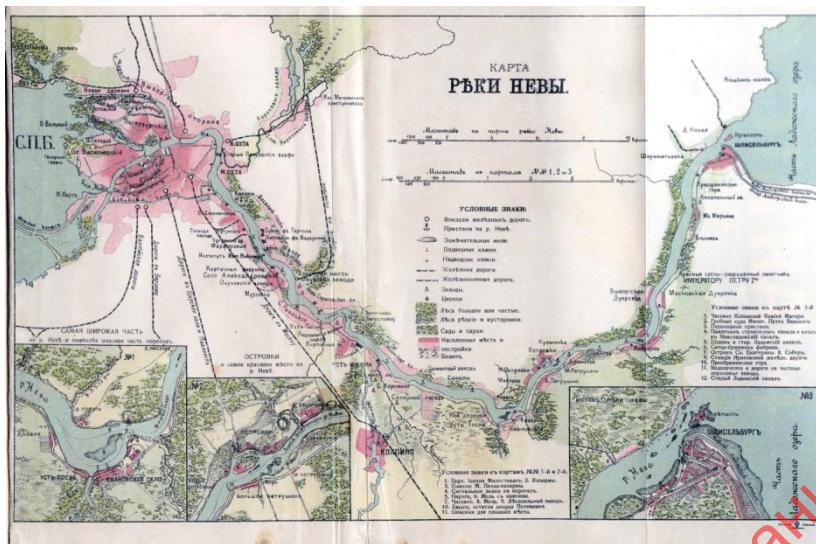


Рисунок 5. Гидрологическая схема русла реки Невы [26].

Долина реки (Приневская низменность) имеет ширину 30–50 км и глубину от 50 до 100 м. Дно низменности представляет собой плоскую заболоченную равнину, ступенчато понижающуюся в сторону устья. На ней имеются возвышенности: Колтушевская, Углово-Щегловская, Парголовская и Поклонная. Средняя ширина русла 400-600 м, минимальная – 210 м в начале Ивановских порогов, максимальная – 1000-1250 м в районе истока и места впадения реки Тосны. Средняя глубина реки 8-11 м, минимальная – 3,4-4,5 м у Ивановских порогов, максимальная – 24 м по правому берегу от Финляндского вокзала [27]. Исток расположен у Шлиссельбурга, частично разграниченной с севера на юг сложной сетью песчаных отмелей глубиной 1,8-3,0 м и шириной 8 км. Здесь в 1902–1908 гг. был проложен искусственный Кошкинский фарватер (Рисунок 6а). Устье Невы – разветвлённая дельта, относящаяся к типу ложных дельт, образованных работой не речных, а морских вод [28]. Дельта реки имеет площадь 83 км² и включает около 44 водотоков и 42 острова, три крупнейшие из которых это Васильевский, Петроградский и Декабристов. Основные рукава: Большая и Малая Нева, Невки, Фонтанка, Екатерингофка, Морской и Обводный каналы [29] (Рисунок 6б).

Нева принимает воды 26 притоков, главным образом с левого берега. Их суммарный вклад составляет около 2% от всего стока из Ладожского озера. Наиболее полноводные притоки Невы: реки Тосна, Ижора, Охта и Мга [30]. Русло Невы устойчиво, слабоизвилистое, не размываемое благодаря отсутствию отмелей и песчаных кос. Выделяются только три крутых поворота – у Отрадного, Невского лесопарка и Смольного. Вне дельты имеются три острова: Орешек, Фабричный (в области истока) и Главрыба (в центральной части). Берега русла крутые, обрывистые: максимальная их высота достигает 6-9 м, минимальная - составляет 2,0-3,0 м в устье и дельте реки [31]. Характерны приглубые очертания - сразу у берегов большие глубины, что удобно для судоходства. Дно у берега песчаное, на стрежне сложено плотными слоями глины с галькой. В районах с быстрым течением дно выстлано галькой или валунами. Между дельтой Невы и Финским заливом проходит промежуточная зона - Невская губа или "Маркизова лужа". Это крайняя восточная часть Финского залива, представляющая собой мелководную акваторию, с юга, востока и севера ограниченную сушей. Длина Невской губы составляет около 21 км. Наибольшая ширина 15 км, средняя глубина 3-5 м. Общая площадь водного зеркала составляет 329 км² территории. Дно Невской губы плоское, выстланное, преимущественно, песчаное. Прибрежные районы моря выстланы песками различных фракций, от крупно-среднезернистых у уреза воды до мелко-

тонкозернистых на глубинах 1,5-2,0 м. В центральной части губы регистрируются заиленные отложения [32].

На восточной окраине Невской губы, граничащей с речной дельтой, располагается Невское взморье – разветвлённая сеть песчаных отмелей, разделённых между собой продольными впадинами (Елагинским, Петровским, Галерным, Корабельным, Гребным фарватерами и Морским каналом). Длина этих баров с востока на запад – около 3-5 км, ширина с севера на юг 12-15 км, а глубина до 1.5-2.0 м [33]. На баровых отмелях велась добыча песка для строительных нужд. Северная граница Невской губы имеет низкие, заболоченные берега. Часть территории занимает Лахтинская впадина, вмещающая в себя большое мелководное озеро – Лахтинский разлив. Южные берега Невской губы невысоки, постепенно повышаются к западу от Стрельны. Здесь отмечаются большое количество крупных камней и валунов. Примерно две трети береговой полосы застроены населенными пунктами. Западная открытая граница Невской губы проходит по условной линии, соединяющей между собой пункты Лисий Нос, Кронштадт и Ломоносов. Здесь водное пространство разделено островом Котлин на два пролива: Северные (ширина 9-10 км) и Южные ворота (ширина 5-7 км). Область проливов насыщена естественными и искусственными преградами, затрудняющими водообмен с морской частью Финского залива и препятствующими прохождению в губу крупных ветровых волн [32].

В Северных воротах имеется протяжённая отмель, идущая от северо-восточной оконечности острова Котлин к мысу Лисий Нос. По её гребню проходят свайные, ряжевые и каменные преграды XIX века, сооружённые здесь для защиты от потенциальных вражеских кораблей. Во многих местах наблюдаются скопления подводных, надводных и осыхающих камней. Эти препятствия делают проход Северных ворот сложным, а при большом волнении даже опасным для навигации судов. Южные ворота ограничены Ломоносовской отмелю длиной 204 км и глубиной 1.0-1.5 м. К западу от неё простирается довольно широкая полоса ряжевых преград. Единственным сравнительно глубоководным районом (10-12 м) пролива остаётся лишь узкая (0,8-1,0 км) ложбина, по которому проходит большая часть судов. В западной части Невской губы располагается единственный крупный остров Котлин длиной 10.5 км и шириной 1.0-1.5 км. Его северное побережье имеет относительно сглаженную форму. Южный же берег сильно изрезан гидротехническими сооружениями. Здесь располагается цепь из крупных гаваней – Ленинградской, Угольной, Военной, Лесной, Средней, Купеческой, Каботажной. С юга эти гавани окаймляются рейдами – Восточным, Малым и Большими. Посредством дамбы КЗС островом Котлин соединяется с двумя фортами: «Северный № 1» и «Константин» [34].

Одним из крупнейших, помимо КЗС, гидротехнических сооружений Невской губы, является Морской канал. Это спроектированный и построенный в 1874-1885 гг. судоходный подводный канал для прохода морских судов с большой осадкой через мелководную приусадебную область Невы реки [35]. Канал длиной 30 км, шириной 80-100 м и глубиной 12 м соединяет устье Большой Невы с проливом Южные ворота на Малом Кронштадтском рейде. Канал делится на части: защищенную дамбами, открытую и портовую.

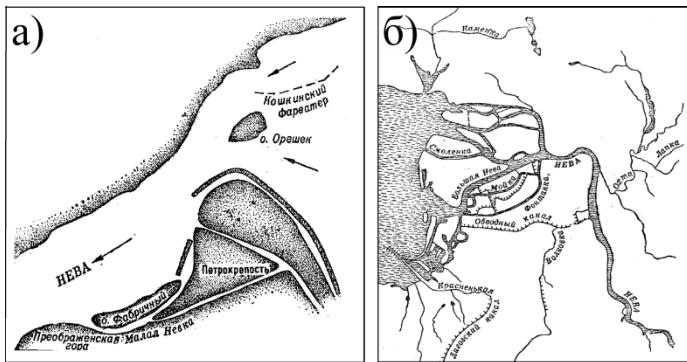


Рисунок 6. Схема истока (а) и устьевой части (б) реки Невы [36].

1.1. Невские наводнения и защита от них: Nevae Aquae Custos

Расположение Петербурга в дельте реки Невы, впадающей в мелководную часть Финского залива Балтийского моря, обуславливает возможность опасного повышения уровня воды в городе и его окрестностях. Наводнения в местности, где был заложен город Санкт-Петербург, отмечались в письменных источниках ещё с 11 века. Летописные источники допетровских лет сообщали о многочисленных потопах в долине Невы, наиболее значимыми из которых явились события 1060–1066 и 1691 гг. [37–40]. Событие, отмеченное в 1691 г., считается, возможно, сильнейшим в истории невских наводнений (около 762 см). Впрочем, истинность такой экстремальной оценки подвергается сомнению у ряда исследователей [41,36,42].

Стихийные бедствия продолжились и после основания в 1703 году города Санкт-Петербурга в устье реки Невы. Уже в первые месяцы город подвергся своему первому крупному наводнению (2 м), выявившему серьёзную уязвимость поселения перед угрозой с моря. Это заставило Петра I и его преемников задуматься об укреплении берегов. С этого момента Санкт-Петербург пережил ещё более трёхсот задокументированных наводнений с подъёмом воды выше 160 см над Кронштадтским футштоком (такой подъём уровня и считается наводнением), что подчёркивало постоянную опасность, исходящую со стороны Невской губы и Финского залива [36,43] (Рисунок 7).

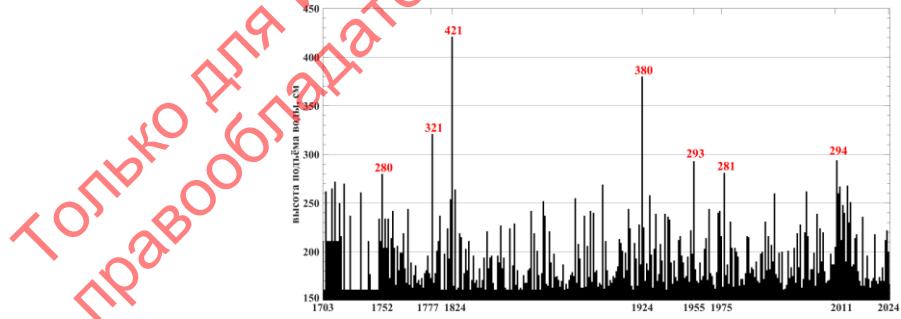


Рисунок 7. Хронологический график наводнений за 1703 – 2024 гг. по историческим [44] и современным [1] данным.

Наиболее катастрофическими были 3 наводнения высотой более 300 см, которые наблюдались в 1777 (3,21 м), 1824 (4,21 м) и 1924 (3,80 м). Тогда городу был нанесён огромный ущерб, оказалась разрушенной инфраструктура, сотни и тысячи жителей погибли [44] (Рисунок 8, Рисунок 9).

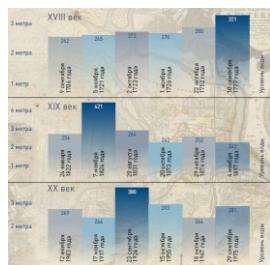


Рисунок 8. Высота уровня воды в годы крупнейших невских наводнений [45]

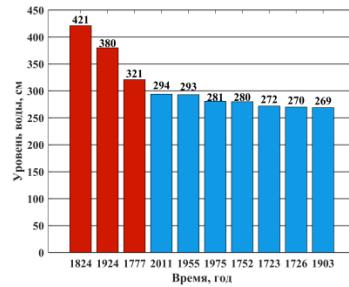


Рисунок 9. Высота уровня воды в годы крупнейших невских наводнений за 1703 – 2024 гг. по историческим [44] и современным [1] данным.

Наводнение 1824 года, описанное А.С. Пушкиным в поэме «Медный Всадник», затопило около 100 км² территории (Рисунок 10), разрушило более 300 домов, привело к гибели сотен людей и вызвало экономический кризис, парализовав торговлю и промышленность на месяцы. Это глубоко повлияло на общественное сознание, усилив страх перед стихией и подтолкнув к поиску новых решений [44]. Спустя век трагедия повторилась, на город обрушилось наводнение 1924 года, второе по высоте, затопило от 45 до 100 км² (Рисунок 10), вызвав массовую эвакуацию и временное прекращение работы порта, что обострило экономические трудности в период НЭПа [46,43]. В 1955 году подъём воды на 2,93 м подтопил жилые районы, но благодаря усилиям Гидрометеослужбы ущерб был минимизирован (Рисунок 10). Это событие сыграло ключевую роль в создании проекта по строительству защитных сооружений. Последующие серии крупных наводнений 1970-80х годов и начала 2000-х гг., отмеченные высотами более 2,0 м, ускорили принятие решения о строительстве КЗС [43]. Социально-экономические последствия случившихся наводнений, включая разрушения и убытки, подчёркивали необходимость комплексной защиты города [36,43].

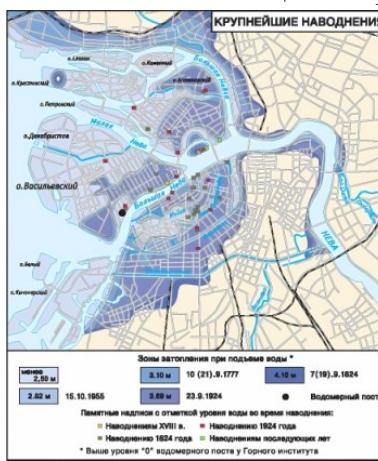


Рисунок 10. План затопления города Санкт-Петербурга при различных исторических наводнениях [43]

1.2. Причины наводнений и особенности гидрологии Невской губы

Основной период формирования нагонов — август-январь, с пиком в октябре–ноябре (92%), что связано с региональной активностью балтийских циклонов [36]. Штормовые нагоны, приводящие к наводнениям в Санкт-Петербурге, вызываются глубокими циклонами с давлением 730–750 мм рт. ст. и скоростью ветра 60–90 км/ч, движущимися по оси Трансбалтики, которые генерируют длинные гравитационные волны (до 1000 км) (Рисунок 11). Эти волны нагоняют до 27–30 км³ воды, как в 1924 году, что приводит к резкому подъёму уровня в Невской губе. Фазовая скорость волны, рассчитанная по формуле Лагранжа-Эри, создаёт резонанс при совпадении со скоростью циклона, увеличивая нагон до 6 м. Мелководность губы (5–15 м) и её сужение к устью (12–15 км) ещё более усиливают эти волны [47]. Ладожское озеро (908 км³) регулирует сток, но низкий уклон Невы (0,1 м/км) и отмели Шлиссельбургской губы (1,8–3 м) не предотвращают нагоны [36]. Сейшевые колебания (26 часов) способны внести до 50–150 см в конечную высоту нагона уровня, как это произошло при наводнении в 1924 году [43]. Западные штормы, как в случае 1955 года, также могут усиливать нагоны [43]. Солоноватые воды (4–6 промилле) проникают по Морскому каналу, влияя на экологию [36]. Наводнения также воздействуют на экосистему губы, вызывая краткосрочные изменения солёности и мощное турбулентное перемешивание, что может влиять на жизненный цикл гидробионтов.



Рисунок 11. Приблизительная схема распространения нагонной волны, формируемой проходящим циклоном и приводящей к затоплению берегов Невской Губы [43]

1.3. Ранняя борьба с наводнениями (XVIII–XIX вв.)

В XVIII веке борьба с наводнениями ограничивалась укреплением берегов Заячего острова гранитом и осушением Приневской низменности каналами по приказу Петра I [36]. Наводнения 1703 (2 м) и 1777 (3,21 м) показали неэффективность такого рода мер. (После наводнения 1977 года была впервые введена система оповещения о наводнении: посредством пушечных выстрелов, флагов в дневное время и фонарей в ночное [48]. Проект Миниха (директор водных коммуникаций города, специалист по гидротехнике и фортификации) 1727 года предлагал поднять территории на 4 м (Рисунок 12а), но был отклонён из-за дороговизны и опалы Миниха [48,43]. Тем временем, наводнения, не подчиняясь периодичности, продолжались и в XIX веке. В это период Базен (Рисунок 12б), Кулибин, Деволант и другие инженеры-архитекторы предлагали различные проекты дамб и шлюзов, но отсутствие технологий и бюджета препятствовало реализации. Предполагалось, что помогут каналы, сделанные для отвода воды, такие, как Крюков, Екатерининский и Обводный. Они осушали низины, но не уменьшали высоту нагонов. Эти меры были паллиативными и не решали проблему нагонов, что подчёркивало необходимость системного подхода, реализованного в Комплексе Защитных Сооружений [44]. Ограничения ранних технологий — ручной труд, отсутствие механизации, примитивные материалы, а также недостаточное понимание физики

процесса, а так же дороговизна, делали проекты неосуществимыми, что стало уроком для будущих инженеров [36].

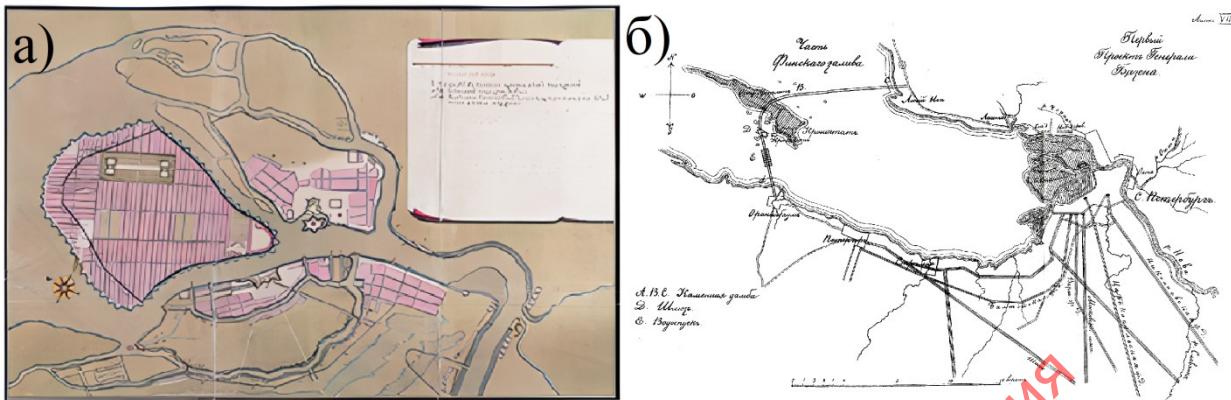


Рисунок 12. Проект Б. Миниха 1727 г. (а) и П. Базена 1824 г. (б) для защиты Петербурга от наводнений [43]; [49].

1.4. Проекты защиты города до Комплекса Защитных сооружений

Через 2 недели после наводнения 1824 года, 22 ноября, впервые вопрос о защите от наводнений был поставлен официально: директор ГУПС (Главное управление путей сообщения), герцог Александр Вюртембергский, поручил полковнику Антуану Рокуру провести исследование возможностей «предохранения» города от наводнений (Рисунок 13ж). С этого момента отсчитывается начало системной защиты города от стихии, на базе научно-технических изысканий и проектирования. В процессе реализации были выполнены одни из первых в Европе гидрометрических измерений скорости течения крупной реки (до этого подобные измерения выполнялись, насколько известно, только на Дунае в 1821–1838 гг. и на Эльбе в 1820–1823 гг. [50]. Их провёл А. Рокур в 1824–1825 гг. на Неве в створе рядом с Таврическим садом. Кроме того, им были собраны и систематизированы все имеющиеся исторические данные о Петербургских наводнениях [38,51]. Одновременно с работами Антуана Рокура свои градостроительные проекты разрабатывал и его соотечественник, архитектор Антуан Модюи, лично направивший императору Александру I в декабре 1824 г. своё предложение по застройке Санкт-Петербурга. Заинтересованный в продвижении своей идеи, он серьёзно раскритиковал проекты своих конкурентов, инженеров ГУПС, за излишние финансовые затраты и высказал, как ему казалось, более простой способ «предохранения» от наводнений. По его идее, для эффективной защиты города от стихии будет достаточно построить несколько водоотводных каналов и произвести поднятие уровня грунта на берегах (Рисунок 13а). К сожалению для А. Модюи, его проект не был удостоен широкого внимания и потому был вскоре отвергнут.

Объявленный после катастрофы 1824 года (когда подъём уровня составил 4,21 м) конкурс проектов по защите города, который привлёк П.П. Базена (дамбы в Кронштадте, Рисунок 13г), Треттера (проект шлюзов, Рисунок 13е) и других инженеров из ГУПС (Рисунок 13з). Однако, планы остались на бумаге из-за чрезмерных затрат и неразвитости технологий. Проект профессора Дерптского университета Г.Ф. Паррота предлагал несколько решений (Рисунок 13б): от масштабного перекрытия всей дельты до усечённого варианта, состоявшего в строительстве только водоотводных каналов. Однако все эти варианты были отклонены. В итоге был принят проект инженера Корпуса путей сообщения полковника В.К. Дестрема, который предполагал

строительство земляной дамбы в Невской дельте (Рисунок 13д). Рукаи Невы должны были перекрываться облицованными камнем земляными плотинами с водопропускными шлюзами. Также планировалось строительство водопропускного канала из Невы в Финский залив на Выборгской стороне. Тем не менее этот проект так и не был реализован, что связывают со смертью Александра I. После этого на государственном уровне вопросом занимались мало вплоть до конца 1830-х годов, когда в руководстве ГУПС было принято решение полностью прекратить работу по проектированию защитных сооружений и передать все материалы и инструменты в Департамент путей сообщения. При этом, в 1833 году появился проект немецкого инженера-гидротехника Карла Фридриха фон Вибекинга [52]. Он был основан на расчётах стока Невы Дестрема и высоты подъёма воды Рокура, но официально рассмотрен не был (Рисунок 13в). В 1839 году в Министерство иностранных дел поступил запрос от французского инженера Дефонтена, известного созданием гидротехнических сооружений на Луаре и Рейне, с просьбой предоставить данные о прошлых наводнениях на Неве. После почти десятилетнего изучения материалов он в 1848 году направил свой проект императору. Идея проекта состояла в строительстве нескольких дамб в дельте Невы и сооружении водоотводного канала на Выборгской стороне, что, в целом, повторяло подход Дестрема середины двадцатых годов XIX века (Рисунок 13и). Решений по проекту Дефонтена принято не было [51].

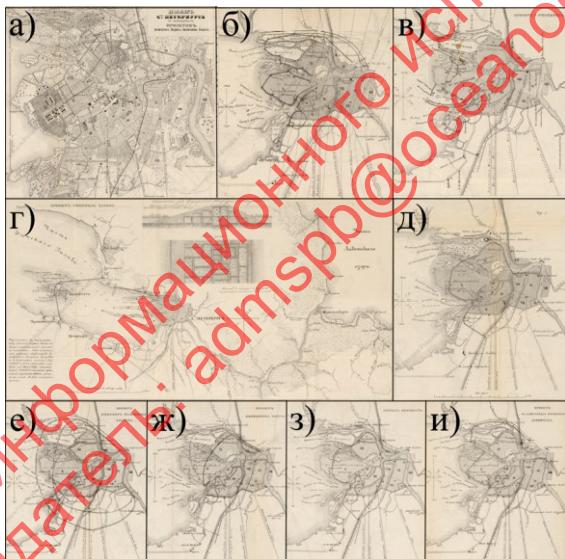


Рисунок 13. Проекты защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений в первой половине XIX века: А.Модюи и Дж. Гуллета (а), Г. Паррота (б), Г. Вибекинга (в), П.Базена (г), М. Дестрема (д), В. Треттера (е), А. Рокура (ж), комиссии ГУПС (з) и Дефонтена (и) [38]¹.

В конце XIX века была создана комиссия при Русском географическом обществе, Э.И. Тилло предложил проект, развивающий идеи Миниха, однако, проект был отклонён по финансовым соображениям [43]. Намывы дельты не решали проблему нагонов [36]. В 1920-х годах, после наводнения 1924 года (Рисунок 14), первый секретарь Ленинградского обкома и горкома партии Сергей Миронович Киров, инициировал разработку проекта защиты в НИИ Коммунального хозяйства, итоговый вариант представлял собой серию дамб, развивающих замысел П.П. Базена. Но гибель С.М. Кирова в 1934 году, когда должна была начаться реализация проекта, и Финская, а затем Великая Отечественная войны заморозили работы на долгие десятилетия [43]. Наводнение 1955 года возродило интерес к проектам защиты города от наводнений, и в 1967 году проектно-

¹ Авторы выражают благодарность и признательность Департаменту цифровизации ФГБУ «Российская национальная библиотека» за предоставленные графические материалы.

изыскательский институт «Ленгидропроект», один из старейших институтов по строительству гидротехнических сооружений, разработал проект КЗС (25 км), однако, начало строительства отложили до 1979 года [43]. Политические факторы, такие как приоритет индустриализации и войны, а также общественный скептицизм после неудач, замедляли реализацию проектов по созданию защитных сооружений [44]. Любые крупные инженерные проекты, технические начинания, всегда зависят от политической воли и экономической конъюнктуры.



Рисунок 14. Последствия второго по мощности наводнения, произошедшего в Ленинграде 23 сентября 1924 года [53].

1.5. История создания Комплекса Защитных сооружений

Идея создания Комплекса защитных сооружений (КЗС) в его современном виде возникла в 1960-х годах после наводнения 1955 года (2,93 м – почти катастрофическое), которое затопило жилые районы и инфраструктуру, подчеркнув необходимость системной защиты от нагонов [43] (Рисунок 15).



Рисунок 15. Последствия крупного наводнения, произошедшего в Ленинграде 15 октября 1955 году [53].

Ленинградское отделение института «Гидропроект», совместно с рядом научных и проектных организаций, разработало два варианта трассы (Рисунок 16): Восточный, предполагавший защитные сооружения в устье Невы, и Западный, предусматривавший 25,4-километровую дамбу через Финский залив. Западный вариант был выбран как более эффективный, защищающий Санкт-Петербург, Кронштадт, Ломоносов и Петродворец от нагонов до 5,4 м с вероятностью 1 раз в 10000 лет. Расчёты максимального уровня воды (5,15 м) опирались на анализ исторических наводнений (1824: 4,21 м; 1924: 3,80 м) и численные модели балтийских циклонов, разработанные с использованием данных метеостанций Финского залива [43].

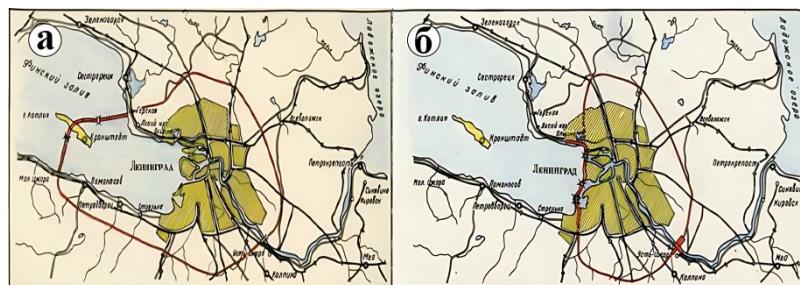


Рисунок 16. Западный (а) и Восточный (б) варианты строительства Комплекса защитных сооружений (КЗС) Ленинграда от наводнений [53].

В 1970-х годах подготовка включала создание гидродинамических моделей на основе уравнений мелкой воды, моделирующих нагоны в Невской губе с учётом её мелководности (5–15 м) и сужения (12–15 км). Для изучения влияния гидротехнических сооружений на гидродинамику в Невской губе во ВНИИ Гидротехники им. Б. Е. Веденеева (г. Ленинград) в 1980-х годах была создана натурная гидравлическая модель дельты Невы и Невской губы. Это было масштабное сооружение, в специально построенном здании. Сама модель в масштабе 1:500 (горизонтальный масштаб) и 1:10 (вертикальный масштаб) занимала 6000 квадратных метров (Рисунок 17). На модели отрабатывали компоновку сооружений в дельте, вырабатывали рекомендации по последовательности строительства.

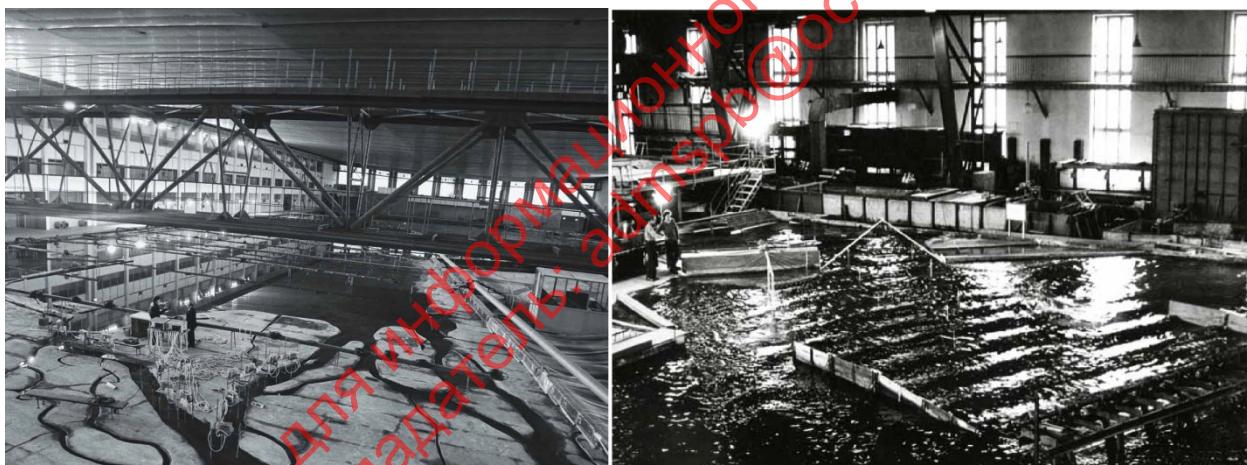


Рисунок 17. Экспериментальная гидравлическая модель дельты Невы и Невской губы, созданная на базе ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева [53].

Ранние концепции Системы предупреждения угрозы наводнений (СПУН) разрабатывались для автоматизации управления затворами, используя первые датчики уровня воды и метеорологические модели, созданные Российским государственным гидрометеорологическим университетом (РГГМУ). СПУН должна была прогнозировать нагоны за 24–48 часов, предотвращая подтопления, подобные наводнению 1955 года, которое могло быть смягчено при наличии точных прогнозов [32,43]. Была подтверждена оптимальность трассы Горская–Бронка, минимизирующей воздействие на экосистемы. Батопорты для судопропускных сооружений (С1, С2) и водопропускные сооружения (В1–В6) выбраны для регулирования течений и предотвращения заливания. Проектирование учитывало интеграцию Западного скоростного диаметра (ЗСД), связывающего север и юг города. Геологические изыскания 1975–1978 годов подтвердили

стабильность грунтов (глины, пески, торфяники), требующих намывов островов [45,54]. Проекты 1967 года уточнили параметры дамб, заложив основу для СПУН и строительства.

Строительство КЗС началось в 1979 году после Постановления Совета Министров СССР № 1234 от 30 декабря 1979 года. Был утверждён проект как приоритетный для защиты Ленинграда от наводнений, веками угрожавшими городу, включая катастрофы 1824 (4,21 м) и 1924 (3,80 м) годов [43,44,55]. Проект предусматривал возведение 11-ти дамб (Д1–Д11), 6-ти водопропускных сооружений (В1–В6) и 2-х судопропускных сооружений (С1 и С2) на трассе протяжённостью 25,4 км, пересекающей Финский залив от Горской до Бронки через Кронштадт [46]. Для создания искусственных островов под основания дамб использовались земснаряды, перекачивавшие до 5 тыс. м³ грунта в час, что позволило намыть около 10 млн м³ грунта за первые годы строительства, преимущественно из песчаных отложений Финского залива [43,45][43] (Рисунок 18, Рисунок 19.). Для подвоза стройматериалов и техники была построена железнодорожная ветка Лисий Нос – Горская (Рисунок 20). Железобетонные конструкции, изготовленные на специализированных заводах Ленинграда, были спроектированы для защиты от эрозии и нагонных волн высотой до 5,4 м, с учётом сейшевых колебаний, которые могли добавить до 150 см к высоте нагона, как в 1924 году [43].

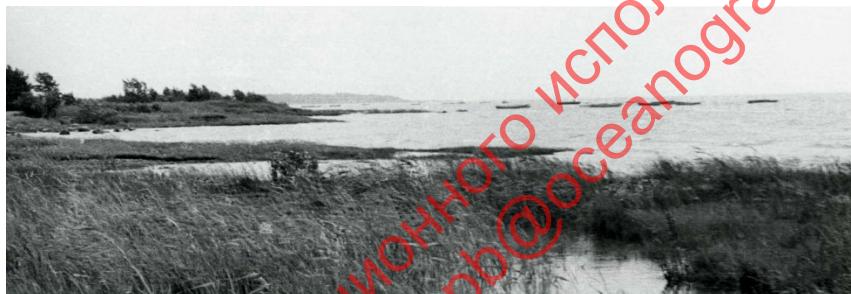


Рисунок 18. Побережье строительной площадки «Горская» перед началом работ [53]



Рисунок 19. Намыв новых территорий под северной строительной площадкой «Горская» [53]



Рисунок 20. Строительство железнодорожной ветки Лисий Нос – Горская. 1982-1984 гг. [53].

Судопропускные сооружения стали ключевыми элементами проекта, обеспечивающими бесперебойное судоходство, критически важное для Ленинграда как морского порта. Батопорты С1, расположенные вблизи Кронштадта (Рисунок 21), имели ширину 200 м, глубину 16 м и вес 2000 т, позволяя пропускать крупные грузовые и пассажирские суда со скоростью до 100 судов в сутки. Затворы С2, установленные ближе к Горской, с шириной 110 м и глубиной 7 м, обслуживали меньшие суда, включая рыболовецкие и прогулочные [54,56]. Водопропускные сооружения В1–В6, оснащённые регулируемыми затворами, поддерживали естественные течения в Невской губе, предотвращая заливание и сохраняя экосистемы, включая нерестилища корюшки, составляющей 90% улова Невы (около 1000–3000 т ежегодно) [57,58]. Первые датчики уровня воды, интегрированные для будущей Системы предупреждения угрозы наводнений (СПУН), начали тестироваться в 1980-х годах, обеспечивая мониторинг нагонных волн в реальном времени. Эти датчики, установленные в ключевых точках губы, позволили собирать данные для управления затворами, что могло предотвратить подтопления, подобные наводнению 1975 года (2,7 м), затронувшему портовые зоны и жилые районы, или трём наводнениям 1986 года (2–2,3 м), вызвавшим локальные эвакуации [43,44].

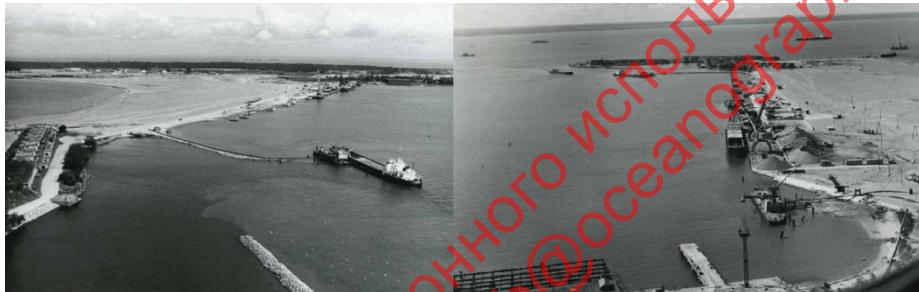


Рисунок 21. Территория строительной площадки на острове Котлин. [53]

К 1985 году было завершено около 50% работ, включая дамбы Д1–Д5 и водопропускные сооружения В1–В3, что частично снизило риск нагонов в районе Кронштадта и могло предотвратить подтопления, подобные событию 1986 года, когда вода поднялась до 2,3 м, затопив прибрежные улицы [43]. Экологические меры, начатые в 1980-х, включали фильтрацию строительных стоков для минимизации загрязнения Невской губы. Но они были недостаточными, чтобы полностью устраниć обеспокоенность экологов. Снижение солёности губы на 0,3 %, вызванное перекрытием течений дамбами, угрожало нересту корюшки и лосося, что вызвало обеспокоенность общественности. Протесты подчёркивали социальную значимость проекта, так как жители Ленинграда, пережившие наводнения, ожидали от КЗС не только защиты, но и сохранения традиционного уклада жизни, связанного с рекой.

Финансовые трудности стали серьёзным препятствием. В середине 1980-х годов финансирование сократилось на 60% из-за экономических реформ и перераспределения бюджета на приоритетные проекты, такие как развитие энергетики и промышленности, что замедлило темпы строительства. Гидродинамические исследования, проведённые в этот период, показали, что дамбы могут увеличить риск залиивания Невской губы на 15%. Это ухудшило бы судоходство, включая работу Морского торгового порта, обслуживавшего в те годы до 4000 судов в год, и потребовало бы дополнительных затрат на дноуглубление, оцениваемых в 20% от бюджета проекта [45]. Всё это, вкупе с экономическими трудностями позднего советского периода, привело к приостановке строительства в 1991 году, оставив КЗС незавершённым. Недостроенные конструкции начали подвергаться эрозии, что увеличило будущие затраты на их восстановление, а общественные

ожидания, подпитываемые надеждами на защиту от наводнений, оставались нереализованными, усиливая социальное напряжение в Ленинграде [45,59].

Экономический кризис, разрушение связей в научной, проектной и технической сфере, последовавшие за процессом распада СССР в 1990-1991 годах, привёл к радикальному сокращению финансирования КЗС, что, с учётом галопирующей инфляции, полностью остановило работы на дамбах Д3–Д7 и судопропускных сооружениях С1 и С2, поставив под угрозу уже вложенные ресурсы [46,54]. Кроме того, экологические споры, начавшиеся ещё в 1980-х годах, усилились в начале 1990-х, становясь центральной темой общественных дискуссий. В итоге строительство защитных сооружений было прямо остановлено Ленинградским городским советом народных депутатов под давлением общественных организаций, беспочвенно обвинявших КЗС в создании экологической катастрофы (что позднее было опровергнуто экспертизами [54,60]). Недостроенные конструкции начали подвергаться эрозии под воздействием осадков, волн и течений Финского залива (Рисунок 22), что увеличило общую стоимость проекта из-за необходимости ремонта и роста цен на строительные материалы в условиях инфляции. В 1994 году Правительство РФ принимает специальное постановление о КЗС и вводе его в эксплуатацию в 2001 году. Однако, политическая нестабильность, экономическая неразбериха неокапитализма и банальное стяжательство привели к запусканию на стройках КЗС: одного постановления, без финансовых вливаний, было недостаточно [54]. Минимальные поддерживающие работы, включая укрепление дамб Д1 и Д2, проводились для предотвращения их разрушения под воздействием волн и течений, но они не могли компенсировать остановку строительства. Разработка Системы предупреждения угрозы наводнений (СПУН) также замедлилась, так как финансирование исследований сократилось, хотя Университет ИТМО продолжал работу над датчиками уровня воды, поддерживая концепцию автоматизации управления затворами. Эти исследования могли бы предотвратить нагоны, такие как в 1996 году (2,4 м), затопивший прибрежные районы Кронштадта и вызвавший локальные подтопления, или в 2005 году (2,39 м), повредивший портовые сооружения, если бы СПУН была завершена раньше [47,43].

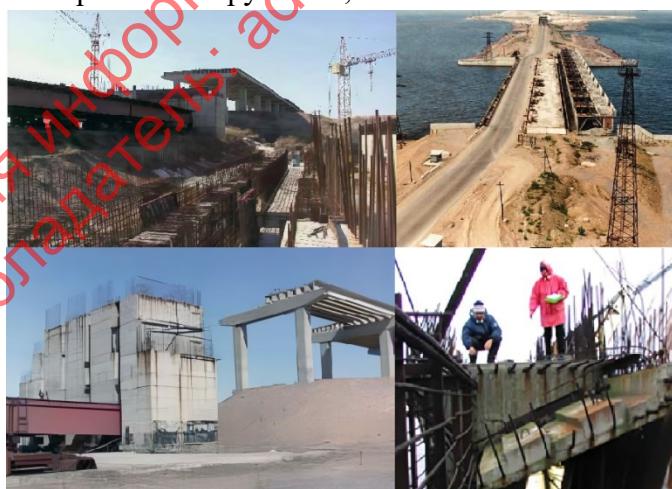


Рисунок 22. Состояние защитных сооружений в период «Тревожных 90-х» [61]

Заливание также могло повлиять на качество воды, используемой для водоснабжения города (5,2 млн м³ в сутки), что усилило сопротивление проекту среди жителей, ожидавших от КЗС не только защиты, но и сохранения экологического баланса. Общественные настроения в этот период были отмечены разочарованием: жители Ленинграда, пережившие наводнения 1975, 1986 и 1996 годов, видели в КЗС надежду на безопасность, но остановка строительства усиливали скептицизм по поводу завершения проекта [44]. Приостановка также подчеркнула важность учёта

экологических и социальных факторов, так как протесты рыбаков и экологов вынудили инженеров пересмотреть подходы к строительству, что позже привело к усилению экологического мониторинга в 2000-х годах. Этот период стал уроком для будущих этапов, показав, что успех КЗС зависит не только от инженерных решений, но и от общественной поддержки и экономической стабильности [43,54,62].

В 2003 году решением Правительства РФ было создано юридическое лицо, ответственное за строительство КЗС (ФКП Дирекция комплекса защитных сооружений г. Санкт-Петербурга от наводнений) и возобновилось финансирование. Благодаря выделению федеральных средств в размере 2 млрд евро, а также привлечению международных кредитов, включая средства Европейского банка реконструкции и развития (ЕБРР), что позволило преодолеть финансовый кризис стройки 1990-х годов (Рисунок 23). С 2006 года начался активный этап строительства (Рисунок 24), завершившийся в 2011 году вводом КЗС в эксплуатацию. Весной 2008 года были проведены успешные испытания батопорта С-1 (Рисунок 25), и к 2011 году завершены все ключевые элементы проекта: дамбы Д3–Д11, батопорты С1, затворы С2 и подводный туннель для Западного скоростного диаметра (ЗСД) протяжённостью 1961 м и глубиной 28 м [1,45]. Он стал важной частью транспортной инфраструктуры города, увеличив пропускную способность до 80 тыс. машин в сутки и сократив время в пути между севером и югом на 30-40 минут. Система предупреждения угрозы наводнений (СПУН), полностью интегрированная к 2008 году, сыграла ключевую роль в успехе КЗС. СПУН использовала метеорологические модели и сеть датчиков уровня воды, установленных по всей Невской губе, что позволяло прогнозировать нагоны с заблаговременностью двое суток, высокой точностью и сокращать время закрытия затворов до десятков минут [43].



Рисунок 23. Возобновление строительных работ на водопропускном сооружении В-1 в 2004-2005 гг. [59]



Рисунок 24. Возобновление строительных работ на судопропускных сооружениях С-1 и С-2 в 2005-2007 гг. [59]



Рисунок 25. Монтаж системы ботопортов на сооружении С-1 в 2008 г. [59]

12 августа 2011 года КЗС был открыт (Рисунок 26). Санкт-Петербург получил надёжную защиту от наводнений, впервые с момента своего основания. Социальный и экономический эффект КЗС стал значительным. Завершение проекта в 2011 году, спустя десятилетия ожиданий, устранило страх наводнений, который преследовал жителей со времён Петра I, и позволило развивать прибрежные зоны, такие как Васильевский остров, где намывные территории стали основой для новых жилых и коммерческих районов, привлекающих туристов и инвесторов. КЗС повысил качество жизни, укрепил общественное доверие к инженерным решениям, что было особенно важно после разочарований 1990-х годов [63]. Экономическая активность региона выросла на 18% за счёт роста торговли, логистики и туризма, поддерживаемых ЗСД и стабильностью порта [64]. КЗС, официально введённый в эксплуатацию 12 августа 2011 года, стал одним из крупнейших гидротехнических сооружений России и символом инженерного триумфа, демонстрируя, как технологии и общественные ожидания могут объединиться для защиты города.



Рисунок 26. Комплекс защитных сооружений в канун своего открытия 2011 г. [59]

СПУН обеспечила предотвращение 345 наводнений к 2024 году [1,43], включая значительные события: 28 ноября 2011 года (2,2 м, потенциально удалось избежать около 2 млрд рублей ущерба), три наводнения в 2013 году (уровни 2–2,5 м, 3 млрд рублей), 27 декабря 2015 года (2,8 м, 5 млрд рублей), а также нагоны 2017 года (2,1 м) и 2020 года (2,3 м), которые могли затопить портовые зоны, жилые районы и промышленные предприятия, в том числе Большой порт Санкт-Петербурга, обслуживающий 32,5 тысячи судов с общим грузооборотом 49,6 млн т [65,66]. Экологические меры, внедрённые в 2003–2011 годах, включали фильтрацию строительных стоков и ежедневный мониторинг качества воды, грунта и биоразнообразия, что позволило снизить загрязнение на 25% по сравнению с 1980-ми годами и сохранить 80% местных видов, включая моллюсков и рыб [57].

Комплекс защитных сооружений (КЗС), официально введённый в эксплуатацию 12 августа 2011 года, стал крупнейшим гидротехническим сооружением России и одним из самых значимых в мире, сравнимым с нидерландским Delta Works по масштабу и инженерной сложности [45,43]. Кроме технической составляющей (Рисунок 27), неотъемлемой частью комплекса является система управления, которая опирается на Систему предупреждения угрозы наводнений (СПУН), разработанную совместно РГГМУ и Университетом ИТМО. СПУН использует метеорологические модели HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) для прогноза погоды с разрешением до 2 км и NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean) для моделирования морских течений, интегрируя данные с 50 датчиков уровня воды, расположенных в Невской губе и Финском заливе, с частотой обновления каждые 10 минут. Это позволяет прогнозировать нагоны за 48 часов с точностью 95%, а система автоматизации сокращает время закрытия батопортов С1 (200 м шириной) и затворов С2 (110 м) до 40 минут, минимизируя сбои в судоходстве. СПУН также включает резервные генераторы и спутниковую связь для работы в экстремальных условиях, таких как шторма с ветром до 35 м/с, обеспечивая надёжность даже при отключении электроэнергии [43].



Рисунок 27. Современная схема Комплекса защитных сооружений (КЗС) Санкт-Петербурга от наводнений [45]

К 2024 году КЗС предотвратил 345 наводнений [1,43]. Первое предотвращённое наводнение произошло спустя несколько месяцев после запуска КЗС, 28 ноября 2011 года: СПУН зафиксировала нагон с прогнозируемым уровнем 2,2 м из-за западного ветра 25 м/с, угрожавший затопить Васильевский остров и портовые зоны. Закрытие затворов снизило уровень до 1,3 м, предотвратив ущерб в 2 млрд рублей и защитив 500 тыс. жителей [1,43]. В 2011 году было предотвращено ещё два нагона (Рисунок 28): 15 декабря (2,1 м, предотвращён ущерб на 1,5 млрд рублей) и 29 декабря (2,0 м, предотвращён ущерб на 1,5 млрд рублей), оба вызванные циклонами с Балтики, подтвердив эффективность СПУН в первый год работы.

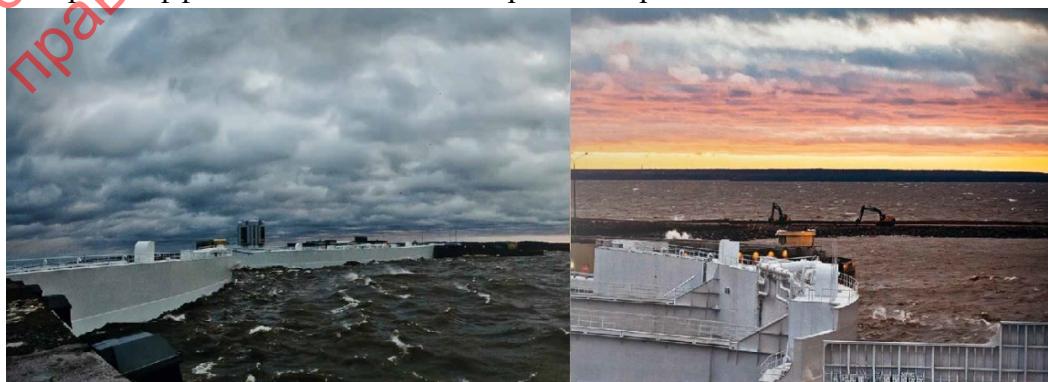


Рисунок 28. Первые невские наводнения, остановленные Комплексом защитных сооружений осенью-зимой 2011 года [59].

В 2012–2020 годах КЗС ежегодно предотвращал наводнения: в 2012 году — 2 (2,1 м и 2,3 м), в 2013 году — 3 (2–2,5 м), в 2014 году — 1 (2,2 м), в 2015 году — экстремальный нагон 27 декабря (2,8 м, спасено 5 млрд рублей), в 2016 году — 3 (2–2,4 м), в 2017 году — 2 (2,1 м и 2,3 м), в 2018 году — 1 (2,2 м), в 2019 году — 2 (2,1 м и 2,4 м), в 2020 году — 2 (2,3 м и 2,5 м). Всего за 2012–2024 годы предотвращено около 37 крупных нагонов, а, в общем, с 1703 года по 2024 год Санкт-Петербург подвергался порядка 345 наводнениям, включая мелкие подъёмы воды (1,6–2 м), которые могли вызвать локальные подтопления [1,43].

Экономическое значение КЗС велико: защита Большого порта Санкт-Петербурга (32,5 тысяч судов [65], 49,6 млн т. грузооборота [66]) и ЗСД (более 12 000 человек в день [67]) обеспечивает рост экономики региона, добавив доходы от логистики и туризма. Социально КЗС устранил страх наводнений. Это позволило развивать прибрежные зоны, такие как Васильевский остров, где намывные территории стали основой для расширения города [1,68]. КЗС стал символом устойчивости Санкт-Петербурга, продолжая традиции Петра I.

1.6. Международный опыт защиты от наводнений

Венеция: проект MOSE

Венеция, расположенная в Венецианской лагуне (Laguna di Venezia), где суши занимает лишь 8%, страдала от наводнений на всём протяжении своей истории. Проект MOSE (Modulo Sperimentale Elettromeccanico), введённый в эксплуатацию в 2020 году, защищает Венецианскую лагуну от нагонов высотой до 3 метров, вызываемых циклонами и ветрами Адриатического моря. Система состоит из 78 подвижных барьеров (ширина 20 м, высота 3 м) (Рисунок 29), которые поднимаются за 30 минут, блокируя три основных входа в лагуну: Lido, Malamocco и Chioggia [69]). В отличие от батопортов Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга (КЗС), барьеры MOSE поднимаются вертикально (Рисунок 30), что минимизирует воздействие на судоходство, однако требует регулярного обслуживания из-за коррозии и накопления осадков. Наводнение 1966 года, когда уровень воды достиг 1,94 м и затопил площадь Сан-Марко, стало катализатором проекта, который затянулся на 40 лет из-за коррупционных скандалов, увеличив бюджет до 5,5 млрд евро (MOSE Official Site, 2025). MOSE активируется до 10 раз в год с ежегодными затратами около 100 млн евро, что значительно чаще и дороже, чем КЗС (1–2 раза в год, 50 млн евро), из-за высокой частоты малых нагонов. Прогнозы наводнений для MOSE (24 часа, точность 85%) уступают системе прогнозирования уровня наводнений (СПУН) КЗС (72 часа, точность 95%), что снижает его надёжность [43]. С экологической точки зрения MOSE вызывает снижение солёности лагуны на 0,2%, что угрожает биоразнообразию, аналогично КЗС (снижение на 0,3%), однако в Венеции планируется создание искусственных рифов для компенсации (<https://www.mosevenezia.eu/>). КЗС превосходит MOSE по максимальной высоте защиты (5,4 м против 3 м), но MOSE более гибкая система, особенно в условиях частых малых нагонов.

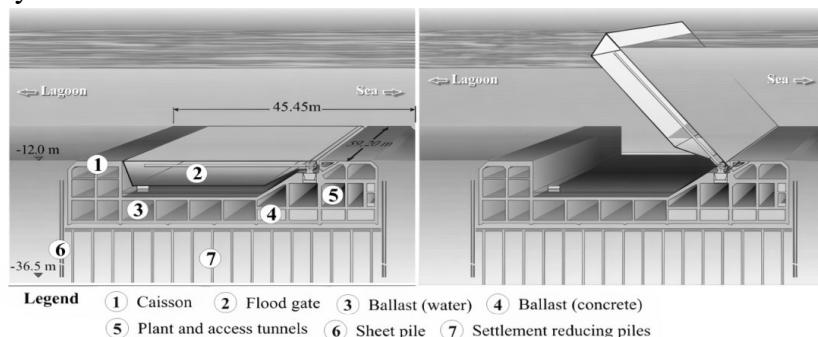


Рисунок 29. Схема работы защитных сооружений проекта MOSE, Италия [70].



Рисунок 30. Подъём защитных ворот MOSE в момент опасного повышения уровня Венецианской лагуны.

Нидерланды: проект Delta Works

Delta Works, завершённый в 1997 году, представляет собой крупнейшую в мире систему защиты от наводнений, охватывающую территорию в 34 тыс. км² и способную противостоять нагонам до 4 метров [46] (Рисунок 31). Наводнение 1953 года, унёсшее 1836 жизней, стало причиной начала проекта. Ключевой элемент системы — дамба Oosterscheldekering длиной 29 км с 62 шлюзами (ширина 40 м, вес 260 т), которые закрываются за 20 минут, что быстрее, чем батопорты КЗС (40 минут) [43]. Конструктивно батопорт в составе Delta Works аналогичен используемому на КЗС (Рисунок 32), при этом, спроектирован батопорт для КЗС был раньше голландского, однако, из-за остановки строительства в 1990-е годы, первым построили именно голландский. Шлюзы позволяют регулировать солёность, сохраняя экосистемы на 95%. Стоимость проекта составила 5 млрд евро, что превышает бюджет КЗС (3 млрд евро), но оправдано масштабом защищаемой территории. Прогнозы наводнений (36 часов, точность 90%) уступают СПУН КЗС (72 часа, 95%). КЗС более эффективен для экстремальных нагонов (5,4 м против 4 м).



Рисунок 31. Схема проекта защитных сооружений Delta Works [71]



Рисунок 32. Закрытые и открытые затворы Масланткеринга. [72]

Лондон: Барьер на Темзе

Thames Barrier, введённый в эксплуатацию в 1982 году, защищает Лондон от нагонов высотой до 2,5 метров [46]. Система включает 10 шлюзов (ширина 61 м, вес 3200 т), которые поднимаются за 30 минут, перекрывая реку Темзу. В отличие от КЗС ориентированного на защиту от морских нагонов, Thames Barrier спроектирован для речных условий, что делает его эксплуатацию дешевле, чем КЗС и более частой (до 20 активаций в год). Прогнозы наводнений (24 часа, точность 85%) уступают СПУН КЗС (72 часа, 95%). КЗС значительно лучше по высоте защиты (5,4 м против 2,5 м), но Thames Barrier оптимален для речных систем благодаря своей простоте и эффективности.



Рисунок 33. Вид защитных сооружений реки Темзы, Англия [73]

Гамбург: защита порта и реки Эльба

Гамбург укрепил свои дамбы после разрушительного наводнения 1962 года (высота 5 м, 500 жертв), создав систему общей протяжённостью 100 км [46]. Она защищает крупнейший порт (9000 судов в год), но статичные дамбы ограничивают судоходство во время нагонов, в отличие от гибких батопортов КЗС [1].

Описанные защитные сооружения и КЗС в Санкт-Петербурге имеют как сходства, так и принципиальные различия. КЗС защищает город от относительно редких, но экстремальных нагонов в то время, как венецианский MOSE рассчитан на частые, но значительно менее опасные нагоны. Дамба «Delta Works» в Нидерландах ориентирована на защиту обширной территории, лежащей ниже уровня моря. Мы видим, что универсального решения нет, каждое сооружение адаптировано к конкретным географическим и климатическим условиям, а также техническим и экономическим возможностям.

1.7. Намывы в Санкт-Петербурге: Litus Creatum

Санкт-Петербург, как многие города, расположенные на низких берегах, в течение всей своей истории изменял конфигурацию береговой линии, забирая площадь у водного окружения. Намывные технологии в Санкт-Петербурге начали применяться сразу после основания в XVIII веке для укрепления болотистых и низменных территорий. Вся градостроительная политика города была подчинена регламентации, регулярности и ансамблевости [74]. Уже в 1706 г. по распоряжению Петра I было произведено возвышение острова Заячий, площадь которого была также увеличена почти на треть. В это же время действовал указ, предписывающий торговцам обязательный ввоз различных балластных грузов с целью укрепления береговой линии молодого города [75]. Проекты 1710-х гг. предусматривали отсыпку дополнительных земель у Васильевского и Адмиралтейского островов для защиты от затоплений [76]. В этом же время была заложена планировочная основа Василеостровского острова, реализованная по принципам регулярного градостроительства. Была проведена главная транспортная артерия, соединяющая побережье Финского залива со Стрелкой острова на востоке [77]. В 1710–1720-х годах намыв Васильевского острова позволил увеличить его площадь на, приблизительно, 15 га, что создало условия для строительства портовых сооружений, складов и первых жилых кварталов, заложив основу для развития города как морской столицы.

В 1720-е годы Доменико Трезини руководил работами по строительству портовых сооружений. На северном берегу Василеостровского острова были построены международный и каботажный порты, а на западном располагалась Галерная гавань, предназначенная для размещения Балтийского флота. Подавляющая часть этих работ была реализована на насыпных территориях [76]. В конце 1730-х годов начинается возведение складских помещений для хранения горючих грузов. Так появился Пеньковый (Тучков) буй, построенный на специально отсыпанных островах у южного берега Петербурга. Период правления императрицы Екатерины Великой (1760-90-е гг.) ознаменовал ряд грандиозных проектов по преобразованию береговой линии города. Проводится архитектурная работа по выравниванию и углублению реки Фонтанки, принимается неудачная попытка переноса международного и каботажного портов в её устье [76]. Строятся новые искусственные каналы: Екатерининский, Крюков, Обводный, избыток земли от которых непосредственно направлялся на расширение города [75].

В начале XIX века в дельте Невы на намывных территориях была отстроена Биржевая площадь. На болотистой почве стрелки Васильевского острова был успешно возведено здание Биржи. В результате активной урбанизации острова ранее удалённый район Галерной гавани вошёл в черту города [77]. В середине XIX века в соответствии с планом развития города на намывных территориях производились работы по строительству государственных складов: Сельяного, Масляного и других буянов. Одновременно с этим в истоке Обводного канала был построен крупный зерновой Хлебный порт, который разместился на специально расширенном, отсыпанном побережье канал [76]. К семидесятым годам XIX века сформировалась новая архитектурная концепция Петербурга, направленная на упорядочение портового хозяйства. Был осуществлен перенос части инфраструктуры Адмиралтейской верфи на отсыпанные территории. Был создан проект главного Санкт-Петербургского порта в окрестностях Гутуевского и Вольного островов, по которому предлагалось насыпать несколько островов и прорыть Морской канал (1885 г.) [76]. В XIX веке намыв Галерной гавани поддержал развитие российского флота, однако ручной труд и отсутствие механизации ограничивали масштабы работ, позволяя намывать лишь небольшие участки [44].

К началу XX века общий объём намытых территорий достиг около 50 га, включая Аптекарский остров, который стал важным центром промышленности и науки раннего Петербурга.

К концу XIX века число островов в дельте Невы, ранее насчитывающее 101 остров, вследствие намывов и засыпки каналов сократилось до 48, что изменило гидрографию региона и позволило расширить городскую территорию, одновременно увеличив риск заиливания оставшихся протоков. Отсутствие системного подхода к намывным работам и недостаток технологий ограничивали их эффективность, что требовало разработки новых методов в XX веке для удовлетворения растущих потребностей города.

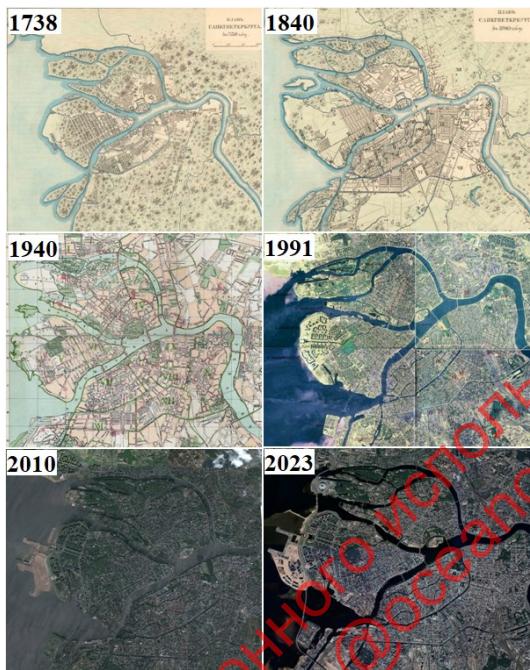


Рисунок 34. Исторические карты окрестностей города Санкт-Петербурга за 1738, 1840, 1940, 1991 и спутниковые снимки Невской дельты за 2010 и 2023 гг. [78–80].

В XX веке намывные технологии в Санкт-Петербурге сильно изменились, благодаря внедрению механизации, что позволило создавать обширные территории для жилых, промышленных и рекреационных нужд, существенно расширяя городскую инфраструктуру (Рисунок 35). Использование земснарядов с высокой производительностью позволило сократить сроки намывных работ с месяцев до недель, что стало значительным прогрессом по сравнению с ручным трудом XVIII–XIX веков. После наводнения 1924 года намывные и насыпные территории стали рассматриваться и как защита от наводнений, путём поднятия уровня земли. Была изменена конфигурация и высота Елагина острова, в соответствии с концепцией, существовавшей в то время. В 1930-х годах был насыпан холм на Крестовском острове, который послужил основой для стадиона имени Кирова. В это же время был образован Гребной канал. Предполагалось, что приморские берега Ленинграда будут представлять собой цепь парков и зелёных зон, продолжающуюся курортами от Лисьего Носа до Сестрорецка. В пятидесятых годах XX века началась разработка генеральных планов, по которым город развивался до середины 1990-х годов. В 1960–1970-х годах крупные проекты в Приморском, Крестовском и Красносельском районах, созданные по Генеральному плану развития Ленинграда, утверждённому в 1966 году [81,82]. План предполагал масштабное осушение и поднятие уровня суши в районе Лахты и на Васильевском острове, а также на Юго-западе, где впоследствии был создан Южно-приморский парк. Проект «Балтийская жемчужина» на юго-западе города, был реализован на намыве, созданном в 1960-80 годах. В 2005 году была начата застройка и комплексное освоение намывных территорий площадью более 200 га. К настоящему моменту введено более миллиона квадратных метров жилой и коммерческой

недвижимости, а также более 14 объектов социальной инфраструктуры. В 1960-х годах на месте Белой отмели был искусственно сооружён Белый остров, предназначенный для строительства будущей Центральной станции аэрации Санкт-Петербурга. Для этого было намыто около двух миллионов кубометров грунта. Общая площадь составила более 50 га [83]. В 1995 году заложен парк 300-летия Санкт-Петербурга на насыпных территориях (первоначальная площадь 89 га, но позднее территория была отдана под коммерческую застройку – осталось 38,58 га) [84]. Генплан предусматривал расширение жилых районов к морскому побережью и формирование архитектурного комплекса на северо-западной части Васильевского острова. Было добавлено около 400 гектар новых территорий, обеспечив жильё для десятков тысяч человек и создав морской фасад города. На Васильевском острове было спрятано русло реки Смоленки, изменена конфигурация береговой линии, был ликвидирован проток между островами Декабристов и Вольным. Облик выходящий к морю части новых территорий стал архитектурным образом Васильевского острова на несколько десятилетий.



Рисунок 35. Схема новых намывных территорий г. Санкт-Петербурга, созданных в период 1913-2025 гг. Данные получены оцифровкой топографических и спутниковых карт с архивного ресурса retromap.ru.

Намывные территории, созданные в XXI веке у Васильевского острова, включают в себя крупный градостроительный проект «Морской фасад», начатый в 2006 году на Васильевском острове. «Морской фасад» стал крупнейшим намывным проектом XXI века в Санкт-Петербурге, добавив 476 га территории для жилых кварталов, коммерческих зон, парков и набережных (Рисунок 36 - Рисунок 38). Работы были инициированы на основании «Концепции развития Васильевского острова», утверждённой Постановлением Правительства Санкт-Петербурга № 1235 от 15.11.2005, которое предусматривало расширение городской территории для жилья и инфраструктуры. Использование земснарядов с GPS- и ГЛОНАСС-навигацией и современными технологиями и оборудованием обеспечило высокую устойчивость грунта и сократило эрозию по сравнению с проектами XX века. Автоматизация процессов, включая системы мониторинга в реальном времени, в том числе с помощью дронов, снизила затраты, увеличила точность, позволило завершить некоторые этапы раньше запланированных сроков.

Работы были начаты в 2006 году, до 2008 шли подготовительные работы, установка геотекстиля, создание пионерной дамбы и намыв первых площадей (около 100 га), начало экологического мониторинга. В 2008 году был открыт Морской пассажирский порт (643289 пассажиров в год на 2019 год [85]. Экономический кризис 2008-2009 годов затормозил и практически остановил работы, в 2010-2011 годах строительство намыва было продолжено. В 2009–2012 произведён намыв основной части территорий, и завершено строительства первых жилых комплексов. В 2017-2025 годах продолжилось расширение намывных территорий, ввод жилых и коммерческих площадей, объектов социальной инфраструктуры, продолжилось строительство

развязок ЗСД на намывных территориях и Васильевском острове. С 2022 по 2024 год проводились работы по созданию «Северного намыва» площадью 162 га, работы, планировавшиеся к завершению в конце 2025 года, были закончены на год раньше. В настоящее время идёт создание дорожной сети и строительство жилой, коммерческой недвижимости и социальных объектов. Завершение освоения территории планируется в 2034 году.

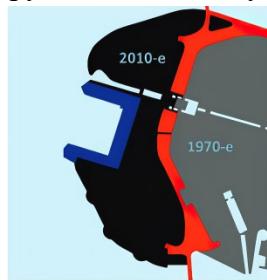


Рисунок 36. Развитие намывной территории на западе Васильевского острова и схема её функционального зонирования (синим цветом выделен порт, красным – ЗСД с её санитарно-защитной зоной, чёрным – селитьба) [86].



Рисунок 37. Территориальное развитие Васильевского острова. Три этапа намыва земель: А – состояние застройки в 1820-е гг., Б – благоустроенный намывной городской район начала XXI века, В – проект намывной площадки в 400 га на 2014-й год [77].



Рисунок 38. Постепенное уменьшение роли акватории в проектах намыва на Васильевском острове [86].

В настоящее время на территории Санкт-Петербурга существует несколько проектов по созданию искусственных земельных участков. Создан намыв в районе Лахты (50 га) для строительства комплекса «Лахта Центр», самого высокого здания Европы (462 м). Еще два проекта были запланированы до принятия федерального закона, регулирующего вопросы искусственных земельных участков: проект «Северный парус» по расширению территории города Кронштадта и проект «Новый Берег» около г. Сестрорецка, который предполагает создание 2-х искусственных островов площадью 379,9 га [87] (Рисунок 39). Реализация проекта будет проходить в соответствии

с Генеральным планом развития Санкт-Петербурга до 2035 года. Здесь компанией «Северо-Запад Инвест» будет построен жилой микрорайон с населением в несколько десятков тысяч человек [88].



Рисунок 39. Схема комплексной организации намывных территорий г. Санкт-Петербурга в XXI веке [89]

Полностью реализован намыв в 16,6 га на Крестовском острове, где была разработана документация по обоснованию создания искусственного земельного участка на водном объекте согласно приказу Минприроды № 198 от 29.06.2012. По установленным с 2011 г. требованиям был оформлен проект намыва «Залив островов», по которому получен отказ в выдаче разрешения на создание искусственного земельного участка из-за слабо проанализированного влияния на экологию Финского залива [89].

В XXI веке намыв стал стратегическим инструментом градостроительства, интегрируя жилые, транспортные и защитные функции в единую систему. Намывные территории в XXI веке стали не только инженерным, но и социальным проектом, создав современные районы для сотен тысяч жителей и формируя облик морского фасада Санкт-Петербурга.

Только для информационного использования
правообладатель: admpro@oceandgraphy.ru

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИИ О РАСХОДАХ И УРОВНЯХ ВОДЫ И ЕЁ ПОДГОТОВКА К УСВОЕНИЮ В ИСПОЛЬЗУЕМОМ МОДЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ.

2.1. Режим речного стока

Данные и методы исследования речного стока

Сток р. Нева, поступающий в Финский залив Балтийского моря, формируется на водосборе площадью 281 000 км² [36]. Характеристика режима стока Невы составлена по данным среднесуточных наблюдений за речным стоком, представленным на гидрологическом посту Новосаратовка с координатами 59.837° с. ш. и 30.529° в.д. Пункт располагается в 12 км устья и в 60 км от истока реки Невы. Период наблюдений составляет около 78 лет – с 1945 по 2022 гг. Источником данных является Глобальный центр данных о стоке (GRDC, <https://grdc.bafg.de/>), представляющий собой международный центр данных о водных ресурсах, созданный в 1988 году и работающий под эгидой Всемирной метеорологической организации (ВМО).

Для описания гидрологического режима реки Невы производился анализ межгодовой и сезонной изменчивости её расходов воды. Оценке подвергались как средние, так и экстремальные значения речного стока.

Межгодовая изменчивость стока реки Невы исследовалась по среднегодовым расходам воды. Для характеристики многолетних изменений стока Невы производилась оценка комплекса статистических параметров: минимумов, максимумов, размаха колебаний, математического ожидания, стандартного отклонения и коэффициента вариации.

Многолетний тренд рассчитывался при помощи уравнения линейной регрессии, статистическая значимость коэффициентов которого определялась по двухстороннему критерию Стьюдента при уровне значимости $\alpha=5\%$:

$$y = ax + b; \quad (1)$$

$$t > t_{kp}(\alpha/2, n - 2); \quad t_a = \frac{|a|}{\sigma_a}; \quad (2)$$

где a и b – коэффициенты линейной регрессии, и их стандартные ошибки σ_a, σ_b , y – значения тренда в момент времени x – ошибка коэффициента, n – длина исходного ряда.

Поведение межгодовых колебаний определялось по конечно-интегральной кривой $dQ(t)$, рассчитываемой следующим образом:

$$dQ(t) = \sum_{i=1}^t (Q(t) - \bar{Q})/\sigma_Q; \quad (3)$$

где $Q(t)$ – расход воды в момент времени t , \bar{Q} – климатическая норма, σ_Q – стандартное отклонение расходов за весь период наблюдения.

При помощи распределения Пирсона III типа рассчитывались расходы различной обеспеченности: 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95, 97, 99 %. Также оценивалась величина модуля стока как отношение средней многолетней величины стока к площади водосбора.

Спектральная структура многолетних колебаний стока Невы изучалась в стационарном и нестационарном приближении.

Стационарная оценка спектра колебаний речного стока осуществлялась при помощи дискретного преобразования Фурье:

$$Y(k) = \sum_{j=1}^N x(j) * \omega_N^{(j-1)(k-1)}; \quad (4)$$

где $Y(k)$ – коэффициенты разложения, соответствующие своей частоте ω , $x(j)$ – исходный ряд, N – длина ряда, k – номер коэффициента.

Нестационарная оценка спектра колебаний речного стока была реализована через одиночное вейвлет-преобразование, использующее в качестве основы аналитический вейвлет Морле Ψ с несущей частотой $\upsilon = 6$ и параметром нормализации $\alpha_\upsilon = 2$ [90]:

$$X_\Psi(a, b) = \frac{1}{|a|^{\frac{1}{2}}} * \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) * \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt; \quad (5)$$

$$\Psi(t) = \alpha_\upsilon e^{-\frac{1}{2}t^2} \left[e^{i\upsilon t} - e^{-\frac{1}{2}\upsilon^2} \right]; \quad (6)$$

где a – масштаб, b – сдвиг, позиция, $\left(\frac{t-b}{a}\right)$ – масштабный коэффициент, Ψ – аналитический вейвлет Морле.

Сезонная изменчивость стока реки Невы исследовалась по среднемесячным расходам воды. В рамках исследования оценивался средний за период наблюдений сезонных ход речного стока. Для каждого из 4-х сезонов года рассчитывались общая водность стока и её статистические параметры в процессе межгодовой изменчивости: абсолютный минимум и максимум, математическое ожидание, стандартное отклонение, коэффициент вариации.

При помощи распределения Пирсона III типа за каждый месяц оценивалась расходы речного стока с обеспеченностью 5, 25, 50, 75, 95 %. Соответствующие им перцентили были посчитаны для объемов стока, приходящихся на каждый из 4-х сезонов года (зима, весна, лето, осень).

Временная изменчивость экстремумов стока реки Невы рассчитывалась для минимальных и максимальных за год расходов воды. Для межгодовых изменений экстремумов стока рассчитывались их характерные значения: абсолютный минимум и максимум, математическое ожидание, стандартное отклонение, коэффициент вариации.

Анализ многолетнего тренда изменений экстремумов и его статистическая значимость определялись уравнением линейной регрессии (см. формулы 1 и 2).

Поведение межгодовых колебаний экстремумов определялось по конечно-интегральной кривой в соответствии с формулой 3.

При помощи распределения Пирсона III типа оценивались расходы стока различной обеспеченности: 0,1, 1, 2, 5, 10, 15, 25 % - для максимумов стока; 75, 80, 85, 90, 95, 97, 99 % - для минимумов стока. Также производился подсчёт таких гидрологических параметров как модуль стока, коэффициент вариации и асимметрии.

Анализ изменчивости экстремумов для каждого из месяцев года производился при помощи диаграммы размаха («ящик с усами»).

Межгодовая изменчивость стока реки Невы

Рисунок 40 показывает временной ход среднегодовых значений речного стока Невы за период 1945-2022 гг. Средний многолетний расход реки составляет около $2465 \text{ м}^3/\text{с}$. В ряду наблюдений отмечается два крупных максимума в 1958 и 1982 гг. с расходами более $3000 \text{ м}^3/\text{с}$, а также два выраженных минимума в 1973 и 2003 гг., не превышающих отметку $1700 \text{ м}^3/\text{с}$. Регистрируется статистически значимая тенденция к росту среднего расхода воды в Неве величиной порядка $+1,73 \text{ м}^3/\text{с}$ в год.

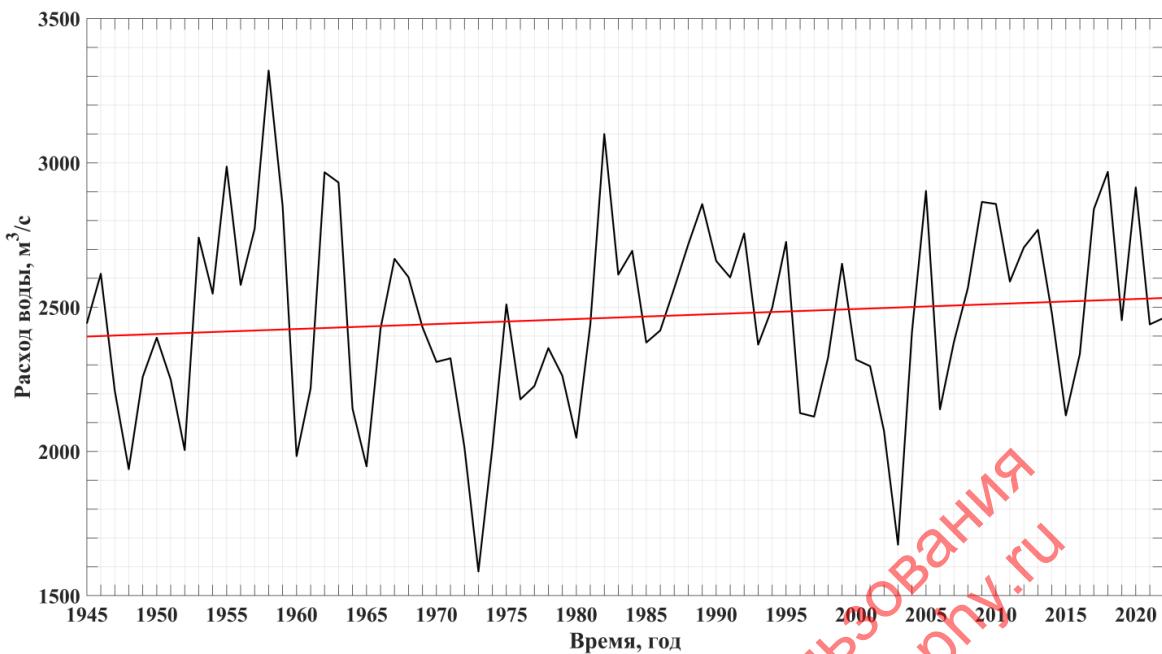


Рисунок 40. Временной ход среднегодовых значений речного стока реки Невы за 1945-2022 гг.

Анализ конечно-интегральной кривой (Рисунок 41) регистрирует наличие нескольких переходных моментов в динамике средних расходов Невы, которые приходятся на 1952, 1963, 1981, 1995 и 2004 гг. В эти моменты накопление аномалий (отклонений от климатической нормы) стока воды с одним знаком прекращается и начинает приобретать противоположную тенденцию.

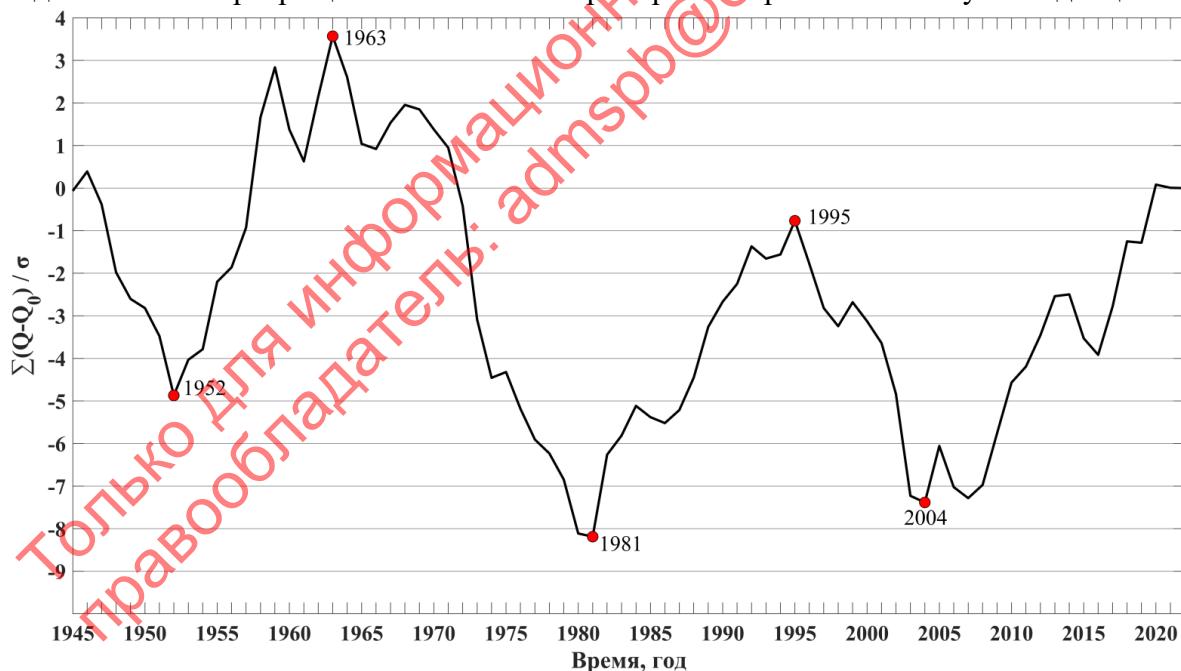


Рисунок 41. Конечно-интегральная кривая изменчивости среднегодовых значений речного стока реки Невы за 1945-2022 гг.

Согласно сведением Таблица 1 размах межгодовых изменений среднего стока Невы за период 1945-2022 гг. составляет $1736 \text{ м}^3/\text{с}$ - с $1584 \text{ м}^3/\text{с}$ по $3320 \text{ м}^3/\text{с}$. Среднеквадратическое отклонение стока – $330 \text{ м}^3/\text{с}$, что составляет около 13% от климатической нормы ($Cv=0,13$). При этом выделяются два десятилетия - 1950-е, и 2000-е гг, в пределах которых наблюдается повышенная изменчивость стока (СКО более $390 \text{ м}^3/\text{с}$).

Таблица 1. Статистические характеристики распределения среднегодовых значений речного стока Невы за различные периоды времени.

Период времени	Минимум, м ³ /с	Максимум, м ³ /с	Размах, м ³ /с	Средний расход, м ³ /с	СКО, м ³ /с	Коэффициент вариации
1951-1960 гг.	1984	3320	1336	2603	427	0,16
1961-1970 гг.	1948	2967	1019	2465	331	0,13
1971-1980 гг.	1584	2510	926	2152	256	0,12
1981-1990 гг.	2377	3100	723	2644	219	0,08
1991-2000 гг.	2121	2755	634	2450	232	0,09
2001-2010 гг.	1677	2902	1225	2417	396	0,16
2011-2020 гг.	2125	2969	844	2618	271	0,10
1945-2022 гг.	1584	3320	1736	2465	330	0,13

Распределение среднегодовых расходов реки Невы, в целом, хорошо согласуются с теоретической кривой Пирсона III типа (Рисунок 42), по которой были рассчитаны характеристики стока различной обеспеченности (Таблица 2). Параметр модуля стока реки Невы равен 8,8 л/(с·км²).

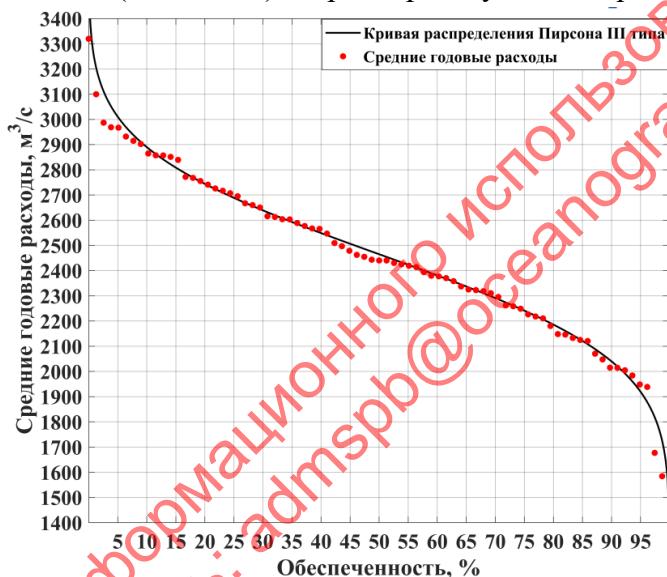


Рисунок 42. Сравнение теоретического распределения среднегодового стока с эмпирическими данными, полученными за период 1945-2022 гг.

Таблица 2. Параметры среднегодовых колебаний стока реки Невы.

Модуль стока, л/с·км ²	C _v	1%	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%	97%	99%
8,8	0,13	3237	3011	2890	2689	2465	2241	2040	1919	1841	1693

Стационарный Фурье-анализ многолетних изменений среднего стока Невы показал наличие значительных циклических колебаний на периодах 3-4,5, 6, 13 и 26 лет с амплитудами от 125 до 225 м³/с (Рисунок 43а). Согласно результатам вейвлет-диаграммы короткопериодные максимумы энергии приходятся на интервалы наблюдений 1955-1970 и 2003-2007 гг. Менее интенсивные низкочастотные пики с периодами 6 и 13 лет регистрируются, соответственно, в 1975-1985 гг. и 1960-1970 гг. (Рисунок 43б).

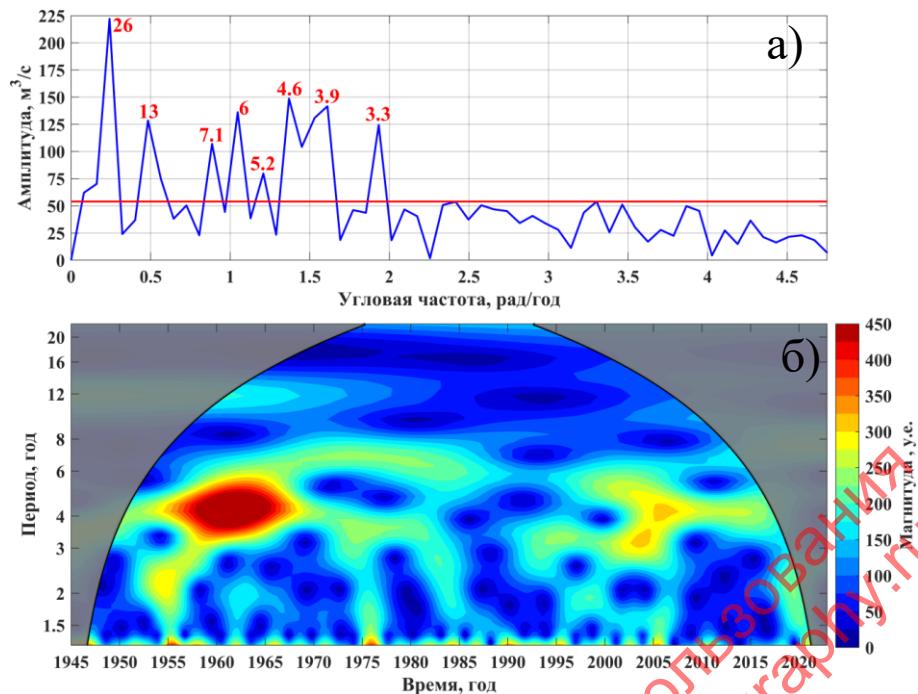


Рисунок 43. Амплитудный спектр Фурье (а) и вейвлет диаграмма (б) изменчивости среднегодовых значений стока Невы за период 1945-2022 гг.

Сезонная изменчивость стока реки Невы

Рисунок 44 демонстрирует средний сезонный ход речного стока Невы за период наблюдений. Оценки показывают, что сток реки оказывается довольно равномерно распределённым в течение года. Доля каждого месяца в годовой расход варьируется в пределах от 5,6% до 10,3%. Минимальные расходы воды (1655-1940 м³/с) наблюдаются с декабря по март, а максимальные (2660-3030 м³/с) охватывают промежуток с мая по октябрь.

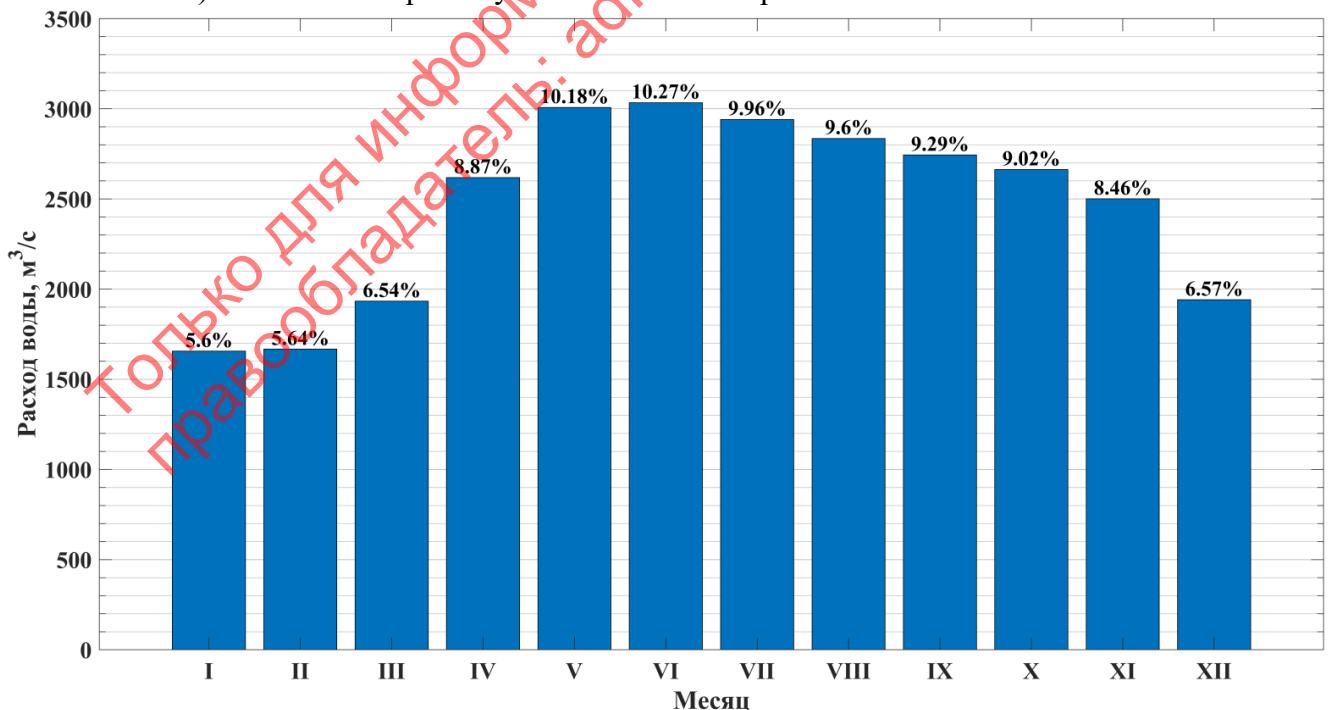


Рисунок 44. Внутригодовое распределение средних месячных значений стока Невы за период 1945-2022 гг.

Межгодовая изменчивость объёма стока каждого из 4-х сезонов представлена на Рисунок 45. Водность стока Невы в зимний и весенний сезон обнаруживает статистически значимую положительную тенденцию к росту своих значений, что не было зафиксировано для летнего и осенних периодов года.

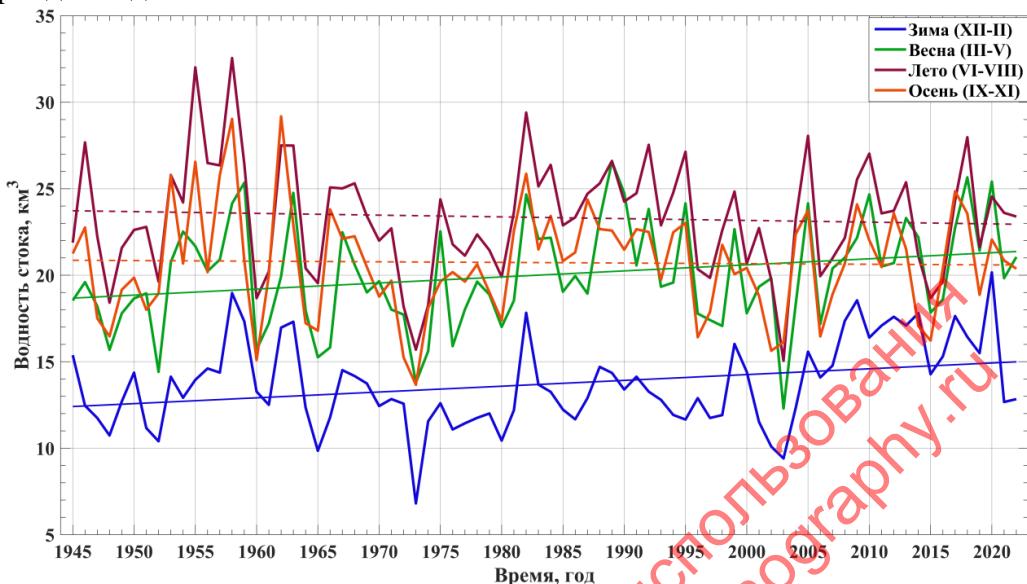


Рисунок 45. Сезонный сток Невы многолетнего периода 1945-2022 гг. на ГП Новосаратовка.

Статистические характеристики об объёме стока Невы в различные сезоны года указаны в Таблица 3. В соответствии с ними, наименьшая водность реки отмечается зимой ($6,8-20,2 \text{ км}^3$), а наибольшая прослеживается летом и осенью (с $13,7-15,1 \text{ км}^3$ до $29,2-32,2 \text{ км}^3$). В целом, стандартное отклонение стока за отдельный сезон составляет около $2,5-3,0 \text{ км}^3$, а коэффициент вариации равен примерно 0,15.

Таблица 3. Характерные значения сезонного стока Невы за период 1945-2022 гг.

Параметры	Зима (XII-II)		Весна (III-V)		Лето (VI-VIII)		Осень (IX-XI)	
	км ³	год	км ³	год	км ³	год	км ³	год
Среднее	13,7		20		23,3		20,7	
Наибольшее	20,2	2020	26,6	1989	32,6	1958	29,2	1962
Наименьшее	6,8	1973	12,3	2003	15,1	2003	13,7	1973
СКО	2,5		3,0		3,3		3,1	
Cv	0,18		0,15		0,14		0,15	

При помощи распределения Пирсона III типа были рассчитаны месячные расходы Невы с различной обеспеченностью - 5, 25, 50, 75, 95 % (Рисунок 46, Таблица 4). Вне зависимости от обеспеченности стока гидрограф имеет однотипную форму с единственным протяжённым пиком, минимумом в январе и максимумом в мае. Для многоводных лет (5% и 25%) отмечается смещение минимума стока с января на февраль. В средние по водности годы (50%) весенний подъем стока имеет наибольшую скорость, что подтверждается соответствующим уклоном кривой. В маловодные годы (95%) максимум стока смещается с мая на июнь.

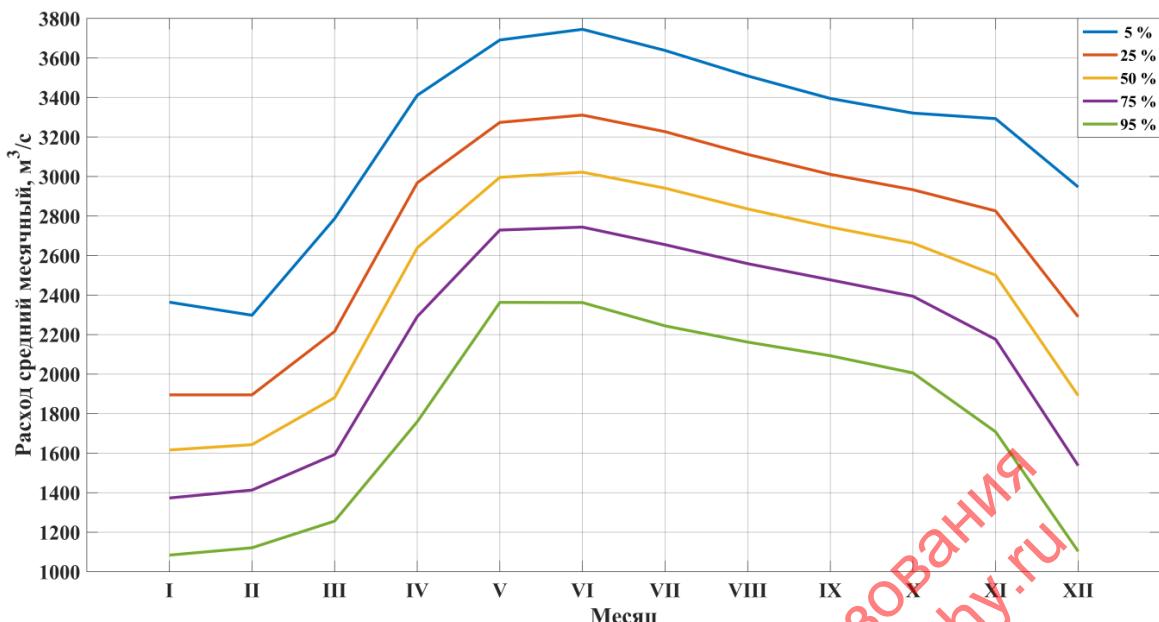


Рисунок 46. Внутригодовое распределения значений речного стока Невы различной обеспеченности за период 1945-2022 гг.

Таблица 4. Внутригодовое распределения значений речного стока Невы различной обеспеченности за период 1945-2022 гг.

P(%)	Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	XIX	X	XI	XII	весь
5%	%	6,2	6	7,3	8,9	9,6	9,8	9,5	9,1	8,8	8,6	8,5	7,7	
	м³/с	2364	2298	2787	3411	3691	3745	3638	3509	3395	3321	3293	2947	38399
25%	%	5,7	5,8	6,7	9,1	9,9	10	9,8	9,4	9,2	8,9	8,6	6,9	
	м³/с	1895	1895	2216	2968	3274	3314	3227	3112	3011	2933	2826	2290	32958
50%	%	5,5	5,6	6,4	9	10,2	10,3	10	9,7	9,3	9,1	8,5	6,4	
	м³/с	1616	1643	1881	2639	2996	3022	2941	2836	2744	2663	2501	1891	29373
75%	%	5,3	5,4	6,2	8,8	10,5	10,6	10,3	9,9	9,5	9,2	8,4	5,9	
	м³/с	1373	1413	1593	2291	2729	2744	2655	2559	2477	2394	2176	1537	25941
95%	%	5,1	5,3	5,9	8,3	11,1	11,1	10,6	10,2	9,8	9,4	8	5,2	
	м³/с	1084	1121	1256	1759	2363	2362	2244	2162	2093	2006	1708	1103	21261

В Таблица 5 приведены сезонные оценки водности Невы с различной обеспеченностью - 5, 25, 50, 75, 95 %. Вне зависимости от обеспеченности распределение объёма стока характеризуется минимумом зимой (17,0-18,3%) и максимумом летом (29,0-30,7%). В наиболее маловодные годы (95%) водность реки составляет чуть менее 60 км³, а в наиболее многоводные годы (5%) – около 95 км³.

Таблица 5. Внутригодовое распределения объёма стока Невы различной обеспеченности за период 1945-2022 гг.

Обеспеченность	Единицы измерения	Зима (XII-II)	Весна (III-V)	Лето (VI-VIII)	Осень (IX-XI)	Год, км ³
5%	%	18,3	26,0	29,0	26,7	
	км ³	17,8	25,1	28,0	25,8	96,7
25%	%	17,9	26,0	29,6	26,5	
	км ³	15,3	22,2	25,3	22,6	85,4
50%	%	17,2	25,6	30,4	26,8	
	км ³	13,3	19,7	23,4	20,6	77,0
75%	%	17,0	25,8	30,2	27,0	
	км ³	11,9	18,0	21,1	18,9	69,9
95%	%	17,0	25,8	30,7	26,5	
	км ³	10,2	15,4	18,3	15,8	59,7

Максимальный сток

Анализ межгодовой изменчивости максимумов стока Невы показал существенные колебания параметра за период наблюдений 1945-2022 гг. (Рисунок 47). Средний многолетний максимум расхода реки равен около 3223 м³/с. В исследуемом ряду выделяется два крупных максимума в 1955 и 1958 гг. с расходами более 4000 м³/с, а также четыре выраженных минимума в 1973, 1974, 2003 и 2015 гг. величиной менее 2600 м³/с. Статистически значимой тенденции в динамике годовых максимумов стока Невы не отмечается.

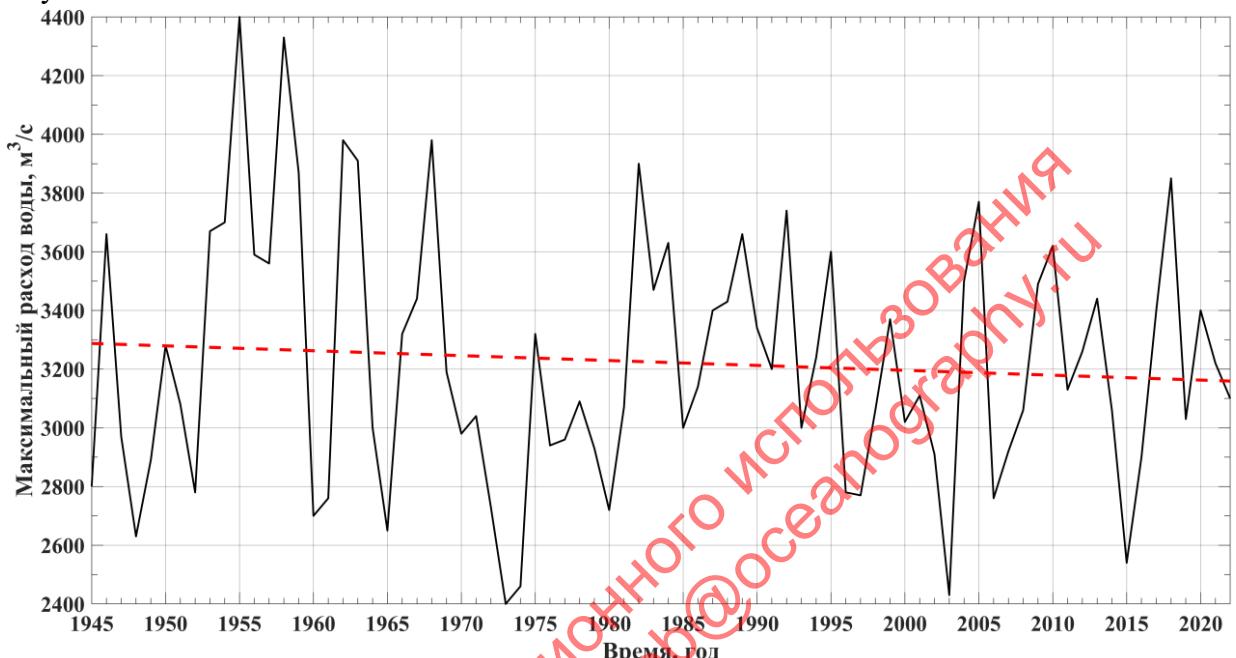


Рисунок 47. Временной ход максимальных значений речного стока реки Невы за 1945-2022 гг.

В изменении годовых максимумов стока Невы прослеживается несколько переходных моментов: в 1952, 1968, 1981, 1995 гг., когда накопление аномалий (отклонений от среднего) одного и того же знака прерывается, что хорошо выражено в конечно-интегральной кривой (Рисунок 48).

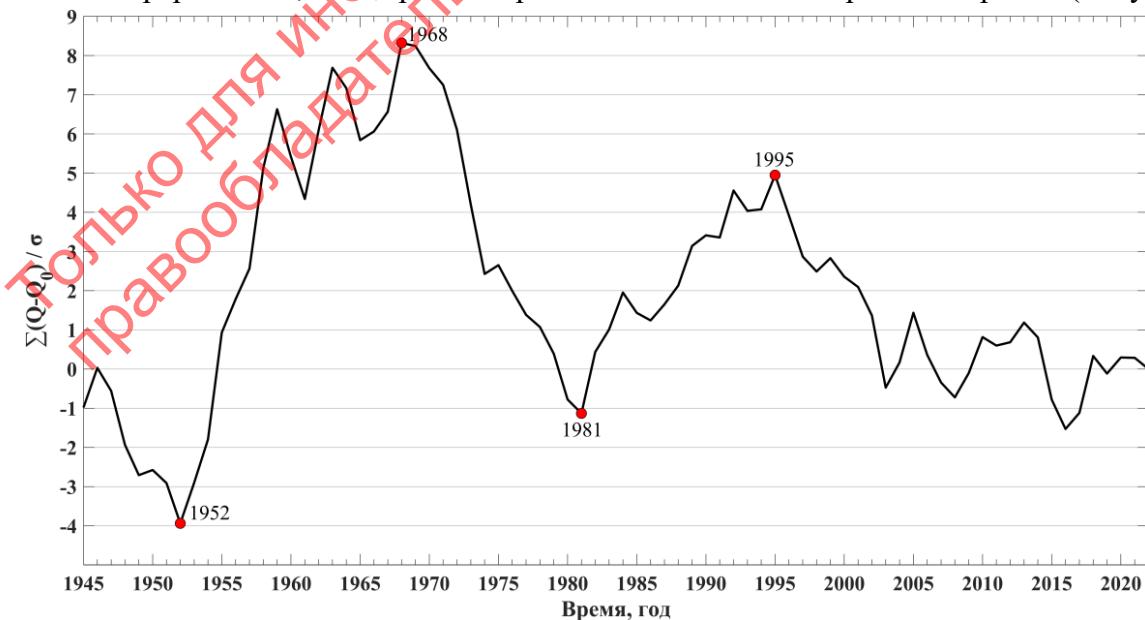


Рисунок 48. Конечно-интегральная кривая изменчивости максимальных значений речного стока реки Невы за 1945-2022 гг.

Согласно сведением Таблица 6 размах межгодовых колебаний максимального стока Невы за период 1945-2022 гг. составляет $2000 \text{ м}^3/\text{с}$ - с $2400 \text{ м}^3/\text{с}$ по $4400 \text{ м}^3/\text{с}$. Среднеквадратическое отклонение стока – $431 \text{ м}^3/\text{с}$, что составляет около 13% от климатической нормы ($Cv=0,13$). При этом выделяется два десятилетия – 1950-е и 1960-е гг, в пределах которых наблюдается повышенная изменчивость максимального стока (СКО более $490 \text{ м}^3/\text{с}$).

Таблица 6. Статистические характеристики распределения максимальных значений речного стока Невы за различные периоды времени.

Период времени	Минимум, $\text{м}^3/\text{с}$	Максимум, $\text{м}^3/\text{с}$	Размах, $\text{м}^3/\text{с}$	Средний расход, $\text{м}^3/\text{с}$	СКО, $\text{м}^3/\text{с}$	Коэффициент вариации
1951-1960 гг.	2700	4400	1700	3568	578	0,16
1961-1970 гг.	2650	3980	1330	3321	498	0,15
1971-1980 гг.	2400	3320	920	2859	284	0,1
1981-1990 гг.	3000	3900	900	3404	282	0,08
1991-2000 гг.	2770	3740	970	3178	322	0,1
2001-2010 гг.	2430	3770	1340	3157	426	0,13
2011-2020 гг.	2540	3850	1310	3201	356	0,11
1945-2022 гг.	2400	4400	2000	3223	431	0,13

Распределение максимальных расходов реки Невы сравнительно хорошо описывается теоретической кривой Пирсона III типа (Рисунок 49), по которой были рассчитаны характеристики максимального стока различной обеспеченности (Таблица 7). Параметр модуля максимального стока реки Невы равен $11,5 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$, а отношение C_s/C_v составляет 3,31.

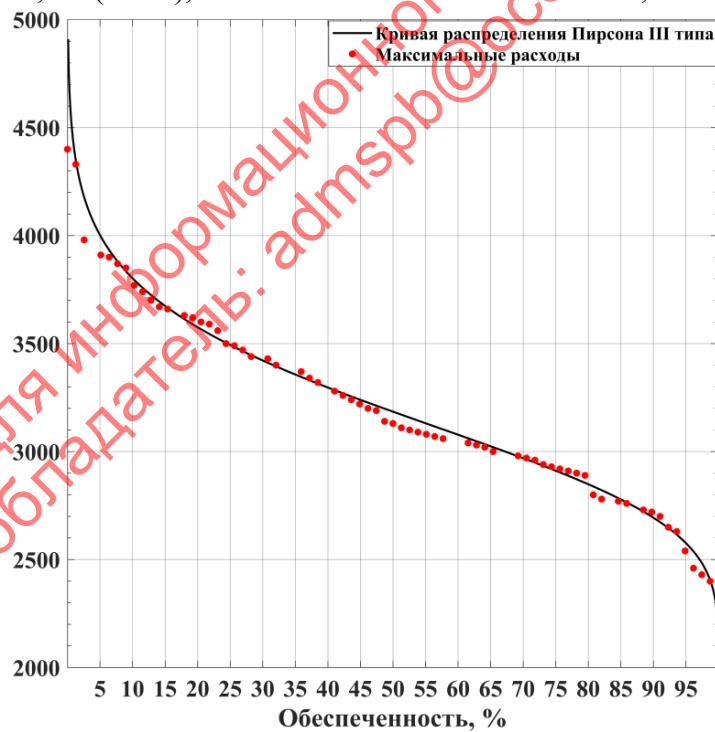


Рисунок 49. Сравнение теоретического распределения минимального стока с эмпирическими данными, полученными за период 1945-2022 гг.

Таблица 7. Статистические характеристики распределения максимальный за год значений речного стока Невы за различные периоды времени.

Модуль стока, $\text{л}/\text{с} \cdot \text{км}^2$	Средний многолетний расход, $\text{м}^3/\text{с}$	C_v	C_s / C_v	0.1%	1%	2%	5%	10%	15%	25%
11,5	3223	0,13	3,31	4909	4407	4240	4002	3803	3674	3494

Межгодовая изменчивость максимумов расходов реки Невы за каждый отдельный месяц отображена в коробчатых диаграммах (Рисунок 50). Данная диаграмма демонстрирует разницу между рядами значений максимальных расходов, наблюдаемых в разные месяцы, и их асимметрию. Видно, что наименьший разброс имеют максимумы в осенний период (сентябрь-октябрь), а наибольший разброс – в начале зимы (декабрь) и весны (март). Средние медианные оценки показывают минимум характеристики расхода в январе, а её максимум – в июне.

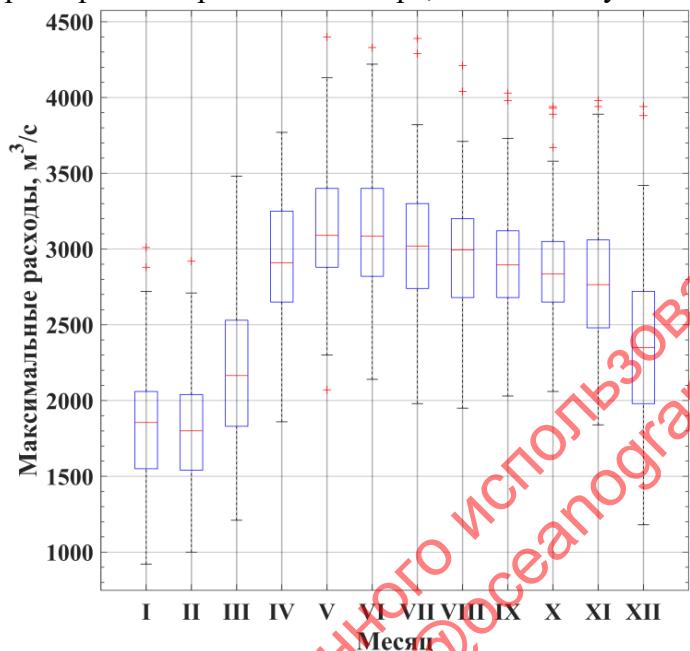


Рисунок 50. Распределение максимумов расходов по месяцам на ГП Новосаратовка 1945-2022 гг.

Минимальный сток

Анализ межгодовой изменчивости минимумов стока Невы показал выраженные колебания параметра за период наблюдений 1945-2022 гг. (Рисунок 51). Средний многолетний минимум расхода реки равен около $1336 \text{ м}^3/\text{с}$. В исследуемом ряду выделяются два крупных максимума в 1958 и 2009 гг. с расходами более $2000 \text{ м}^3/\text{с}$, а также три выраженных минимума в 1973, 1976, 2002 гг. величиной менее $600 \text{ м}^3/\text{с}$. Отмечается статистически значимая положительная тенденция к росту годовых минимумов стока Невы на величину $+5.79 \text{ м}^3/\text{с}$.

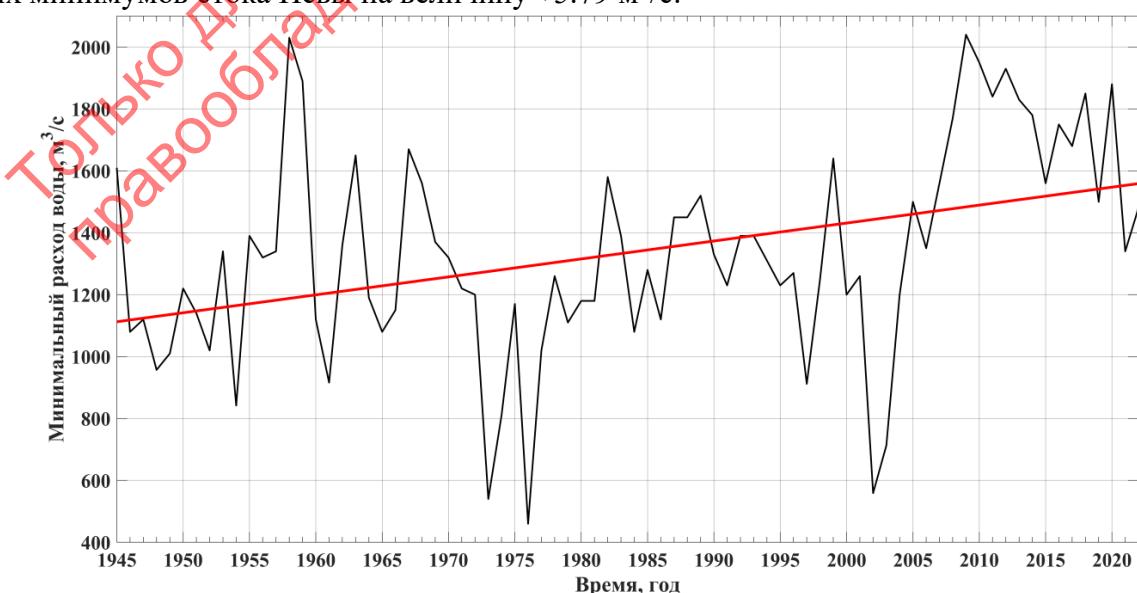


Рисунок 51. Временной ход минимальных значений речного стока реки Невы за 1945-2022 гг.

В изменении годовых минимумов стока Невы прослеживается несколько переходных моментов: в 1954, 1970, 2004 гг., когда накопление аномалий (отклонений от среднего) одного и того же знака прерывается, что хорошо выражено в конечно-интегральной кривой (Рисунок 52).

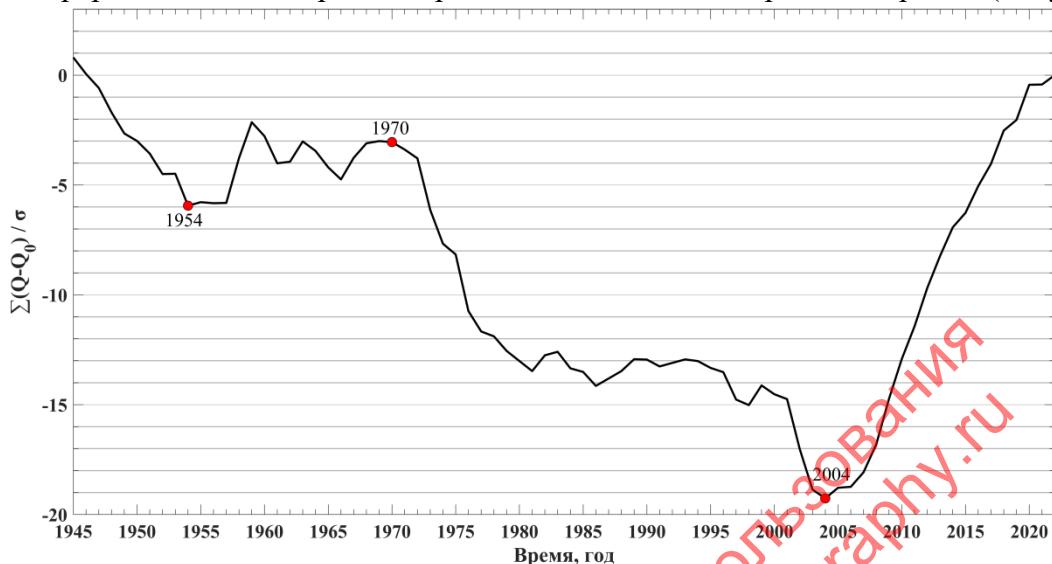


Рисунок 52. Конечно-интегральная кривая изменчивости минимальных значений речного стока реки Невы за 1945-2022 гг.

Согласно сведением Таблица 8 размах межгодовых колебаний минимального стока Невы за период 1945-2022 гг. составляет $1580 \text{ м}^3/\text{с}$ - с $460 \text{ м}^3/\text{с}$ по $2040 \text{ м}^3/\text{с}$. Среднеквадратическое отклонение стока – $340 \text{ м}^3/\text{с}$, что составляет около 25% от климатической нормы ($Cv=0,25$). При этом выделяются два десятилетия – 1950-е и 2000-е гг, в пределах которых наблюдается повышенная изменчивость максимального стока (СКО более $360 \text{ м}^3/\text{с}$).

Таблица 8. Статистические характеристики распределения минимальных значений речного стока Невы за различные периоды времени.

Период времени	Минимум, $\text{м}^3/\text{с}$	Максимум, $\text{м}^3/\text{с}$	Размах, $\text{м}^3/\text{с}$	Средний расход, $\text{м}^3/\text{с}$	СКО, $\text{м}^3/\text{с}$	Коэффициент вариации
1951-1960 гг.	842	2030	1188	1343	368	0,27
1961-1970 гг.	916	1670	754	1327	249	0,19
1971-1980 гг.	460	1260	800	997	292	0,29
1981-1990 гг.	1080	1580	500	1338	171	0,13
1991-2000 гг.	912	1640	728	1282	183	0,14
2001-2010 гг.	559	2040	1481	1390	486	0,35
2011-2020 гг.	1500	1930	430	1760	140	0,08
1945-2022 гг.	460	2040	1580	1336	340	0,25

Распределение максимальных расходов реки Невы сравнительно хорошо описывается теоретической кривой Пирсона III типа (Рисунок 53), по которой были рассчитаны характеристики максимального стока различной обеспеченности (Таблица 9). Параметр модуля максимального стока реки Невы равен $4,8 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$, а отношение Cs/Cv составляет -0,36.

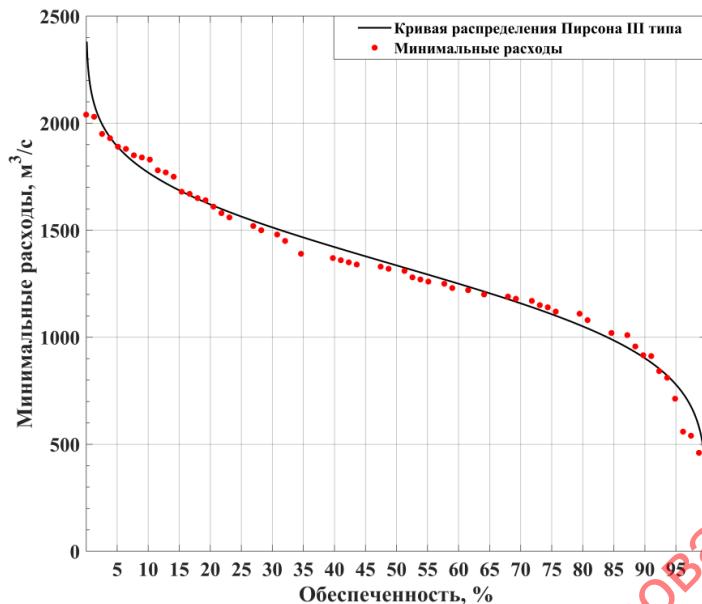


Рисунок 53. Сравнение теоретического распределения минимального стока с эмпирическими данными, полученными за период 1945-2022 гг.

Таблица 9. Статистические характеристики распределения минимальных за год значений речного стока Невы за различные периоды времени.

Модуль стока, л/с*км ²	Средний многолетний расход, м ³ /с	C_v	C_s / C_v	75%	80%	85%	90%	95%	97%	99%
4,8	1336	0,25	-0,36	1108	1051	985	902	779	699	549

Межгодовая изменчивость минимумов расходов реки Невы за каждый отдельный месяц описана коробчатыми диаграммами (Рисунок 54). Данная диаграмма демонстрирует разницу между рядами значений минимальных расходов, наблюдаемых в разные месяцы, и их асимметрию. Видно, что наименьший разброс имеют минимумы в зимний период (декабрь-февраль), а наибольший разброс – в конце осени (ноябрь). Средние медианные оценки показывают минимум характеристики расхода в январе, а её максимум – в июне.

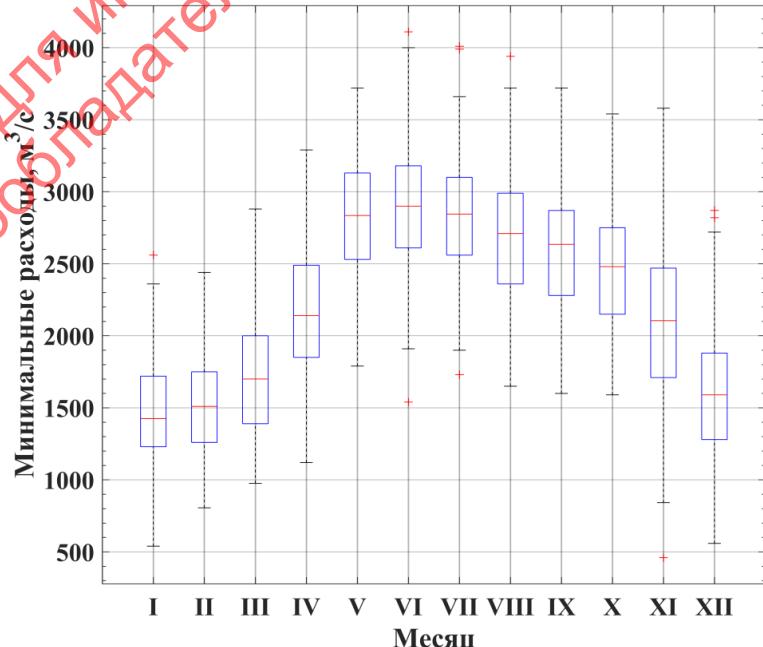


Рисунок 54. Распределение минимальных расходов по месяцам на ГП Новосаратовка 1945-2022 гг.

2.2. Режим уровня моря в Невской губе

Данные и методы исследования уровня моря

Регулярные продолжительные наблюдения за уровнем воды в акватории Невской губы ведутся на 2-х метеографных пунктах ГНС (Таблица 10), находящихся в ведении ФГБУ «Северо-Западное УГМС» (<https://www.meteo.nw.ru/>):

1. Речной гидрологический пост Горный Институт (далее – Горный), расположенный непосредственно в устьевой области реки Невы. Непрерывные высокочастотные измерения на пункте доступны, начиная с 1948 года. Пропуски данных наблюдаются в 1961-1964, 1966, 1969, 1976 гг.
2. Морская метеографная станция Кронштадт расположена на острове Кронштадт, находящемся на западной окраине Невской губы. Непрерывные высокочастотные измерения на пункте доступны, начиная с 1971 года. Пропуски в данных отсутствуют.

Многолетние измерения уровня на станциях были приведены к Балтийской системе высот путём введения дополнительной поправки на ноль поста (-5 м).

Таблица 10. Информация о метеографных измерениях уровня моря (* – станция, расположенная вне акватории Невской губы).

№	Станция	Широта (° с.ш.)	Долгота (° в.д.)	Период наблюдений	Шаг по времени	Длина ряда, час	Пропуски %
1	Горный Институт	59.9291	30.2700	1948-2022	1 час	657 456	13.13
2	Кронштадт	59.9667	29.7500	1971-2021	1 час	447 072	0.00
3	Шепелево*	59.9857	29.1271	1989-2022	1 час	298 032	2.05

Для описания уровненного режима Невской губы в устьевой и открытой части её акватории производился анализ межгодовых и сезонных колебаний уровня, сгонно-нагонных и приливных явлений, изменчивости минимальных и максимальных отметок уровня.

Межгодовая изменчивость уровня в Невской губе исследовалась по среднегодовым значениям данных. Для описания многолетних изменений среднего уровня рассчитывались следующие статистические параметры: минимумов, максимумов, размаха колебаний, математического ожидания, стандартного отклонения и коэффициента вариации. Оценивался многолетний линейный тренд (см. формулы 1 и 2). Поведение межгодовых колебаний определялось по конечно-интегральной кривой (см. формула 3)

При помощи распределения Пирсона III типа рассчитывались уровня воды различной обеспеченности: 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95, 97, 99 %.

Спектральная структура многолетних колебаний уровня моря описывалась при помощи Фурье анализа и вейвлет-анализа (формулы 4, 5, 6).

Сезонная изменчивость уровня в Невской губе анализировалась по среднемесячным значениям данных. Оценивался профиль многолетнего сезонного хода средних, минимальных и максимальных значений уровня воды.

Межгодовая изменчивость сезонных колебаний уровня моря описывалась по диаграмме размаха («ящик с усами»). Также для каждого месяца рассчитывались характерные значения статистик: минимумы, максимумы, математическое ожидание, стандартное отклонение.

Изменчивость экстремальных значений уровня в Невской губе рассчитывалась по минимальным и максимальным за год отметкам воды. Для межгодовых изменений экстремумов рассчитывались их характерные значения: абсолютный минимум и максимум, математическое ожидание, размах, стандартное отклонение, коэффициент вариации. Производилась оценка

многолетнего линейного тренда в изменениях экстремумов (см. формулы 1 и 2). Поведение межгодовых колебаний экстремумов уровня определялось по конечно-интегральной кривой (см. формула 3).

При помощи распределения Пирсона III типа оценивались значения уровня различной обеспеченности: 0.1, 1, 2, 5, 10, 15, 25 % - для максимумов стока; 75, 80, 85, 90, 95, 97, 99 % - для минимумов стока.

Штормовые нагоны уровня в Невской губе исследовались при помощи новой методики, разработанной сотрудниками Санкт-Петербургского отделения ГОИИ специально для выделения опасных подъёмов уровня [91,92]. В её основе штормовой нагон (ШН) представляется как возвышение уровня моря, превышающее некоторое пороговое значение (H_{lim}) относительно средней многолетней отметки. В качестве порогового значения была выбрана величина в 3 стандартных отклонения, принятая в статистике для отсечки аномальных показаний из выборки (так называемых «выбросов»). Учитывая возможное отклонение реальных колебаний уровня от нормального распределения, к был введён корректирующий множитель k (формула 7).

$$H_{lim} = 3 \sigma k; \\ \text{где } k = \sum \frac{(H_{50+i\%} - Me)}{(Me - H_{50-i\%})} / 50 \quad (7)$$

Где H_{lim} – минимальное превышение уровня относительно средней отметки, необходимое для выделения события штормового нагона, σ - стандартное отклонение уровня, k – поправочный коэффициент, учитывающий асимметричность колебаний уровня относительно нормального распределения, Me - медианное значение уровня, $H_{50+i\%}$, $H_{50-i\%}$ - отметки уровня моря, равнодалёные по обеспеченности от медианы на величину $i=1,2,3,\dots,50\%$.

Для применения обозначенного метода расчёта характеристик штормовых нагонов использовались непрерывные ежечасные измерения уровня, ряды которых были центрированы на многолетнее среднее.

Основными анализируемыми характеристиками ШН являлись: количество случаев ШН в течение года (N), их высота относительно среднего уровня (H) и общая продолжительность (T).

Статистический анализ ШН включал оценку среднего, минимального и максимального значений их параметров, стандартного отклонения, а также выявление статистически значимых многолетних тенденций (см. формулы 1 и 2). Также исследовалось внутригодовое распределение случаев ШН.

Приливные колебания уровня в Невской губе характеризовались по материалам современных научных публикаций, написанных в последнее 30-летие [93–96]. Их важной особенностью, по сравнению с более поздними исследованиями, являются: применение новых методик выделения приливных колебаний (спектральный анализ с различной фильтрацией, гармонический анализ), доступность длинных рядов с высокой дискретностью (час и менее), повышенные требования к первичной обработке сигнала, развитие технических средств визуализации пространственной информации.

Анализу подвергались гармонические постоянные (амплитуда и фаза) следующих приливных гармоник: 2-х полусуточных волн M_2 , S_2 и 2 суточных волн O_1 , K_1 . Оценивались средние значения этих гармонических составляющих, их сезонный и многолетний ход. Также описывался общий тип прилива по критерию Куртье [97], возраст приливов, максимально возможные колебания приливного уровня.

$$K = \frac{A_{K_1} + A_{O_1}}{A_{M_2} + A_{S_2}}; [97] \quad (8)$$

Где A_{K_1} , A_{O_1} , A_{M_2} - амплитуды соответствующих приливных гармоник K1, O1, M2 и S2.

Ежечасные колебания уровня моря в Невской губе изучались по диаграммам распределений их значений за период 1971-2022 гг. Рассчитывались статистические параметры (минимум, среднее, максимум, СКО, дисперсия, асимметрия) вариаций уровня за различные десятилетия. Оценивались значения уровня с характерной обеспеченностью: 0, 0.3, 1, 5, 20, 35, 40, 50, 60, 65, 80, 95, 99, 99.7 и 100%. С помощью Фурье и вейвлет анализа исследовалась спектральная структура уровня моря.

Анализировалось распределение суточного размаха колебаний уровня. Для этого размаха строился амплитудный спектр Фурье, выделялись периоды первых 5-ти гармоник с наибольшей амплитудой. Также описывалось внутригодовое распределение минимальной и максимальной величины суточного размаха колебаний уровня моря.

Межгодовая изменчивость уровня моря

Рисунок 55 показывает межгодовую изменчивость среднего уровня воды в Невской губе в пунктах Кронштадт и Горный Институт за период 1971-2022 гг. Средний многолетний уровень на станциях составляет 11,7 и 25,9 см, соответственно, что определяет постоянный уклон воды в сторону вершины залива. В силу незначительной протяжённости Невской губы оба ряда колебания уровня в обоих пунктах происходят приблизительно одинаково: за время наблюдений отмечается четыре крупных максимума в 1983, 1989, 2007 и 2020 гг., а также один выраженный минимум в 1996 г. Регистрируется статистически значимая тенденция к росту среднего уровня воды в Невской губе, увеличивающаяся от 3,50 мм/год у выхода из залива до +3,83 мм/год в сторону его вершины.

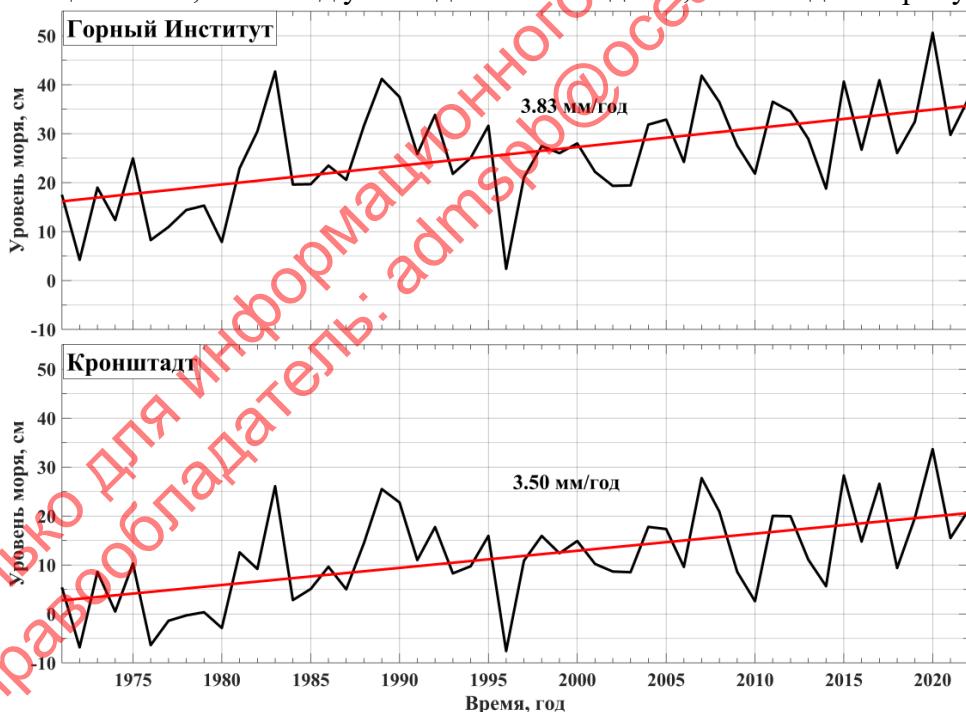


Рисунок 55. Временной ход среднегодовых значений уровня моря Невской губы за 1971-2022 гг.

В изменении среднегодовых значений уровня воды в Невской губе выделяется несколько переходных моментов: в 1980, 1995 гг., когда накопление аномалий уровня (отклонений от среднего) одного и того же знака прерывается на противоположную тенденцию (Рисунок 56).

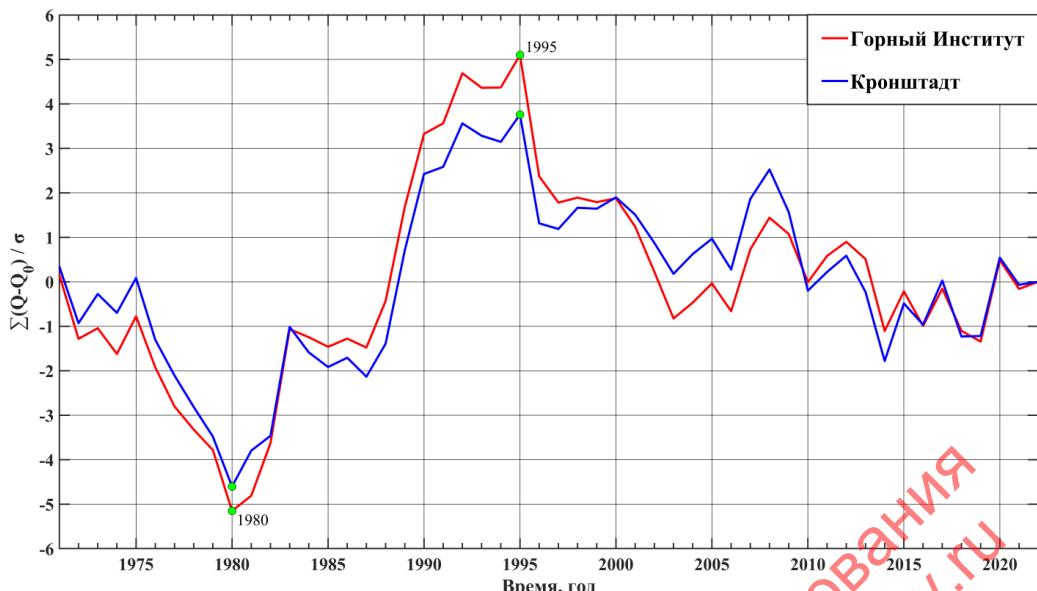


Рисунок 56. Конечно-интегральная кривая изменчивости среднего уровня воды в Невской губе по рядам с исключённым линейным трендом за 1971-2022 гг.

Размах межгодовых колебаний среднего уровня воды в Невской губе за период 1971-2022 гг. составляет 41,3 см (от -7,6 до 33,7 см) для станции Кронштадт и 48,2 см (от 2,4 до 50,6 см) для станции Горный Институт (Таблица 11). Среднеквадратическое отклонение уровня в течение всего периода наблюдений, в зависимости от пункта наблюдения, варьируется от 9,4 до 10,3 см, что составляет 40-80% от локальной климатической нормы ($Cv=0,40-0,81$). При этом выделяется два десятилетия - 1980-е и 2010-е гг., в пределах которых наблюдается локальное усиление колебаний среднего уровня (СКО около 9 см).

Таблица 11. Статистические характеристики распределения среднегодовых значений уровня воды в различных точках Невской губы за различные периоды времени.

Период времени	Минимум, см	Максимум, см	Размах, см	Среднее, см	СКО, см	Дисперсия, см^2
пункт: Горный Институт (вершина залива)						
1971-1980 гг.	4,2	24,9	20,7	13,5	6,1	37,2
1981-1990 гг.	19,6	42,7	23,1	29,0	9,0	81,0
1991-2000 гг.	2,4	33,8	31,4	24,3	8,6	74,0
2001-2010 гг.	19,3	41,8	22,5	27,8	7,7	59,3
2011-2022 гг.	18,8	50,6	31,8	33,6	8,4	70,6
1971-2022 гг.	2,4	50,6	48,2	25,9	10,3	106,1
пункт: Кронштадт (выход из залива)						
1971-1980 гг.	-6,8	10,3	17,1	0,7	5,8	33,6
1981-1990 гг.	2,8	26,1	23,3	13,3	8,7	75,7
1991-2000 гг.	-7,6	17,7	25,3	10,9	7,2	51,8
2001-2010 гг.	2,6	27,7	25,1	13,2	7,5	56,3
2011-2022 гг.	5,7	33,7	28,0	18,8	8,1	65,6
1971-2022 гг.	-7,6	33,7	41,3	11,7	9,4	88,4

Распределение среднегодовых отметок уровня на метеографах в Невской губе довольно хорошо аппроксимируется теоретической кривой Пирсона III типа (Рисунок 57). По данной кривой были рассчитаны характеристики уровня различной обеспеченности (Таблица 12). Коэффициент асимметрии на пункте Кронштадт составляет +0,05, а в Горном Институте равен -0,08, что определяет слабое отклонение выборок от нормального распределения.

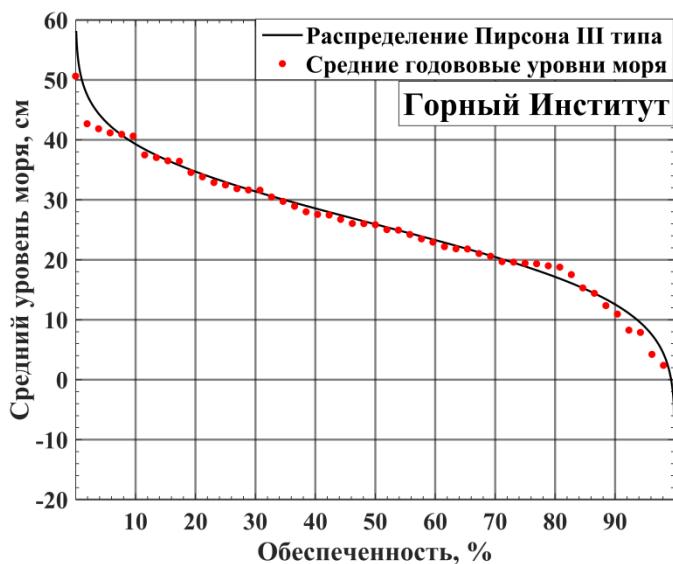


Рисунок 57. Сравнение теоретического распределения среднегодового уровня воды в Невской губе с эмпирическими данными, полученными за период 1971-2022 гг.

Таблица 12. Статистические характеристики распределения среднегодовых значений уровня воды в Невской губе за период 1971-2022 гг.

Станция	C_s	C_v	1%	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%	97%	99%
Горный Институт	-0,08	0,40	50,0	43,0	39,3	33,0	25,9	18,9	12,6	8,8	6,3	1,7
Кронштадт	0,05	0,81	33,8	27,4	23,9	18,1	11,7	5,3	-0,5	-4,0	-6,2	-10,5

Стационарный Фурье-анализ колебаний среднего уровня моря Невской губы установил наличие значительных циклических колебаний на периодах 1,6-1,7, 2,5, 7,4 и 26 лет с амплитудами от 3,5 до 7 см (Рисунок 58 а, в). При этом на станции Горный Институт амплитуды долгопериодных колебаний оказываются выше, чем в пункте Кронштадт.

Результаты вейвлет-диаграмм на обеих станциях показывают, что короткопериодные максимумы спектральной плотности отмечаются в 1990-1998, 2000-2005 и 2018-2022 гг. Менее интенсивные низкочастотные пики с периодами 7,4 года прослеживаются в 1980-1990 гг. (Рисунок 58 б, г).

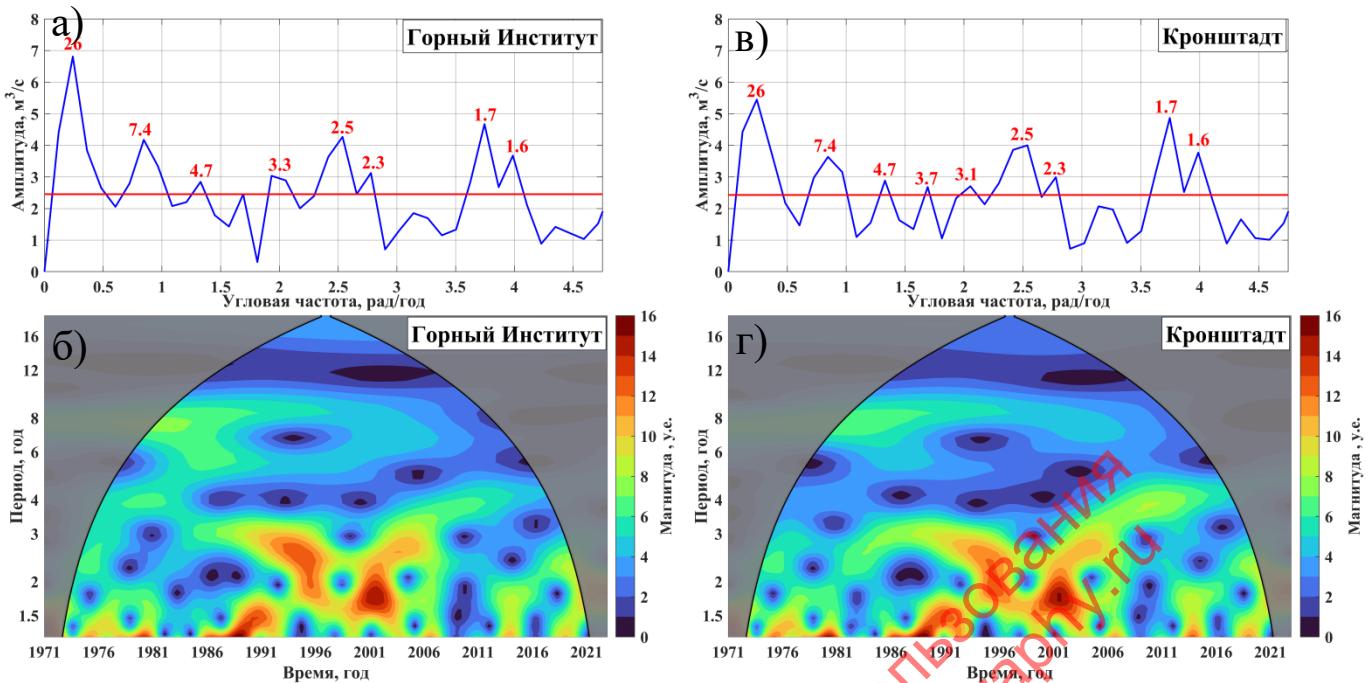


Рисунок 58. Амплитудные спектры Фурье (а, в) и вейвлет-диаграммы (б, г) изменчивости среднегодовых значений уровня воды в Невской губе за период 1971-2022 гг. Красными цифрами в амплитудном спектре обозначены периоды (в годах) статистически значимых гармоник, амплитуды которых превышают нижний доверительный 95% порог (красная линия).

Сезонная изменчивость уровня моря

На Рисунок 59 представлен многолетний сезонный ход среднемесячных оценок уровня моря в Невской губе за 1971-2022 гг. Согласно данным диаграммы наименьшее отрицательное отклонение уровня от среднего приходится на июнь, наибольшее – на октябрь месяц. Наименьшее положительное отклонение уровня от среднего приходится на июнь, наибольшее – на март месяц.

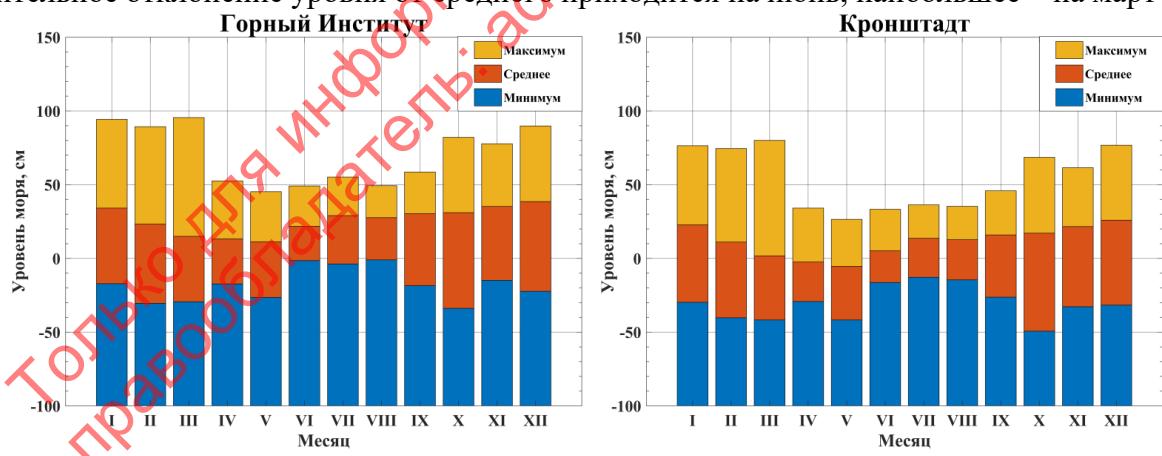


Рисунок 59. Среднемесячные уровни воды в Невской губе за период 1971-2022 гг.

Средние отметки уровня воды в течение года составляют от -5,4 до 26,0 см для Кронштадта и от 11,3 до 38,5 см для Горного Института. Минимальные значения среднего уровня воды в Кронштадте изменяются в диапазоне от -40,2 до -12,8 см, а в Горном Институте – в диапазоне от -30,5 до -1,0 см. Максимальные значения среднего уровня в Кронштадте колеблются в пределах 26,5-80,0 см, а в Горном Институте – в пределах 45,3-95,5 см. Стандартное отклонение внутри года для Кронштадта меняется с 11,2 см в июне до 28,9 см в январе, а для Горного Института – с 11,7 по 28,6 см в аналогичные месяцы. В последние десятилетия отмечается увеличение среднего уровня моря в Невском заливе на величину от нескольких миллиметров до 10-12 см.

Таблица 13. Среднемесячные значения уровня воды на станциях

Месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
пункт: Горный Институт												
Среднее	34,1	23,3	15,0	13,3	11,3	21,8	29,0	27,6	30,4	31,1	35,2	38,5
Минимальное	-17,3	-30,5	-29,4	-17,3	-26,4	-1,5	-3,7	-1,0	-18,5	-33,8	-14,9	-22,3
Максимальное	94,3	89,3	95,5	52,5	45,3	49,2	55,2	49,3	58,6	82,1	77,7	89,8
Размах	111,6	119,8	124,9	69,8	71,7	50,7	58,9	50,3	77,1	115,9	92,6	112,1
СКО	28,6	27,9	26,5	16,6	14,5	11,8	12,6	13,3	18,6	20,6	21,4	24,2
Среднее за 1971-1995 гг.	32,9	16,5	6,1	8,3	4,4	15,8	25,5	26,1	29,4	30,7	35,5	38,3
Среднее за 1996-2022 гг.	35,3	29,6	23,3	18,0	17,6	27,3	32,3	29,1	31,3	31,4	35,0	38,8
пункт: Кронштадт												
Среднее	22,8	11,0	1,7	-2,4	-5,4	5,2	13,6	12,7	16,0	17,1	21,6	26,0
Минимальное	-29,7	-40,2	-41,8	-29,2	-41,8	-16,4	-12,8	-14,6	-26,3	-49,3	-32,8	-31,7
Максимальное	76,4	74,5	80,0	34,1	26,5	33,3	36,3	35,3	45,9	68,6	61,5	76,8
Размах	106,1	114,7	121,8	63,3	68,3	49,7	49,1	49,9	72,2	117,9	94,3	108,5
СКО	28,9	28,8	26,2	16,1	13,5	11,2	12,1	12,5	17,3	20,4	21,5	24,3
Среднее за 1971-1995 гг.	22,0	4,8	-6,5	-7,8	-13,1	-1,5	9,7	10,7	15,0	16,0	21,6	26,3
Среднее за 1996-2022 гг.	23,5	16,8	9,3	2,5	1,8	11,3	17,3	14,6	16,9	18,2	21,6	25,6

На рисунке Рисунок 60 приведена квантильная диаграмма средних, минимальных и максимальных значений уровня воды в Невской губе, рассчитанная за период 1971-2022 гг. Установлено, что минимальный разброс характеристик уровня приходится на летние месяцы, а максимальный наблюдается с конца осени и продолжается весь зимний период.

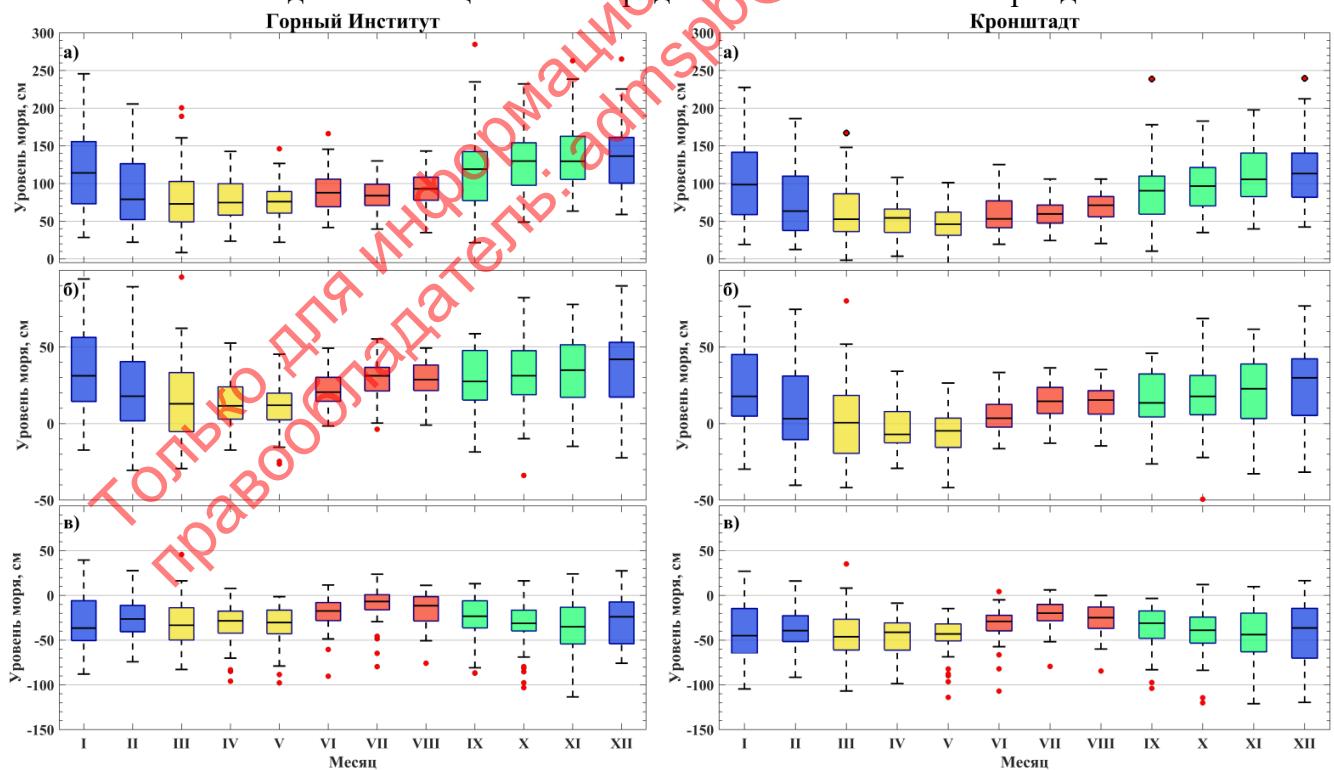


Рисунок 60. Максимальная (а), средняя (б) и минимальная (в) сезонная изменчивость уровня воды в Невской губе.

Минимальные колебания уровня моря

Временной ход изменчивости годовых минимумов уровня воды на метеорологических постах Невской губы за 1971-2022 гг. представлен на рисунке Рисунок 61. Для пункта Горный Институт выделяются два крупных минимума уровня величиной менее -100 см, зарегистрированных в 1971, 2012 гг. В пункте Кронштадт эти и другие минимумы (2009 г.) были более выражены, находясь находились в пределах отметки -120 см. В многолетнем ходе годовых минимумов уровня регистрируется значимая положительная тенденция величиной 4,2-5,6 мм/год.

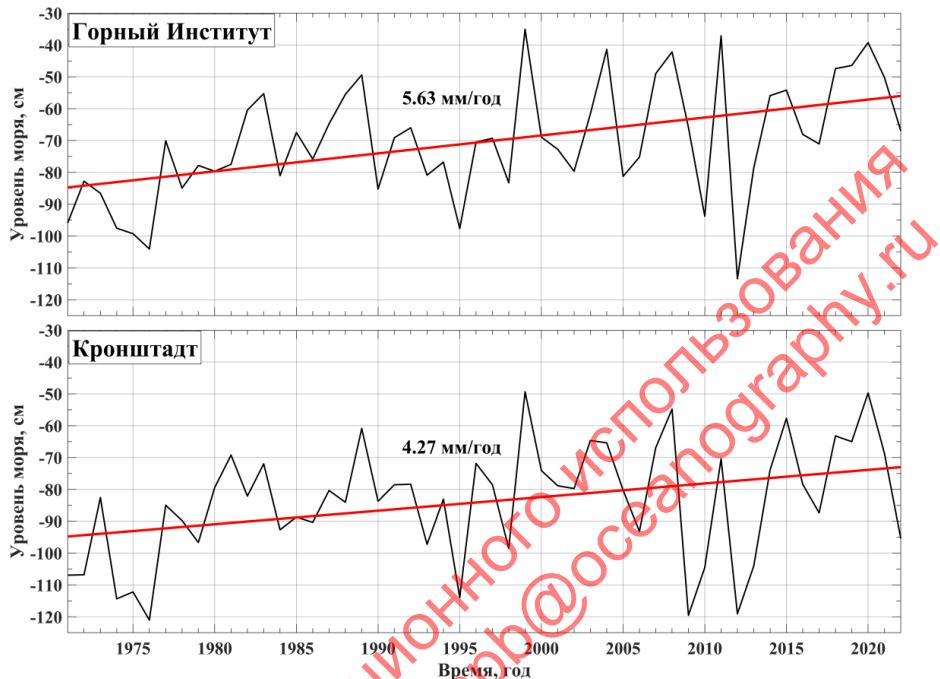


Рисунок 61. Временной ход годовых минимумов уровня моря Невской губы за 1971-2022 гг.

Согласно конечно-интегральной кривой в изменениях минимумов уровня Невской губы можно выделить несколько этапов (Рисунок 62). В первый этап, продлившийся до 1976 года, отмечалось накопление отрицательных аномалий уровня относительно нуля постов. Затем приращения аномалий уровня начали постепенно расти вплоть до 2008 года. Тогда динамика уровня кратковременно сменилась на противоположную тенденцию, завершившуюся к 2010-м гг.

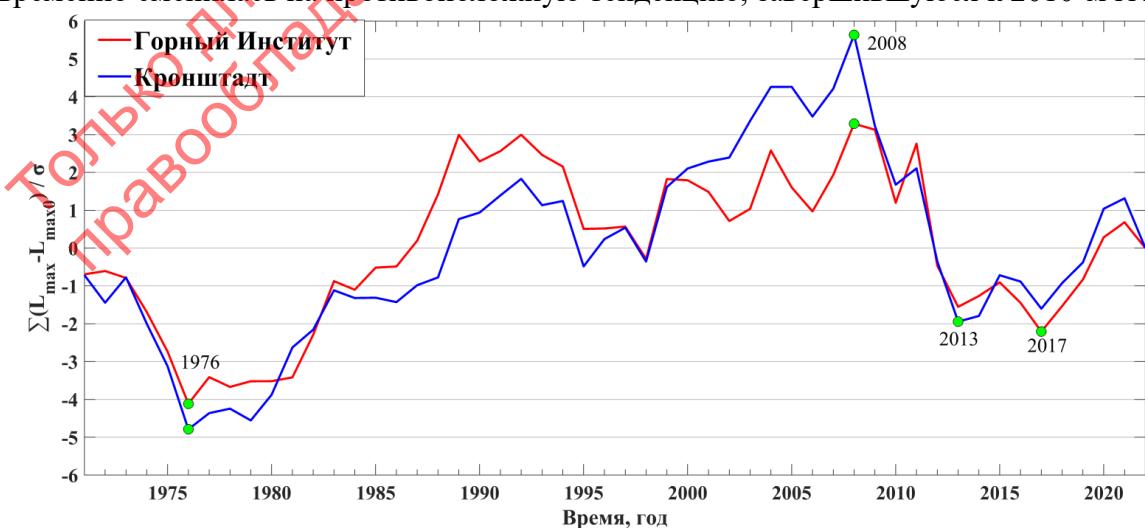


Рисунок 62. Конечно-интегральная кривая изменчивости годовых минимумов уровня воды в Невской губе по рядам с исключённым линейным трендом за 1971-2022 гг.

Результаты статистического анализа годовых минимумов уровня моря в Невской губе, приведённые в таблице Таблица 14, показывают, что размах их колебаний в пределах периода наблюдений составляет от -121,0 до -49,3 см в пункте Кронштадт и от -113,4 до -35,1 см в пункте Горный Институт. Среднее отклонение минимумов от многолетней нормы (около -84...-73 см) в Невской губе изменяется в диапазоне от 18 до 25 см. Отмечается последовательное увеличение дисперсии в колебаниях экстремума.

Таблица 14. Статистические характеристики распределения годовых минимумов уровня воды в различных точках Невской губы за различные периоды времени.

Период времени	Минимум, см	Максимум, см	Размах, см	Среднее, см	СКО, см	Дисперсия, см ²
пункт: Горный Институт (вершина залива)						
1971-1980 гг.	-104,1	-70,1	34,0	-87,9	10,9	118,8
1981-1990 гг.	-85,3	-49,4	35,9	-67,2	12,2	148,8
1991-2000 гг.	-97,7	-35,1	62,6	-71,7	16,0	256,0
2001-2010 гг.	-93,8	-41,4	52,4	-66,3	17,6	309,8
2011-2022 гг.	-113,4	-37,2	76,2	-60,7	21,0	441,0
1971-2022 гг.	-113,4	-35,1	78,3	-70,4	18,2	331,2
пункт: Кронштадт (выход из залива)						
1971-1980 гг.	-121,0	-79,4	41,6	-99,5	14,8	219,0
1981-1990 гг.	-92,7	-60,9	31,8	-80,4	10,1	102,0
1991-2000 гг.	-114,0	-49,3	64,7	-82,3	17,6	309,8
2001-2010 гг.	-119,5	-54,8	64,7	-80,8	20,0	400,0
2011-2020 гг.	-119,1	-49,7	69,4	-77,7	20,3	412,1
1971-2022 гг.	-121,0	-49,3	71,7	-83,9	18,2	331,2

Сравнение эмпирического распределения годовых минимумов уровня в Невской губе с теоретической кривой Пирсона III типа, в целом, отмечает высокое сходство величины экстремума как на станции Горный Институт, так и на пункте Кронштадт (Рисунок 63). На правой границе распределения отклонение минимума от реальных значений может достигать более 5 см (обеспеченность 98-99%). В соответствии с заданной кривой распределения были рассчитаны минимальные значения уровня различной обеспеченности (Таблица 15).

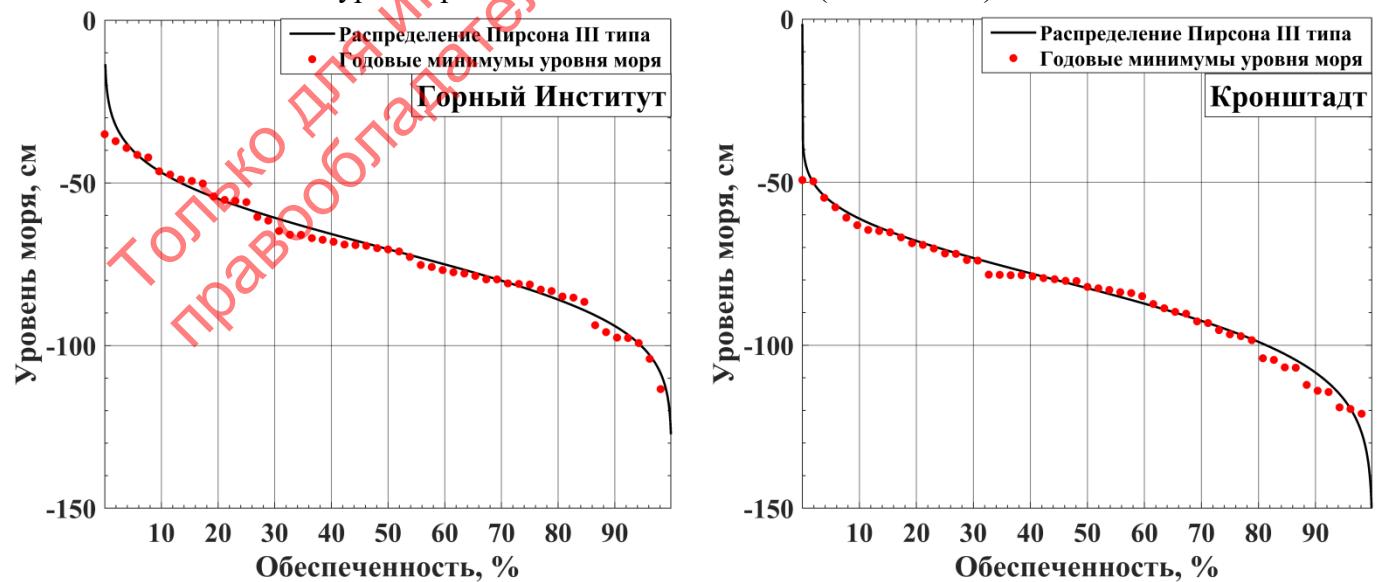


Рисунок 63. Сравнение теоретического распределения годовых минимумов уровня воды в Невской губе с эмпирическими данными, полученными за период 1971-2022 гг.

Таблица 15. Статистические характеристики распределения годовых минимумов уровня воды в Невской губе за период 1971-2022 гг.

Станция	C_s	C_v	75%	80%	85%	90%	95%	97%	99%
Горный Институт	-0,02	-0,26	-82,8	-85,9	-89,5	-94,0	-100,7	-105,0	-113,2
Кронштадт	-0,29	-0,22	-95,5	-99,0	-103,1	-108,4	-116,6	-122,2	-133,1

Максимальные колебания уровня моря

В межгодовой изменчивости годовых максимумов уровня в Невской губе обнаруживаются следующие особенности (Рисунок 64). Для станции Горный Институт отмечается 3 локальных максимума параметра в 1975, 1986 и 1999 гг. с отметкой более 250 см. Для пункта Кронштадт наибольшие показания уровня (более 225 см) регистрировались в 1975, 1986 и 2005 гг. Статистически значимых многолетних тенденций в изменениях годовых максимумов уровня не отмечается на обеих станциях.

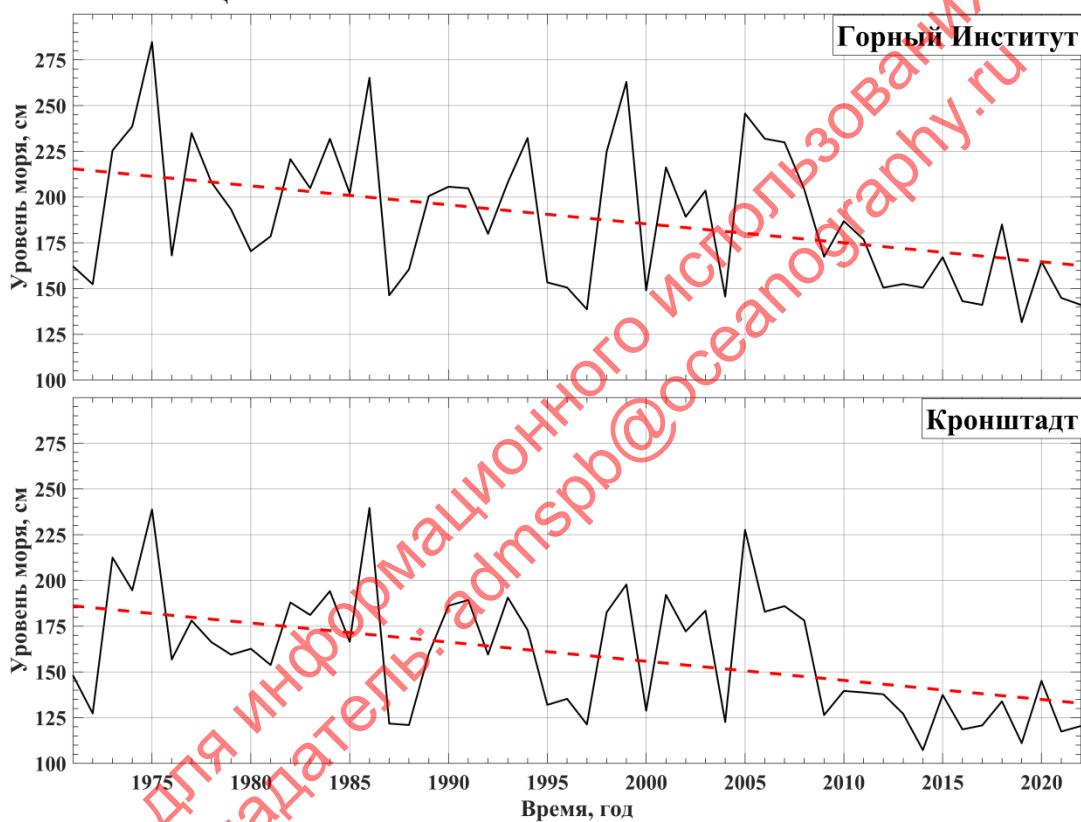


Рисунок 64. Временной ход годовых максимумов уровня моря Невской губы за 1971-2022 гг.

График конечно-интегральной кривой максимумов уровня позволяет зафиксировать три характерных этапа их изменчивости (Рисунок 65). Первый этап, приходящийся на время 1971-1997 гг., характеризуется попеременным накоплением то отрицательных, то положительных отклонений уровня от среднего многолетнего максимума. Во втором этапе (2000-е гг.) наблюдалась преимущественно положительные аномалии уровня, в то время как на третьем этапе (2010-2020-е гг.) эта тенденция сменилась на противоположную.

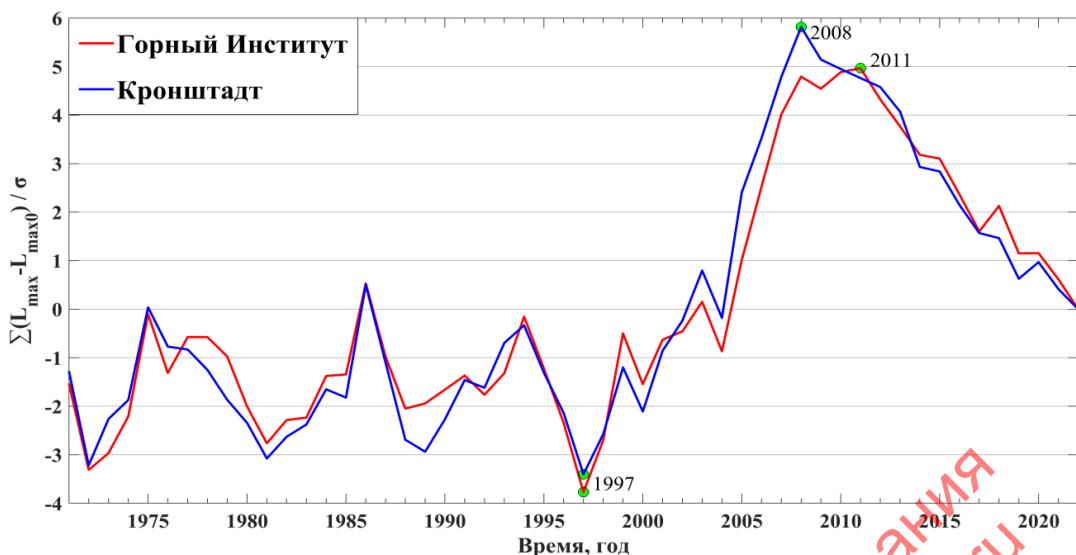


Рисунок 65. Конечно-интегральная кривая изменчивости годовых максимумов уровня воды в Невской губе по рядам с исключённым линейным трендом за 1971-2022 гг.

Статистический анализ изменчивости годовых максимумов уровня в Невской губе приведён в таблице (Таблица 16). Согласно представленным данным размах их колебаний за период 1971-2022 гг. составляет от 107,3-239,6 см на станции Кронштадт до 131,6-284,7 см в пункте Горный Институт. Средние многолетняя оценка максимумов для метеографов равна 159,5 и 189,0 см соответственно.

Стандартное отклонение экстремума составляет порядка 30-40 см. В период с 1970-х по 1990-е гг. отмечается повышенная дисперсия годовых максимумов. Значительное снижение значений максимумов уровня с 2010-х гг. объясняется введением 12 августа 2011 года в эксплуатацию комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга (КЗС), предназначенного для защиты прилежащей акватории Невской губы от наводнений, определяемых как превышение уровня моря отметки 160 см относительно нуля Кронштадтского футштока.

Таблица 16. Статистические характеристики распределения годовых максимумов уровня воды в различных точках Невской губы за различные периоды времени.

Период времени	Минимум, см	Максимум, см	Размах, см	Среднее, см	СКО, см	Дисперсия, см ²
пункт: Горный Институт (вершина залива)						
1971-1980 гг.	152,3	284,7	132,4	203,8	42,3	1789,3
1981-1990 гг.	146,3	265,2	118,9	201,6	34,4	1183,4
1991-2000 гг.	138,7	263,0	124,3	190,4	42,4	1797,8
2001-2010 гг.	145,6	245,6	100,0	202,0	30,8	948,6
2011-2022 гг.	131,6	185,0	53,4	154,1	16,1	259,2
1971-2022 гг.	131,6	284,7	153,1	189,0	38,2	1459,2
пункт: Кронштадт (выход из залива)						
1971-1980 гг.	127,3	238,8	111,5	174,5	32,8	1075,8
1981-1990 гг.	121,0	239,6	118,6	171,2	35,3	1246,1
1991-2000 гг.	121,3	197,8	76,5	161,0	29,4	864,4
2001-2010 гг.	122,6	227,6	105,0	171,1	32,6	1062,8
2011-2022 гг.	107,3	145,1	37,8	126,3	12,1	146,4
1971-2022 гг.	107,3	239,6	132,3	159,5	33,7	1135,7

В рамках анализа максимальных годовых значений уровня производилось сравнение их эмпирического распределения с теоретической кривой Пирсона III типа. Было установлено существенное завышение (до 25-50 см) величины экстремума обеспеченностью 0.1-2% на станции Горный Институт и обеспеченность 0.1% на станции Кронштадт (Рисунок 66). В соответствии с заданной кривой распределения были получены оценки максимальных значений уровня различной обеспеченности (Таблица 17).

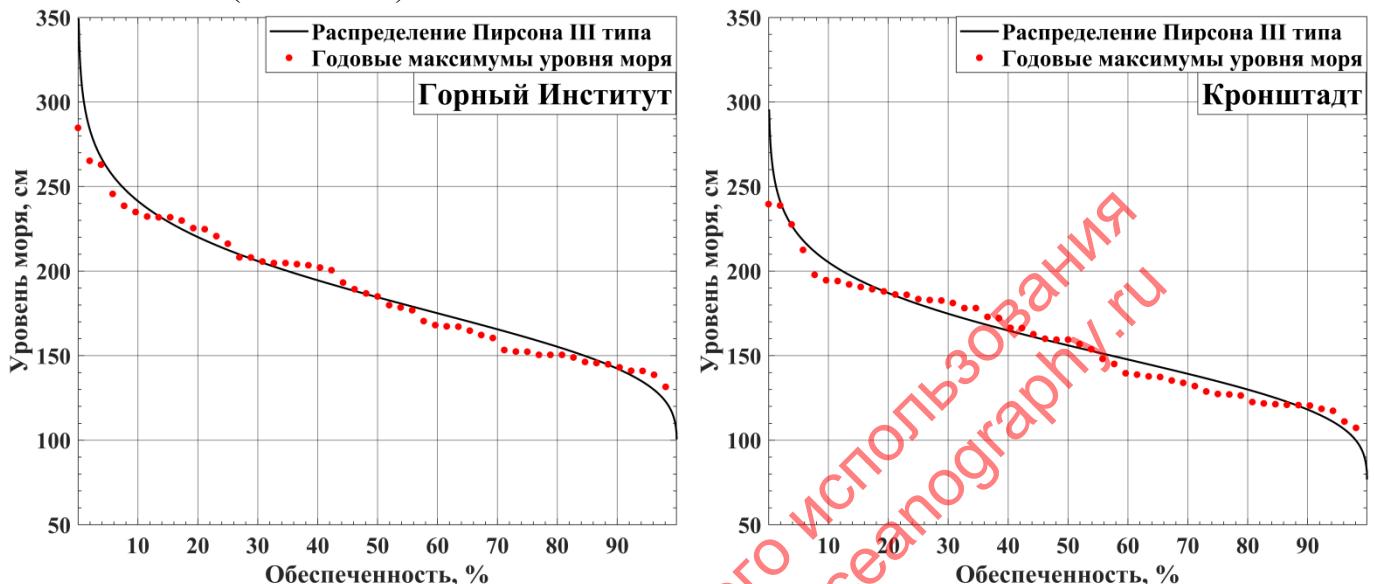


Рисунок 66. Сравнение теоретического распределения годовых максимумов уровня воды в Невской губе с эмпирическими данными, полученными за период 1971-2022 гг.

Таблица 17. Статистические характеристики распределения годовых максимумов уровня воды в Невской губе за период 1971-2022 гг. (* указывает на высокую степень недостоверности оценки)

Станция	C_s	C_v	0.1%	1%	2%	5%	10%	15%	25%
Горный Институт	0,43	0,20	343,8*	297,9*	282,7*	261,0	242,9	231,2	214,9
Кронштадт	0,47	0,21	295,6*	254,3	240,7	221,4	205,2	194,9	180,5

Штормовые нагоны уровня моря

На рисунке Рисунок 67 представлен временной ход количества штормовых нагонов, ежегодно регистрируемых в Невской губе за период 1971-2022 гг. Результаты показывают, что, в зависимости от гидрометеорологических условий, число опасных подъёмов уровня в рассматриваемой акватории может существенно меняться: от единичных случаев в отдельные годы до 36-44 событий в 1983 г. (Таблица 18). В среднем, характерная частота штормовых явлений в Невской губе составляет около 5-8 шт./год, что оказывается сопоставимым с её стандартным отклонением. Сравнение оценок на разных метеографических станциях позволило обнаружить пространственную закономерность к увеличению общего числа штормовых нагонов в направлении от западной (открытой) границы залива к её вершине. Во временном ходе повторяемости штормовых нагонов не было отмечено какой-либо значимой тенденции вплоть до 2011 года, когда в эксплуатацию была введена инфраструктура КЗС. С этого момента (2012-2022 гг.) в акватории Невской губы произошло заметное снижение числа опасных подъёмов уровня, прерываемое лишь в редкие годы (например, 2015, 2020 гг.) с высокой штормовой активностью. Основной причиной этого считается антропогенный фактор, связанный с работой дамбы. Это подтверждается тем, что уменьшение числа штормовых нагонов происходит лишь внутри Невской губы, ограждённой защитными сооружениями, но не наблюдается за её пределами (ст. Шепелево).

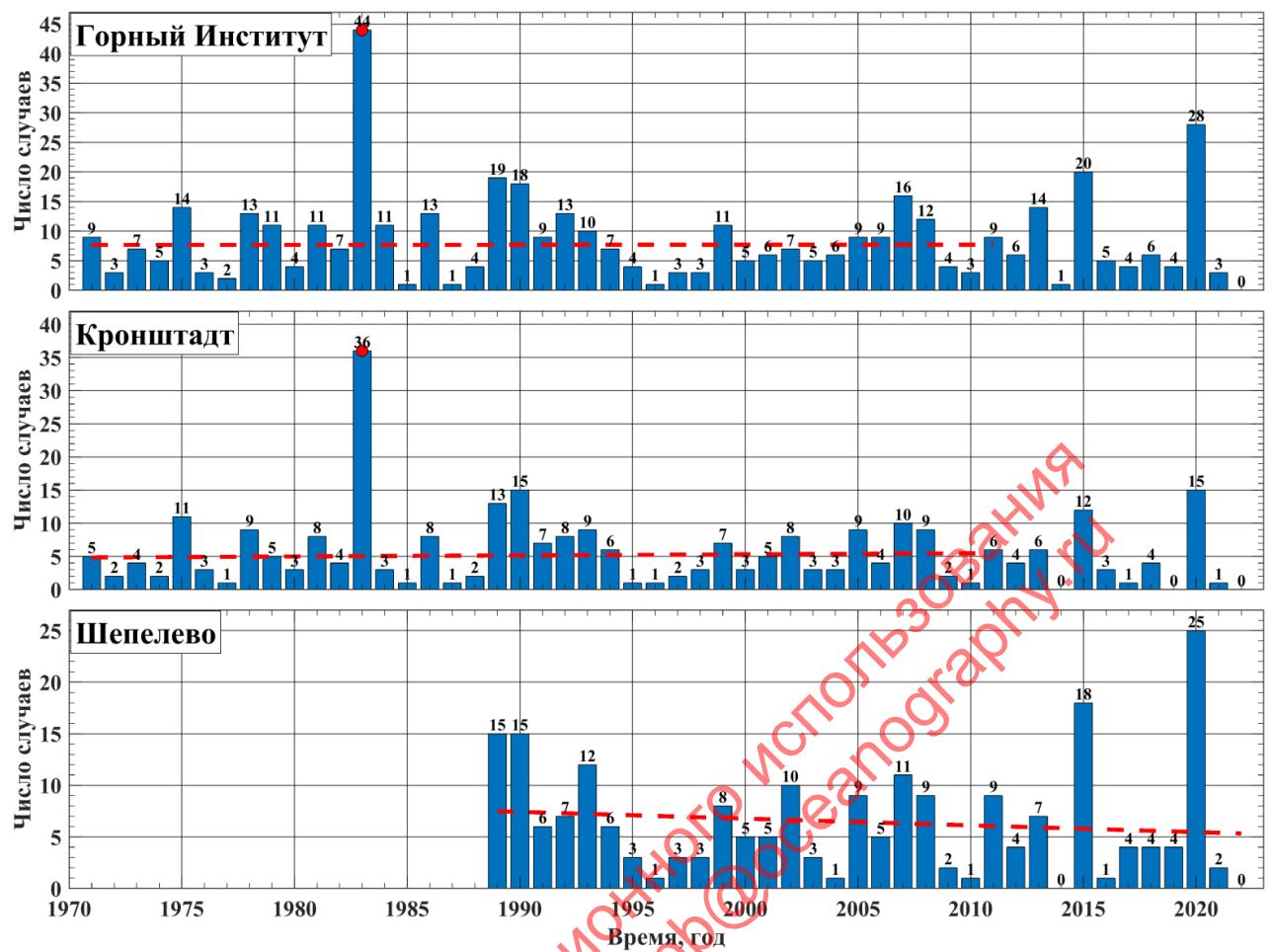


Рисунок 67. Межгодовые изменения количества штормовых нагонов на станциях в Невской губе за 1971-2022 гг. (сплошной линией показан значимый линейный тренд, пунктирной – незначимый, аномальное число штормовых нагонов в 1983 г. не учитывалось при расчёте тренда)

В рамках текущего анализа было также описано и внутригодовое распределение случаев штормовых нагонов (Рисунок 68). Было показано, что их наибольшая встречаемость приходилась на осенний (35-40% всех случаев) и зимний (50-60% всех случаев) периоды. Менее 10 % всех штормовых нагонов было зафиксировано в весенне-летний сезон.

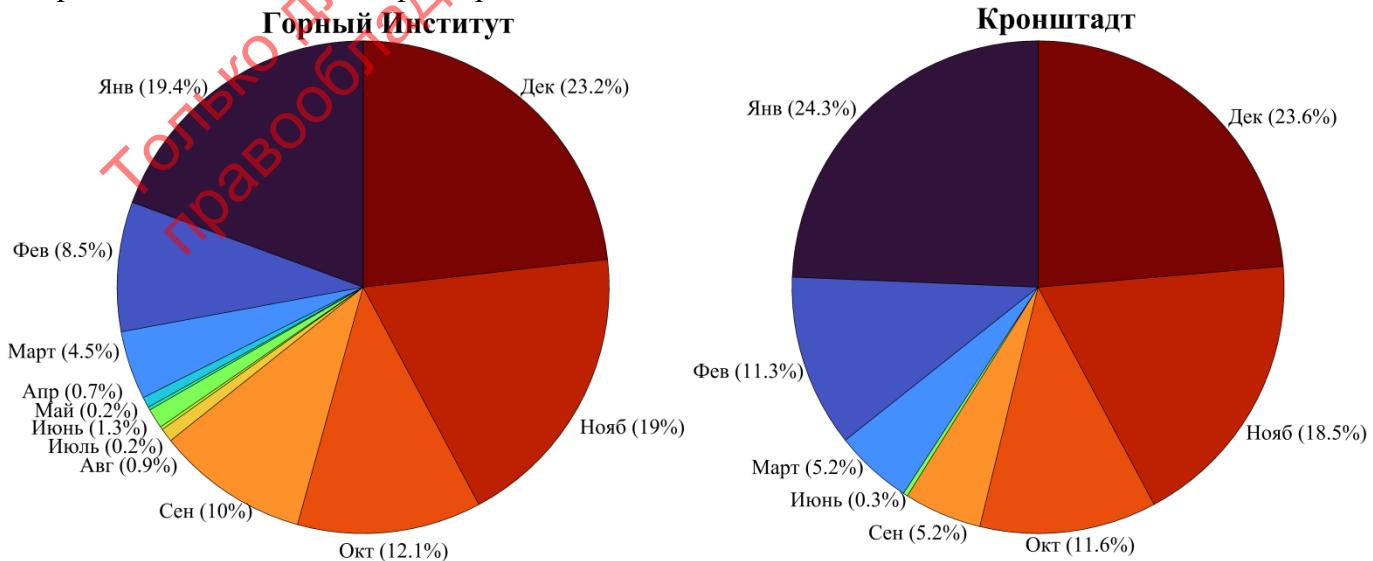


Рисунок 68. Диаграммы распределения случаев штормовых нагонов в Невской губе по месяцам года за период 1971-2022 гг.

Аналогичный статистический анализ был проведён для высот всех штормовых нагонов, выявленных в окрестностях Невской губы за 1971-2022 гг. Согласно сведениям таблицы Таблица 18, высота штормовых нагонов может находиться в диапазоне от 108-109 см* до 237-269 см, причём наиболее значительные возвышения уровня прослеживаются в вершине залива. Средняя величина опасного подъёма уровня моря составляет 135-137 см; стандартное отклонение – 24-28 см.

Таблица 18. Статистические характеристики межгодовой изменчивости параметров штормовых нагонов в Невской губе до строительства дамбы (1971-2011 гг.) и за её пределами (1989-2022 гг.)

Станция	Число случаев в год (N)				Высота, см (H)				Продолжительность, час (T)			
	N _{мин}	N _{ср}	N _{макс}	N _{ско}	H _{мин} *	H _{ср}	H _{макс}	H _{ско}	T _{мин}	T _{ср}	T _{макс}	T _{ско}
Горный Институт	1	8	44	7	109	137	269	28	1	6	42	5
Кронштадт	1	5	36	5	108	135	237	24	1	7	43	5
Шепелево	0	6	25	5	97	122	219	22	2	8	45	5

* Примечание: минимальная высота штормового нагона H_{мин} определяется пороговым значением возвышения уровня моря, предопределенным методикой данного исследования.

Межгодовые колебания высоты штормовых нагонов уровня представлены на рисунке Рисунок 69. Было показано, что, несмотря на эпизодические падения годовых экстремумов уровня (до 120-130 см) в 1990-2000-е гг., в их временном ходе за 1971-2011 гг. не обнаруживается значимых многолетних трендов. Однако с начала 2010-х гг. происходит явное уменьшение максимальной высоты штормового нагона до значений, располагающихся у нижней границы изменчивости (110-130 см). Причиной такого поведения характеристики нагонов в Невской губе является завершение строительства КЗС, препятствующего распространению длинных гравитационных волн из открытой части Балтики. Это влияние дамбы особенно хорошо видно в сравнении с ситуацией вне рассматриваемой акватории (ст. Шепелево), где отмеченной закономерности не наблюдается.

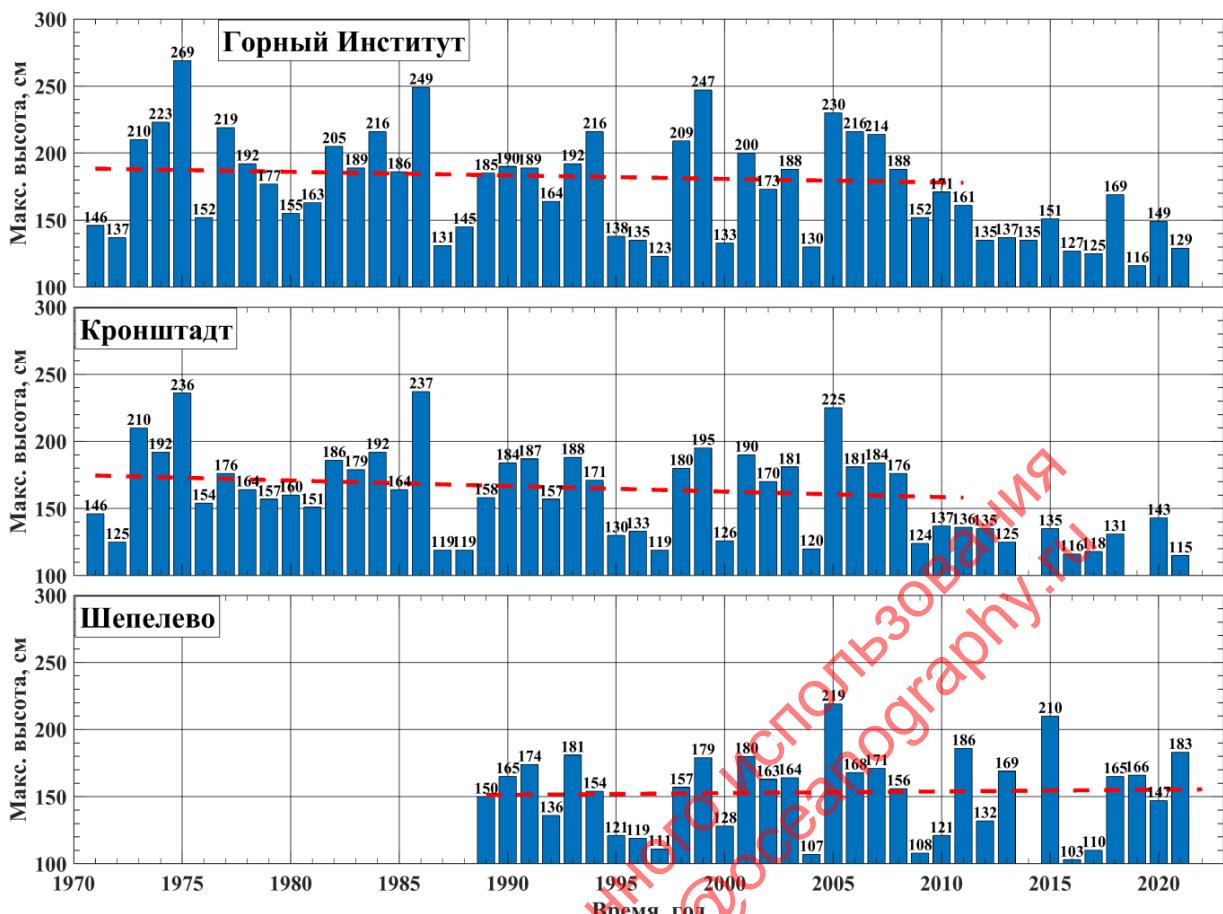


Рисунок 69. Межгодовые изменения максимальной высоты штормовых нагонов на станциях в Невской губе за 1971-2022 гг. (сплошной линией показан значимый линейный тренд, пунктирной – незначимый)

Продолжительность штормовых нагонов в Невской губе за период 1971-2022 гг. варьировалась от первых часов до почти двух суток (Таблица 18). Наибольшая продолжительность штормового нагона 43 ч зарегистрирована на станции Горный институт, расположенной в самой вершине залива. Средняя длительность нагона составляет около 6-7 ч, что примерно соответствует стандартному отклонению (5 ч).

Также в процессе анализа был построен временной ход максимальной за год продолжительности штормового нагона, охватывающий период наблюдений 1971-2022 гг. (Рисунок 70). Было показано, что до 2010-х гг. в акватории Невской губы не было выявлено статистически значимой тенденции к изменению продолжительности опасных отметок уровня. Лишь в последующие годы, благодаря завершению строительства объектов дамбы, внутри акватории губы сформировались условия (во многом, за счёт сокращения разгона ветра), ограничивающие время существования местных нагонов.

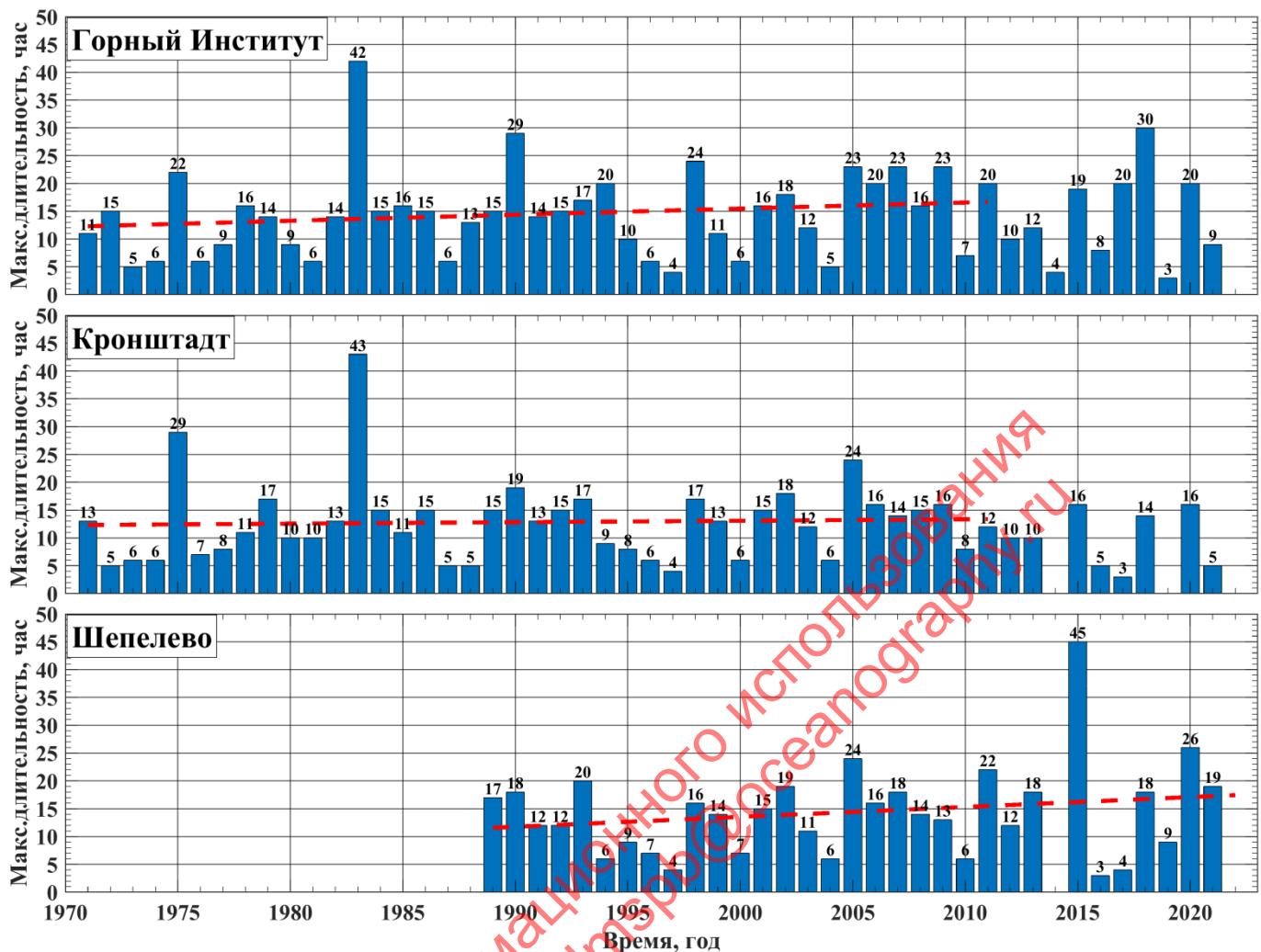


Рисунок 70. Межгодовые изменения максимальной продолжительности штормовых нагонов на станциях в Невской губе за 1971-2022 гг. (сплошной линией показан значимый линейный тренд, пунктирной – незначимый)

Приливные колебания уровня моря

Одной из важных особенностей Балтийского моря является специфический характер приливных колебаний уровня моря. В его бассейне преобладают довольно редкие типы прилива: суточный или неправильный суточный, на долю которых приходится всего 10-15 % водоёмов в Мировом океане [98]. При таком характере прилива амплитуды его суточных волн оказываются либо сравнимы, либо значительно больше (в 1,5-3,0 и более раза) полусуточных колебаний (Рисунок 71в). Согласно мнению учёных [93], основной причиной этого служит то, что Балтийское море имеет сильно ограниченный водообмен с Северным морем посредством мелководных (7-18 м) Датских проливов, выполняющих роль естественного фильтра низких частот [99]. При таких морфометрических условиях бассейна полусуточная приливная волна, распространяющаяся из открытой части Атлантического океана, настолько ослабляется (Рисунок 71а), что даже незначительные амплитуды собственных суточных колебаний величиной около 2-5 см становятся для региона доминирующими (Рисунок 71б). Локальные максимумы прилива отмечаются в районе Датских проливов, вершинах Финского, Ботнического и Рижского заливов (Рисунок 71г). Также пренебрежимо малым для Балтийского моря считается влияние нелинейных приливных процессов, благодаря чему амплитуды их мелководных составляющих обычно не превышают первых долей сантиметра [94].

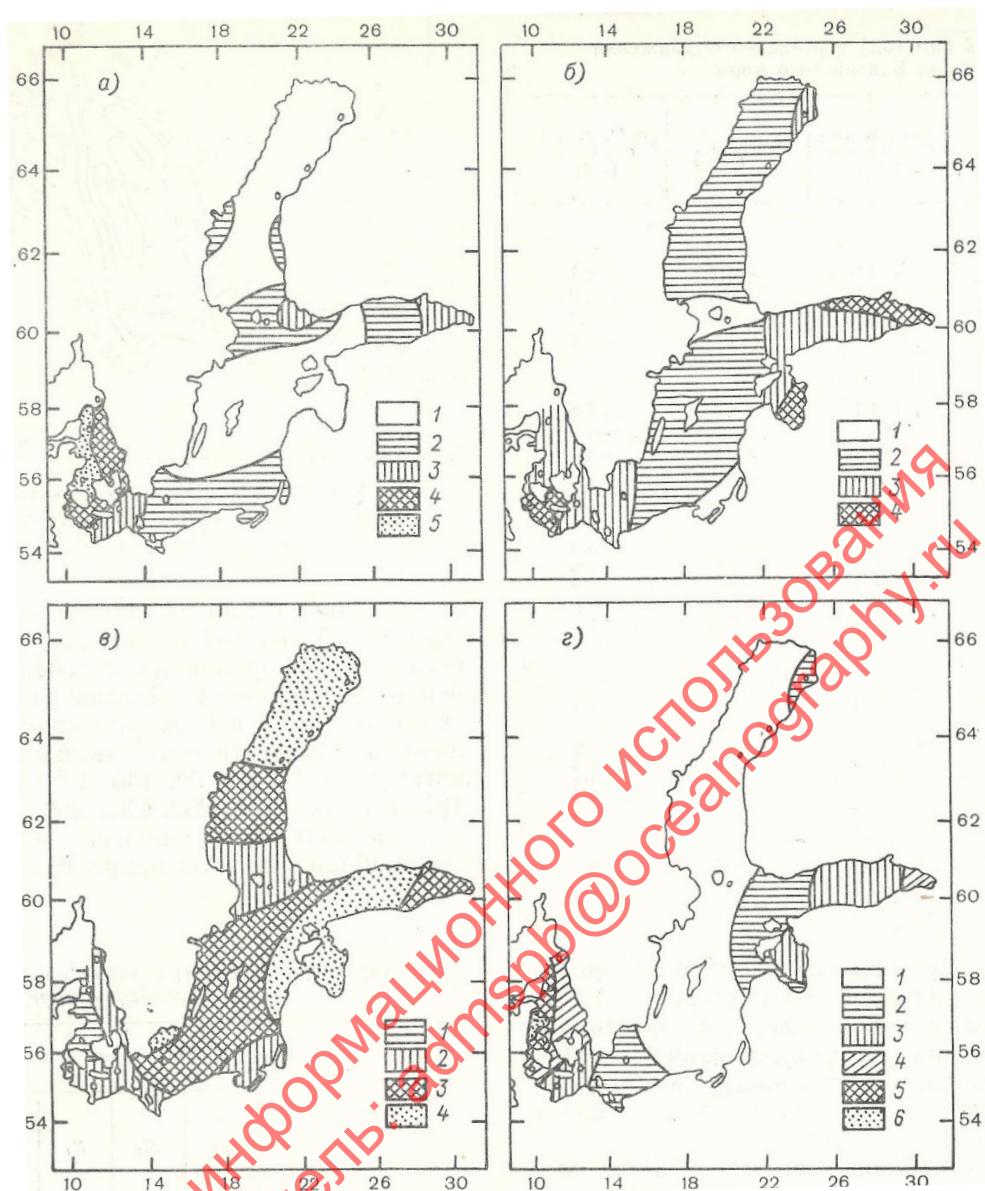


Рисунок 71. Географическое распределение приливных колебаний в Балтийском море, а — суммарные полусуточные колебания $2(M_2+S_2)$; б — суммарные суточные колебания $2(K_1+O_1)$; в — характер приливов (критерий Куртье); г — максимальные приливные колебания: 1) < 2 см, 2) 2-5 см, 3) 5-10 см, 4) 10-20 см, 5) > 20 см; в — характер приливов (критерий Куртье): 1) $< 0,5$, 2) 0,5-2,0, 3) 2-4, 4) > 4 ; г — максимальные приливные колебания: 1) < 3 см, 2) 3-5 см, 3) 5-10 см, 4) 10-15 см, 5) 15-20 см, 6) > 20 см [93].

В акватории Финского залива и примыкающей к нему Невской губе приливные колебания уровня моря имеют явно выраженный неправильный полусуточный характер ($K > 3,0$). Котидальные карты гармоник M_2 и S_2 показывают (Рисунок 72), что в Финском заливе располагается локальная амфидромическая система, при которой распространение полусуточной волны происходит против часовой стрелки [96]. Амфидромическая точка локализуется в середине залива, отчего увеличение амплитуды одновременно происходит на запад и восток. Наибольшая величина полусуточного прилива наблюдается в окрестностях Невской губы: около 2,0 см для волны M_2 и примерно 0,7-0,9 см для волны S_2 [95].

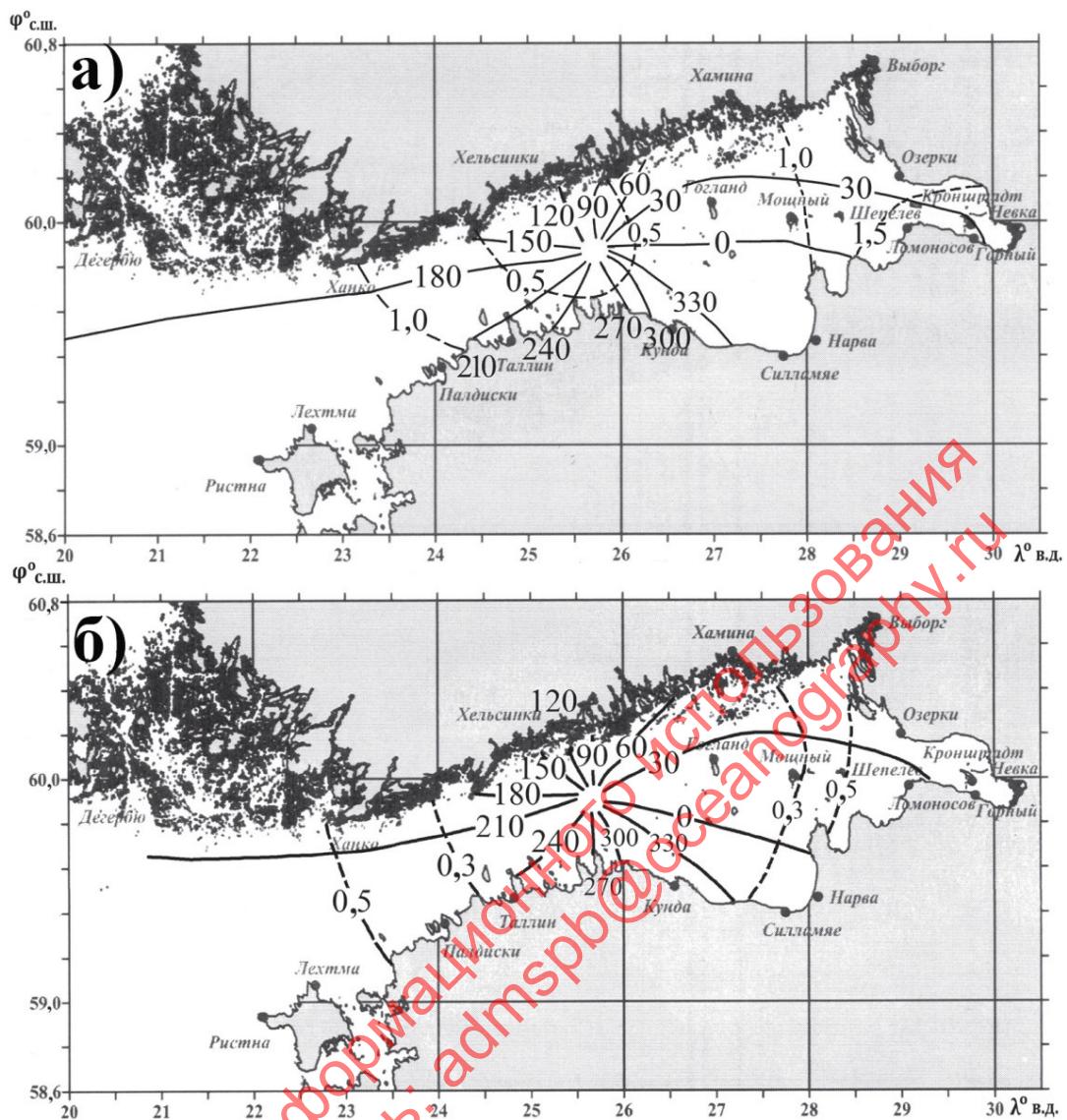


Рисунок 72. Котидальные карты волны M_2 (а) и волны S_2 (б). Сплошные кривые — изофазы (град.) по нулевому поясу, штриховые кривые — изоамплитуды (см) [96].

Пространственная картина суточных волн прилива в Финском заливе несколько отличается. Распределение изофаз волн K_1 и O_1 , представленное на рисунке Рисунок 73, демонстрирует, что динамика суточной волны прилива в значительной степени может быть описана как распространение классической стоячей волны, движущейся с юго-востока на северо-запад. Практически через весь Финский залив проходит единственная изофаза — 0° для гармоники K_1 и 330° для гармоники O_1 [96]. Амплитуда отмеченных волн закономерно увеличивается в сторону вершины залива, достигая около 2,8-3,0 см в области Невской губы [95].

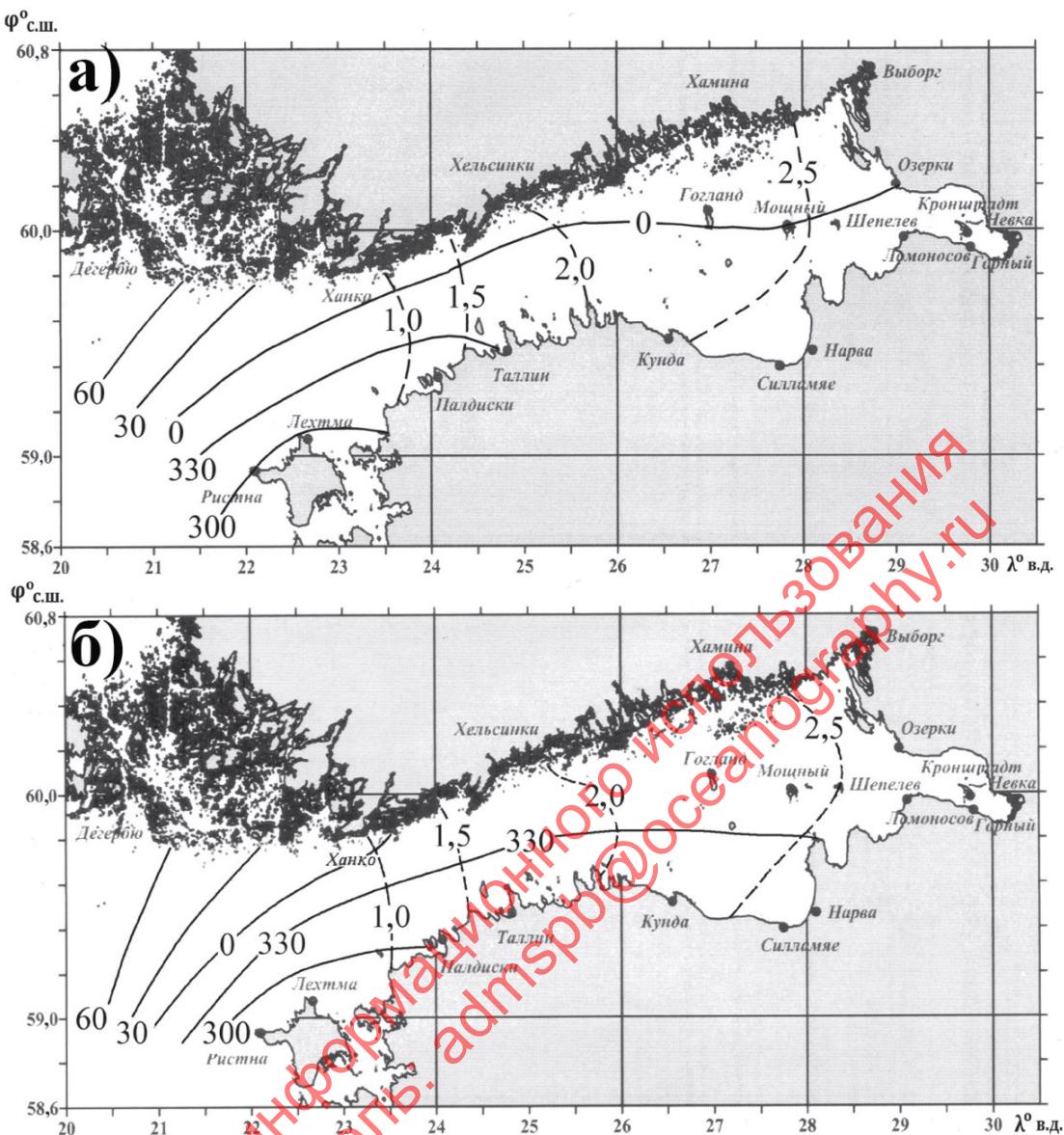


Рисунок 73. Котидальные карты волны K₁ (а) и волны O₁ (б). Сплошные кривые — изофазы (град.) по нулевому поясу, штриховые кривые — изоамплитуды (см) [96].

В одном из подробных исследований прилива в Финском заливе также был проведён анализ некоторых негармонических постоянных [96]. Согласно полученным результатам, средний возраст полусуточного прилива в заливе составил 11 часов, суточного — 16 часов, а параллактического прилива — порядка 2 суток 3 часа. В акватории же Невской губы эти характеристики имели значения 10 часов, 14,5 часов и 2 суток 8 часов, соответственно. В зависимости от влияния различных приливных неравенств (тропических, фазовых, параллактических), определяемых движением астрономических светил, величина прилива в Финском заливе может существенно меняться, значительно превышая среднюю многолетнюю отметку в отдельные моменты времени. Наибольшие амплитуды приливных колебаний в заливе варьировали от 10-22 см без учёта долгопериодных гармоник до 30-60 см с учётом этих волн (Рисунок 74). При этом самые экстремальные отметки были зафиксированы непосредственно в вершине Финского залива, у северного побережья Невской губы.

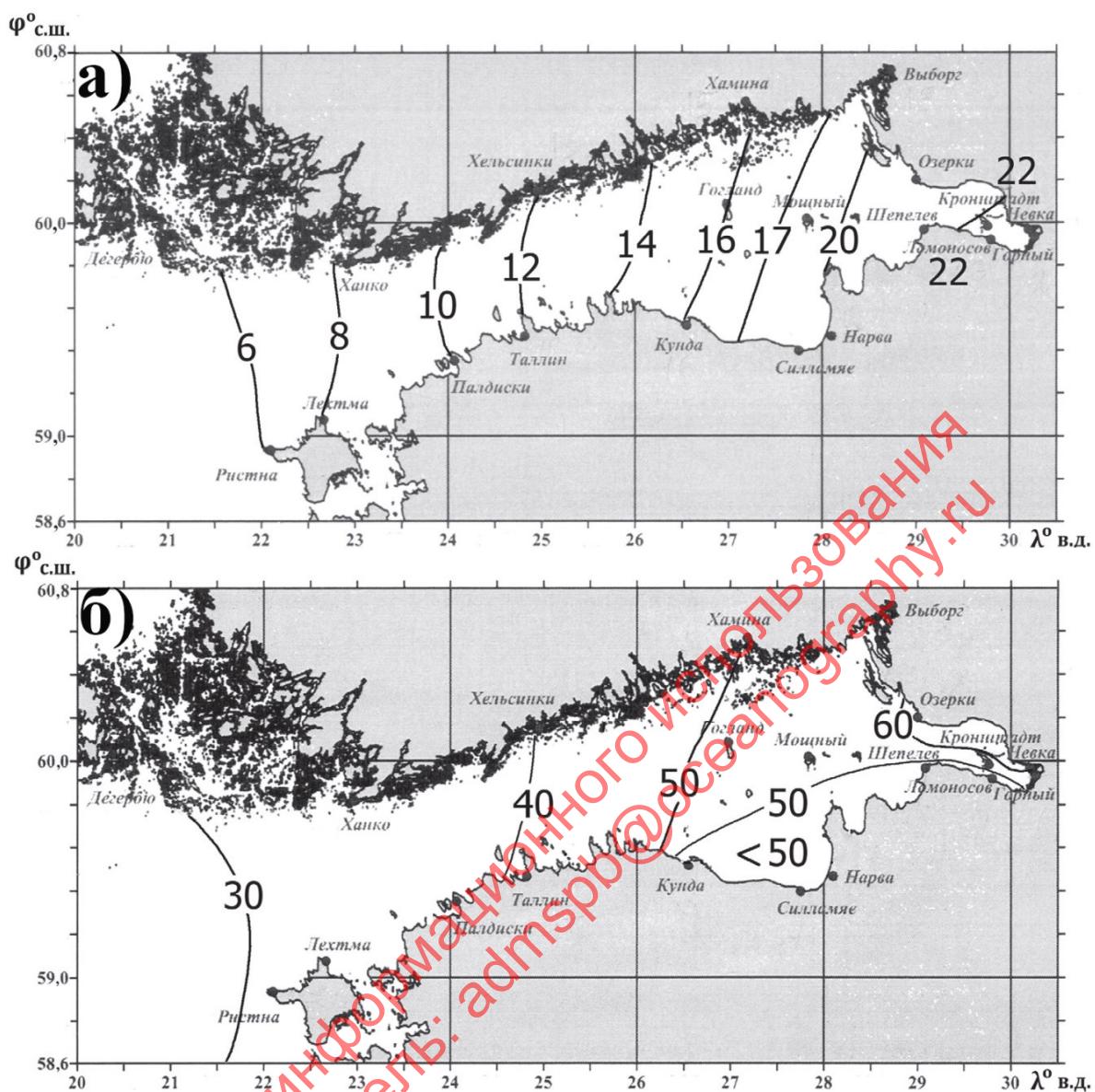


Рисунок 74. Максимальные приливные колебания уровня моря (см) без учёта (а) и с учётом (б) долгопериодных гармоник приливов [96].

На рисунке Рисунок 75 представлен сезонный ход амплитуды и фазы приливной гармоники M2 на различных станциях в акватории Невской губы и за её пределами. Было отмечено, что наибольшая амплитуда волны (+10% от средней величины) отмечается в июле-августе, в то время как увеличение фазы происходит в мае-июне. Минимальное же значение амплитуды устанавливается к февралю месяцу, а фазы – с октября по ноябрь. Описываемая картина сезонных колебаний амплитуды волны M2 довольно сильно отличается от кривой классического типа, характерной для арктических морей [100], что может быть вызвано комплексным влиянием не только гидрологических, но и атмосферных процессов.

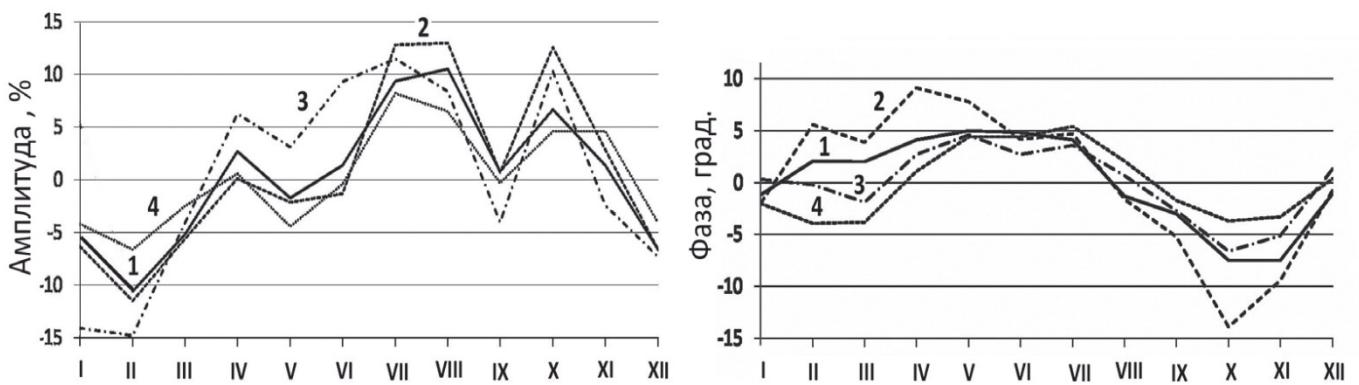


Рисунок 75. Сезонный ход амплитуды (а) и фазы (б) волны M_2 в Финском заливе: 1 — Кронштадт (34 года), 2 — Горный институт (34 года), 3 — Выборг (31 года), 4 — Шепелево (19 лет) [96].

Интересные закономерности были выявлены для межгодовой изменчивости амплитуды M_2 , проанализированных для вершины Финского залива (Рисунок 37а). Внутри акватории Невской губы было обнаружено слабое понижение амплитуды волны M_2 (особенно в 1984-1993 гг.). В это же время за её пределами регистрировалось её лёгкое повышение (+0,37 см в Выборге за 19 лет). Однако статистическая значимость описанных тенденций была подтверждена лишь для станции Выборг, расположенной вне бассейна Невской губы [96].

Анализ многолетних колебаний фазы прилива M_2 в вершине Финского залива имел более наглядные результаты (Рисунок 37б). В пунктах Кронштадт, Горный институт и Шепелево, локализованных на южном берегу, наблюдается тренд на увеличение среднегодовой фазы прилива примерно на $0,23\text{--}0,37^\circ$ в год. В районе северного берега (ст. Выборг) можно заметить довольно устойчивую тенденцию к понижению фазы на $-0,955^\circ$ в год. Считается, что при сохранении этой тенденции в течение последующих 19 лет фаза волны M_2 может измениться на 18° (около 35 минут), что потребует пересчёта гармонических постоянных за более современный 20-летний период наблюдений.

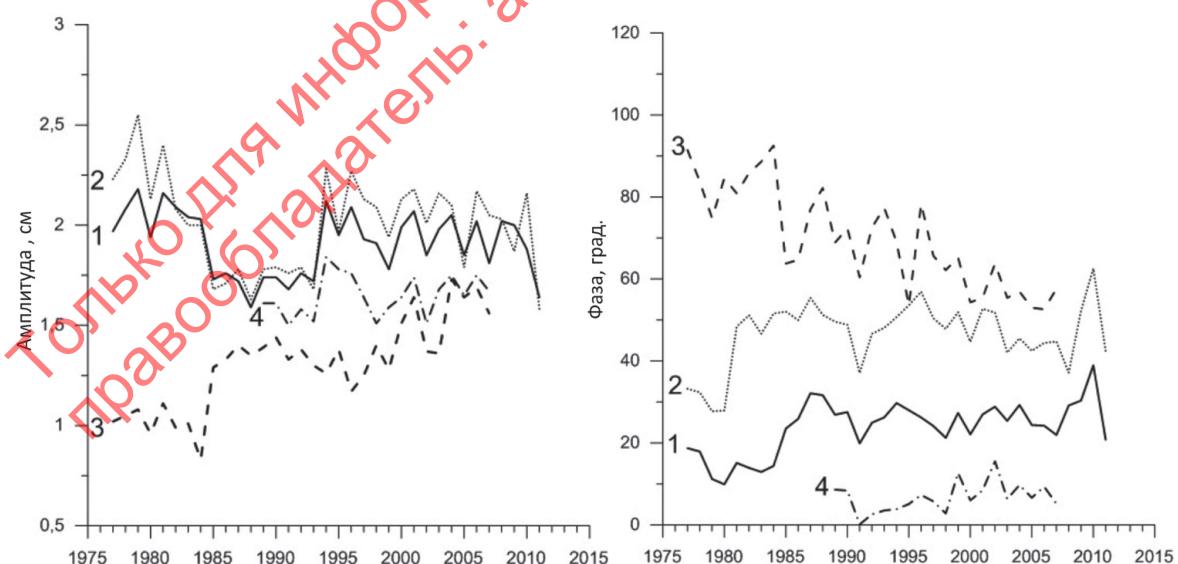


Рисунок 76. Многолетний временной ход годовых оценок амплитуды (а) и фазы (б) волны M_2 : — Кронштадт, 2 — Горный институт, 3 — Выборг, 4 — Шепелево [96].

Анализ ежечасных колебаний уровня моря

Для анализа поведения ежечасных колебаний уровня моря в Невской губе были построены статистические распределения, рассчитанные для двух гидрологических режимов акватории (Рисунок 77): естественного, предшествующего завершению строительства КЗС (1971-2011 гг.), и

режима, частично зарегулированного работой гидротехнических сооружений (2012-2022 гг.). Согласно полученным результатам, средний уровень моря в Невской губе имеет постоянный уклон уровня в 10 см, направленный с запада на восток, о чём свидетельствует смещение формы распределения между пунктами Горный институт и Кронштадт, сохраняемое в обоих рассматриваемых сценариях. Было установлено, что отметки уровня в Невской губе отклоняются от среднего значения на 20 см и менее примерно в 50-60 % случаев, а на 20-40 см ещё в 20-25 % случаев. Положительный коэффициент асимметрии показывает, что высота нагонов уровня в акватории несколько превышает высоту сгонов, в особенности у самой вершины Невской губы.

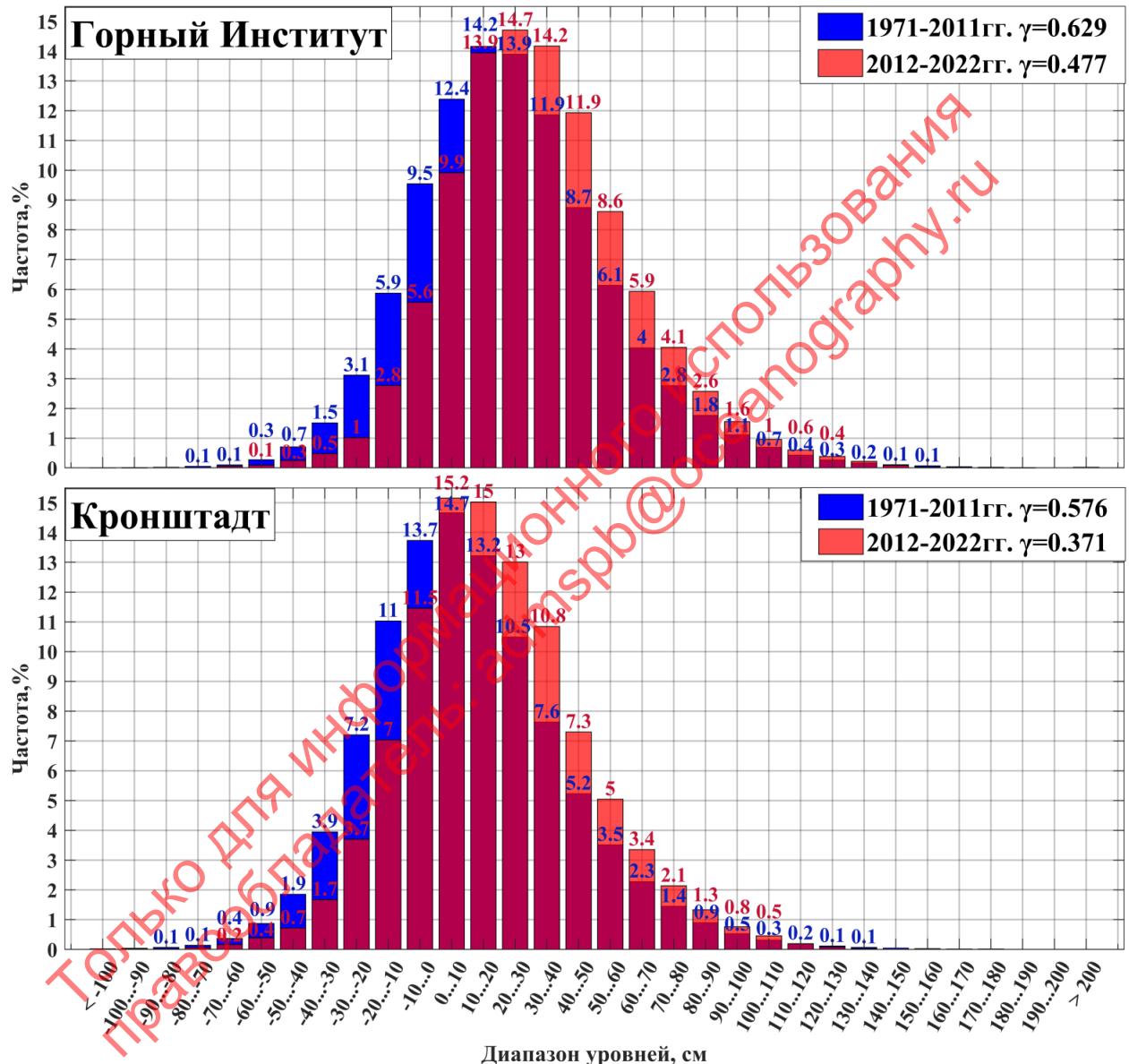


Рисунок 77. Распределение по диапазонам ежечасных значений уровня моря в Невской губе за периоды 1971-2011 и 2012-2022 гг. Показатель γ соответствует коэффициенту асимметрии.

В последнее десятилетие в Невской губе произошли значительные изменения в колебаниях уровня моря (Рисунок 77). В целом, было зафиксировано общее увеличение повторяемости положительных аномалий уровня, происходящее на фоне снижения повторяемости отрицательных аномалий уровня. Особенно высокий прирост повторяемости (примерно на 2-3 %) получили колебания, лежащие в пределах первых 50 см от основной моды. Одновременно с этим существенно упала встречаемость высоких нагонов уровня (> 100 см) в Невской губе, что хорошо отражено как на укороченном правом хвосте распределения, так и на меньшей величине коэффициента

асимметрии. Считается, что отмеченная неоднородность в изменчивости уровня может быть описана действием двух различных факторов. Повышение фоновых значений уровня моря в Невской губе, в значительной степени, обусловлено глобальным изменением климата Земли, сопровождающимся ростом среднего уровня Мирового океана. Снижение вероятности экстремальных подъёмов уровня в заливе имеет конкретную техногенную природу, связанную с вводом в эксплуатацию Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений.

В пользу сформулированных гипотез говорят данные, приведенные в таблице (Таблица 19). В соответствии с ними средний уровень моря демонстрирует видимый рост своих значений (на 18-20 см) в течение последних 50 лет. Поведение годовых экстремумов уровня моря имеет другую специфику: с начала 2010-х гг. фиксировалось резкое падение максимумов (на 60-80 см), происходящее при отсутствии выраженных изменений со стороны минимальных отметок. Колебания величины стандартного отклонения за рассматриваемый период являлись незначительными, около 2 см. В то же время постепенное уменьшение с 1980-х гг. коэффициента асимметрии показывает, что задолго до строительства защитных сооружений в бассейне Невской губе уже могла наметиться тенденция к снижению повторяемости высоких значений уровня моря.

Таблица 19. Статистические характеристики изменений ежечасных значений уровня моря в Невской губе за различные периоды с 1971 по 2022 гг.

№	Станция	Параметр	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2010	2011-2022	1971-2022
1	Горный Институт	Минимум	-104,1	-85,3	-97,7	-93,8	-113,4	-113,4
		Среднее	13,5	29,0	24,5	27,8	33,6	25,9
		Максимум	284,7	265,2	263,0	245,6	185,0	284,7
		Размах	388,8	350,5	360,7	339,4	298,4	398,1
		СКО	31,2	31,9	30,4	29,5	29,0	31,1
		Дисперсия	975,2	1015,5	922,4	870,2	841,6	968,0
		Асимметрия	0,731	0,805	0,463	0,699	0,518	0,571
2	Кронштадт	Минимум	-121,0	-92,7	-114,0	-119,5	-119,1	-121,0
		Среднее	0,7	13,3	10,9	13,2	18,8	11,7
		Максимум	238,8	239,6	197,8	227,6	145,1	239,6
		Размах	359,8	332,3	311,8	347,1	264,2	360,6
		СКО	30,7	31,4	29,5	28,8	28,6	30,4
		Дисперсия	939,7	988,7	870,3	831,6	815,7	922,2
		Асимметрия	0,600	0,755	0,431	0,643	0,409	0,512

Анализ кривых обеспеченности ежечасных колебаний уровня, проведённый для различных точек в Невской губе (Рисунок 78, Таблица 20), подчёркивает, что в последнем десятилетии в акватории происходит увеличение уровня моря на большей части диапазона обеспеченности (1-99%) примерно до 6-10 см. При этом в экстремальных отметках уровня моря с повторяемостью менее 1% обнаруживается обратная картинка - резкий спад значений, достигающий 100 см у левой границы графика.

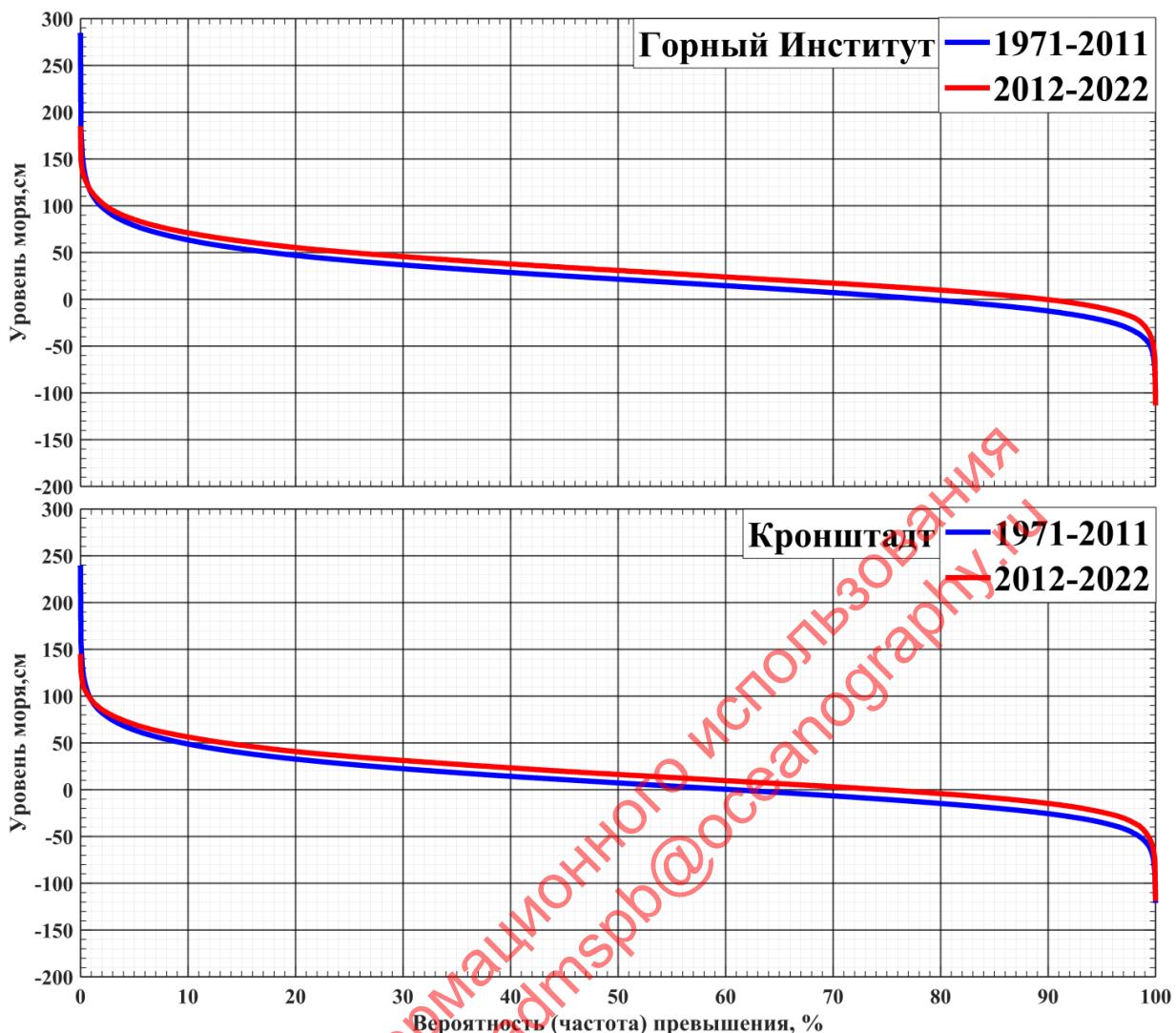


Рисунок 78. Вероятность (частота) превышения ежечасных значений уровня моря в Невской губе за периоды 1971-2011 и 2012-2022 гг.

Таблица 20. Характерные значения обеспеченности уровня моря в Невской губе за периоды 1971-2011 и 2012-2022 гг. по данным ежечасных измерений.

Вероятность превышения, %	Период	100	99.7	99	95	80	65	60	50	40	35	20	5	1	0.3	0
Горный Институт	1971-2011	-104	-56	-42	-22	-1	11	15	22	29	33	47	79	114	141	285
	2012-2022	-113	-45	-29	-9	10	21	24	31	38	42	55	85	116	132	185
Кронштадт	1971-2011	-121	-69	-55	-35	-15	-3	0	7	14	18	33	64	96	120	240
	2012-2022	-119	-59	-44	-24	-4	6	10	16	23	27	41	70	96	110	145

Исследование многолетнего спектра ежечасных колебаний уровня воды в Невской губе за 1971-2022 гг. позволило выделить энергетическиющие частоты на различных масштабах временной изменчивости (Рисунок 79). В диапазоне межгодовых колебаний уровня моря хорошо прослеживаются гармоники с периодами 2-4 года, 6, 8 и 20 лет и амплитудами от 2-3 см до 5-6 см, обусловленные крупномасштабной перестройкой в системе океан-атмосфера и аномалиями солнечной активности [93,101,102]. Сезонная динамика уровня описывается главной годовой гармоникой величиной 12-13,5 см и её короткопериодными обертонами (4, 6 и 9 месяцев) с амплитудами 3,5-6,0 см. Считается, что сезонные возмущения уровня обычно вызваны внутригодовыми изменениями режимообразующих факторов: плотности морской воды, ветра, атмосферного давления, водообмена с Северным морем, элементов пресноводного баланса [93,103]. Синоптические возмущения уровня демонстрируют повышенные (>2 см) амплитуды в интервале периодов около 2-2,5 месяцев. Мезомасштабная изменчивость уровня моря, в большей степени, определяется амплитудами полусуточных ($S2=0,8-0,9$ см, $M2=1,7-1,8$ см) и суточных ($K1=2,8-3,0$ см, $O1=2,7-2,8$ см) приливных гармоник.

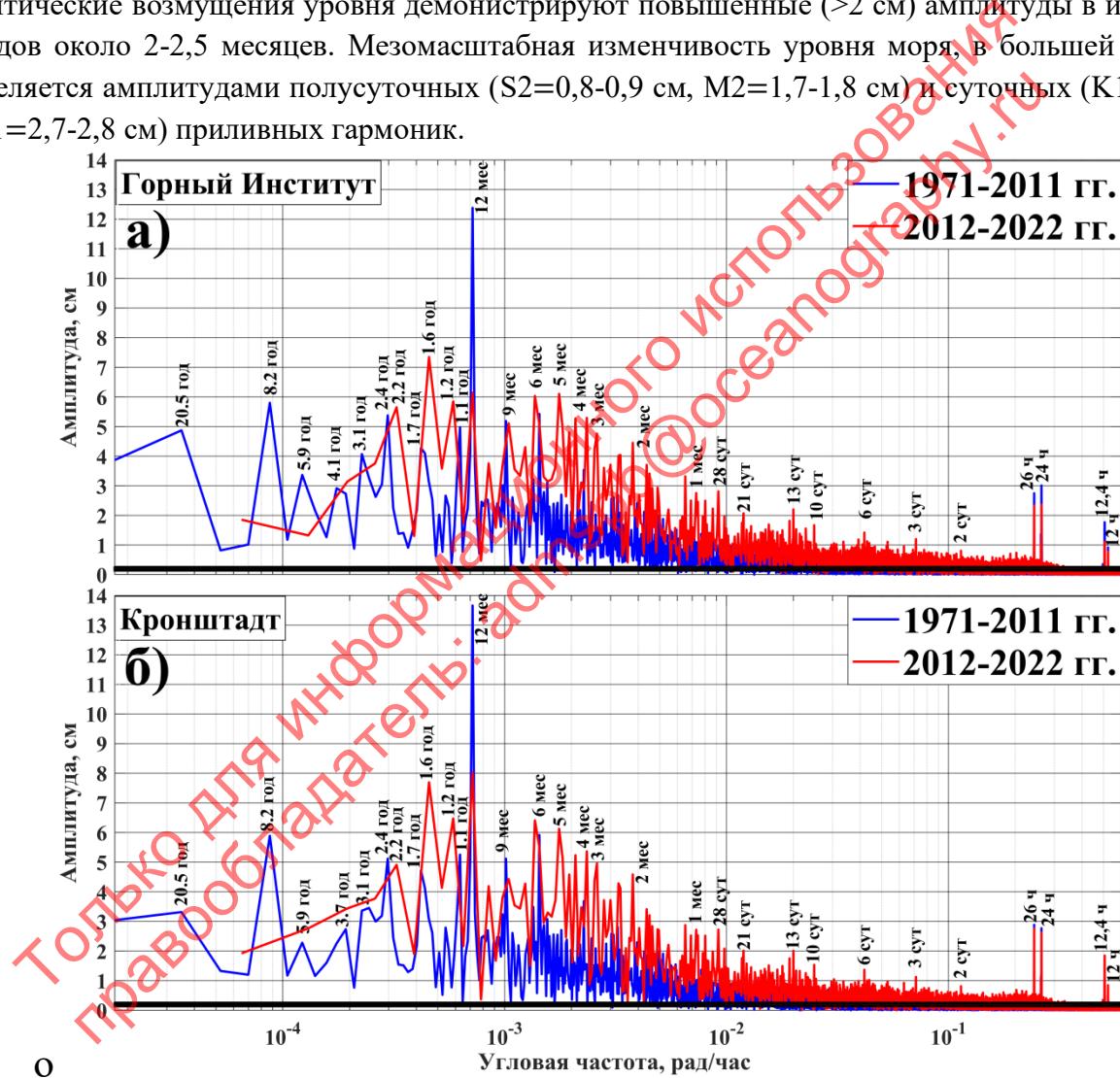


Рисунок 79. Амплитудные спектры Фурье ежечасных значений уровня воды на станциях Горный институт (а) и Кронштадт (б) за период 1971-2011 и 2012-2022 гг. Чёрными цифрами отмечены периоды основных статистически значимых гармоник, амплитуды которых превышают нижний доверительный 95% порог (чёрная линия).

За последнее десятилетие спектр ежечасных колебаний уровня моря в Невской губе претерпел некоторые изменения (Рисунок 79). Было отмечено существенное снижение годовой гармоники на 5-6 см, происходящее при одновременном усилении соседних низкочастотных пульсаций (1,2 и 1,6 года) на 4-4,5 см, близких к 12-месячному периоду Полюсного прилива,

вызываемого нутацией оси вращения Земли [104–106]. Зафиксировано ощутимое увеличение амплитуды (до 4,5–6 см) гармоник 2, 3, 4 и 5 месяцев. Помимо этого, довольно выраженное повышение энергии испытали колебания уровня в короткопериодной (от 1 суток до месяца) изменчивости, в особенности на периодах 10, 13, 21, 28 и 30 суток.

Более подробная оценка нестационарных изменений спектральной структуры колебаний уровня моря в Невской губе была получена при рассмотрении вейвлет-диаграммы (Рисунок 80). Было показано, что заметные низкочастотные возмущения с периодом 6–8 лет наблюдались, преимущественно, лишь в 1980-е гг. Максимумы дисперсии менее продолжительных колебаний с периодами от 1,2 до 4 лет наблюдается 1990–1997 и 2000–2005 гг. Считается, что за межгодовые колебания уровня Балтики на интервале низких частот ответственны долгопериодные изменения поле зональной скорости ветра и атмосферного давления [102,107–110]. Основная сезонная гармоника (период 1 год) достигает своего наибольшего развития в 1970–1990, 2005–2007 и 2012–2014, 2018–2019 гг., причём мощность отмеченных пиков последовательно снижается с начала 2000-х гг. Поведение обертона сезона хода уровня (6, 4, 3 месяцев) демонстрирует высокую динамичность: их крупные, сменяющие друг друга пики спектральной плотности прослеживаются в середине 1970-х, в отдельные годы 1990-х и начала 2000-х гг., а также достаточно регулярно в 2014–2020 гг. По оценкам экспертов, нестационарность сезонных колебаний уровня в Балтийском море также, в значительной степени, связана с межгодовой изменчивостью аномобарических факторов [111–117]. В последнее время отмечается тенденция к смещению энергии сезонных колебаний уровня в сторону короткопериодных обертонах хода. Низкочастотные синоптические колебания уровня (периоды 1–2 месяца) характеризуются крупными максимумами дисперсии в конце 1970-х, середине 1980-х и 1990-х гг. и относительно непродолжительными их всплесками энергии в последующие годы. В высокочастотной области (от суток до 1 месяца) синоптические колебания имеют хаотичную картину временного хода, не выявляющую какой-либо явной закономерности. Мезомасштабные вариации уровня на периодах приливных гармоник 12 и 24 часов остаются относительно стационарными на протяжении всего наблюдения: эпизодические усиления прослеживаются примерно через каждые 2–3 года, наиболее мощными из которых являлись пики, регистрируемые в 1975, 1984, 1993 гг.

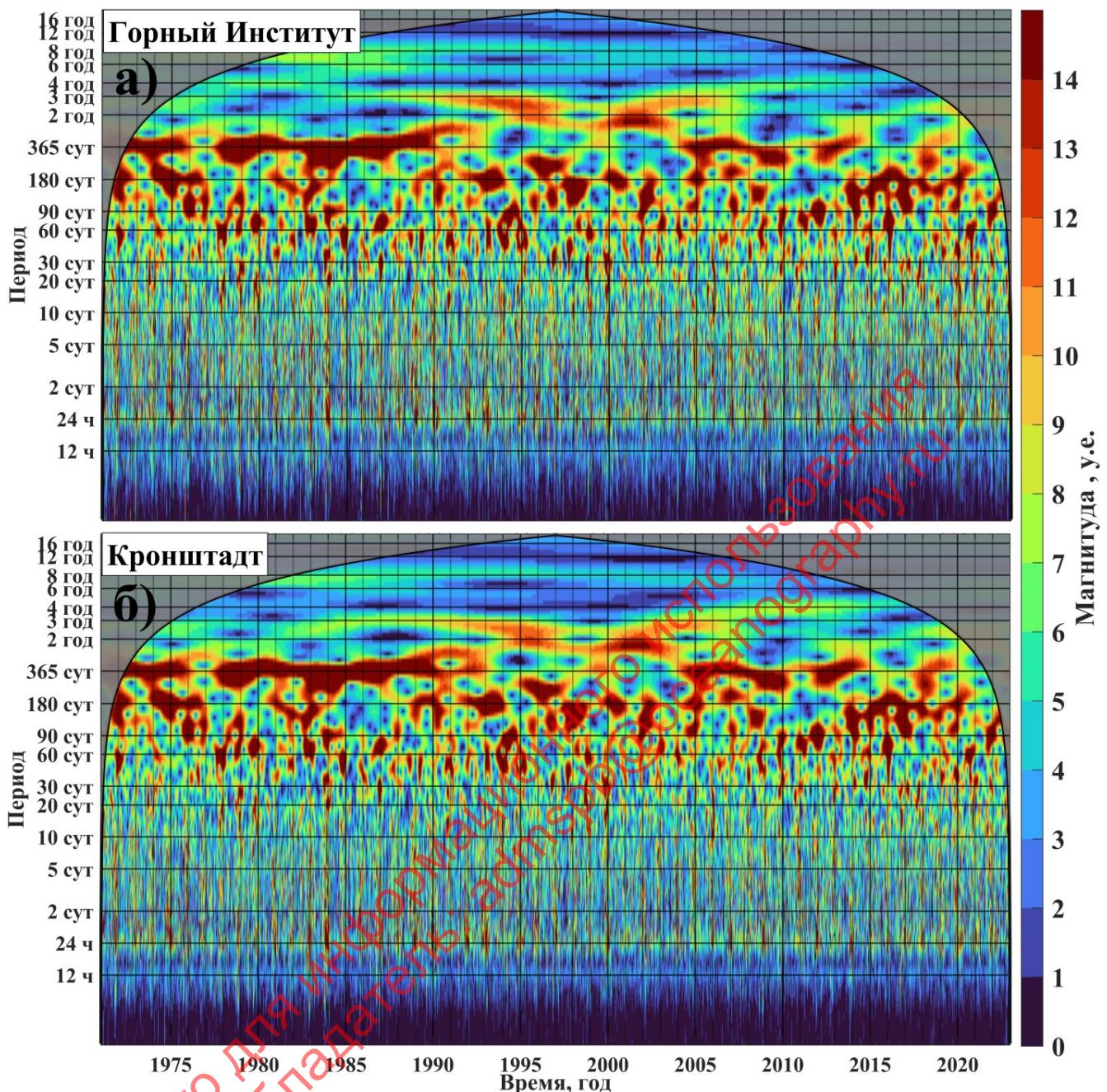


Рисунок 80. Вейвлет-диаграммы изменчивости ежечасных значений уровня воды на станциях Горный институт (а) и Кронштадт (б) за период 1971-2022 гг.

По данным метеографических измерений было реализовано исследование внутрисуточного размаха колебаний воды в Невской губе за период 1971-2022 гг. (Рисунок 81). Было установлено, что примерно в 65% случаев размах суточных колебания уровня находился в диапазоне от 10 до 35 см, причём наибольшую повторяемость имели отметки в 15-20 см (16-19%). Повышенные (>50 см) суточные амплитуды уровня встречались с вероятностью 12,5-16,8 %, а экстремальные (>100 см) – с вероятностью 1,2-1,4 %. В последнее десятилетие отмечается увеличение на 3% повторяемости фоновых значений суточного размаха (0-30 см) у станции Горный институт. Одновременно с этим, регистрируется общее снижение доли высоких (>65 см) и катастрофических (>120 см) значений размаха на 1,6-2,7 % и 0,6-0,8 %, соответственно, что может быть связано с началом работы КЗС в этот период.

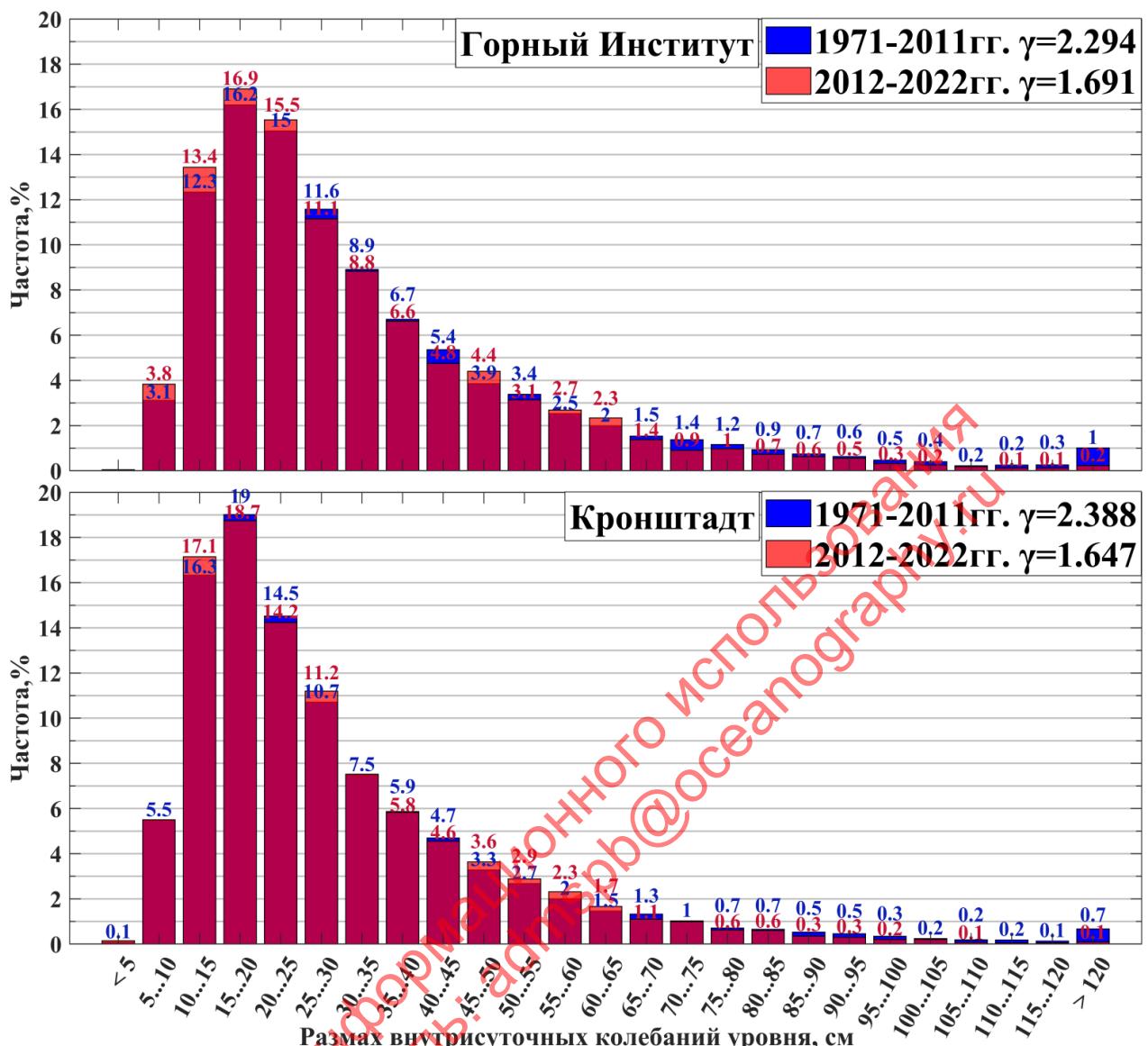


Рисунок 81. Диаграмма распределения внутрисуточного размаха колебаний уровня моря в Невской губе за периоды 1971-2011 и 2012-2022 гг.

Согласно результатам статистического анализа (Таблица 21), внутрисуточный размах уровня воды в Невской губе, изменяется в пределах от 2-3 см до 212-251 см, увеличивая свои значения в направлении закрытой части акватории. Средняя многолетняя величина размаха за последние 50 лет составила около 29-33 см, СКО – в пределах 20-23 см, а коэффициент асимметрии – 2,238-2,306, что указывает на значительное смещение формы распределения в правую сторону. На основании анализа статистик, рассчитанных в различные десятилетия, было выявлено несколько закономерностей: снижение среднего суточного размаха уровня на 2-4 см и его СКО на 4-5 см относительно начала наблюдений, падение максимальных значений размаха с 1980-х гг. и резкое уменьшение асимметрии колебаний с 2010-х гг.

Таблица 21. Статистические характеристики изменений суточного размаха колебаний уровня моря в Невской губе за различные периоды с 1971 по 2022 гг.

№	Станция	Параметр	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2010	2011-2022	1971-2022
1	Горный Институт	Минимум	5,9	3,0	4,0	5,0	4,0	3,0
		Среднее	34,5	33,7	33,1	31,9	30,9	32,8
		Максимум	241,0	251,0	217,0	192,0	180,2	251
		Размах	235,1	248,0	213,0	187,0	176,2	248
		СКО	24,5	24,3	22,8	21,7	19,6	22,6
		Дисперсия	602,3	591,8	518,2	471,2	383,6	510,1
		Асимметрия	2,425	2,248	2,152	2,306	1,694	2,238
2	Кронштадт	Минимум	4,0	2,0	4,0	4,0	4,0	2,0
		Среднее	29,9	29,9	29,2	28,5	28,0	29,1
		Максимум	214,0	213,0	187,0	202,0	144,0	214,0
		Размах	210,0	211,0	183,0	198,0	140,0	212,0
		СКО	21,6	21,6	20,8	20,0	17,7	20,3
		Дисперсия	464,9	467,8	430,6	399,6	314,5	412,1
		Асимметрия	2,561	2,27	2,286	2,453	1,653	2,306

Тенденция к снижению внутрисуточного размаха уровня в Невской губе также отмечается на графике его многолетнего хода (Рисунок 83а, в). С 1971 по 2011 гг. фиксируется статистически значимый отрицательный тренд величиной 0.6-1.0 мм/год, отражающий последовательное сокращение доли и интенсивности экстремальных значений размаха (>120 см). С введением в 2010-х гг. в эксплуатацию дамбы КЗС суточные колебания уровня в бассейне Невской губы становятся практически зарегулированными по верхней границе перепада уровня 120-125 см, а их размах уже не демонстрирует какого-либо значимого тренда.

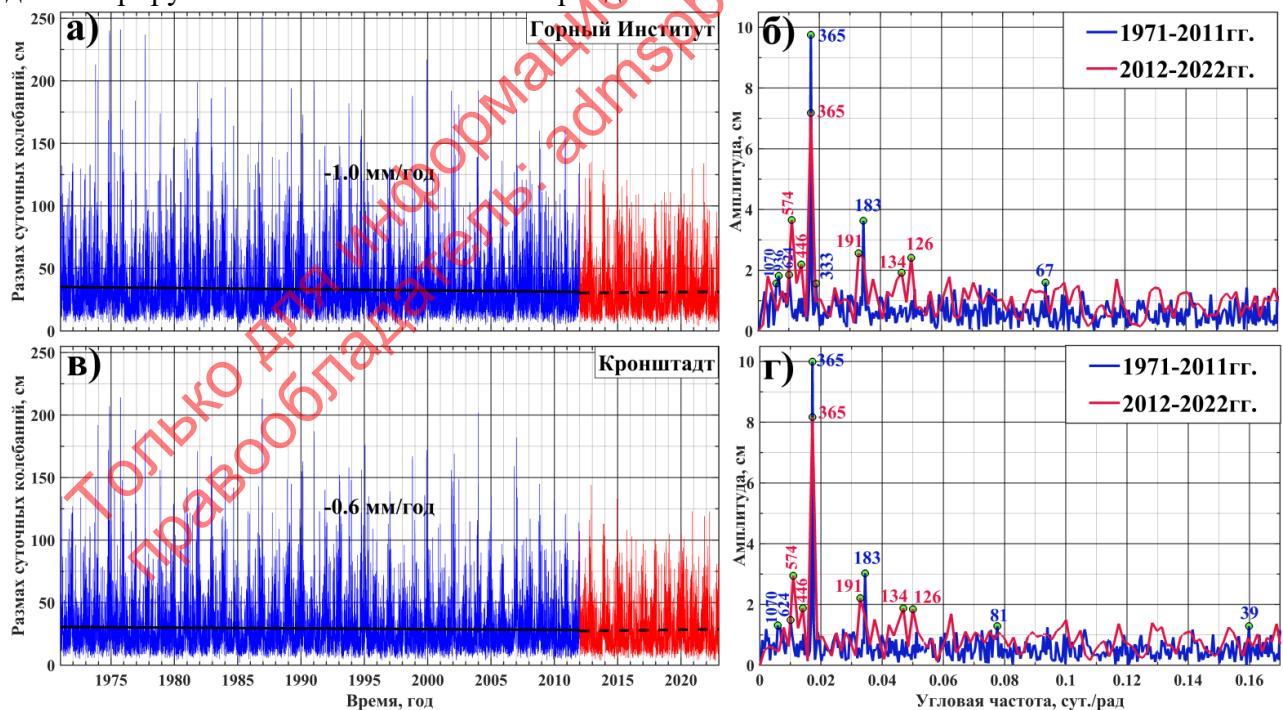


Рисунок 82. Межгодовая изменчивость внутрисуточного размаха уровня моря в Невской губе (а, в) и соответствующие спектры его колебаний (б, г) за периоды 1971-2011 и 2012-2022 гг.

Колебания внутрисуточного размаха уровня воды в Невской губе обладают выраженной сезонной изменчивостью. В его частотном спектре (Рисунок 44б, г) хорошо выделяются годовая и полугодовая гармоника с амплитудами около 10 см и 3-3,5 см соответственно. Последнее десятилетие отмечено снижением амплитуды этих гармоник на 2-3 см (годовая) и 1-1,5 см

(полугодовая), происходящим на фоне равного по силе увеличения амплитуды окрестных гармоник (574, 446, 191 сут) до 2-3,8 см и колебаний с периодами, близкими к третьгодовым (134 и 126 сут) до 2-2,5 см.

Анализ сроков проявления экстремальных значений суточного размаха уровня моря в Невской губе регистрирует ярко выраженную эпизодичность событий (Рисунок 83). Наибольшая повторяемость максимумов размаха наблюдается в осенний (40-42% случаев) и зимний (39-48%) периоды, в то время как минимумы, в основном, прослеживаются весной (34%) и летом (35-36%).

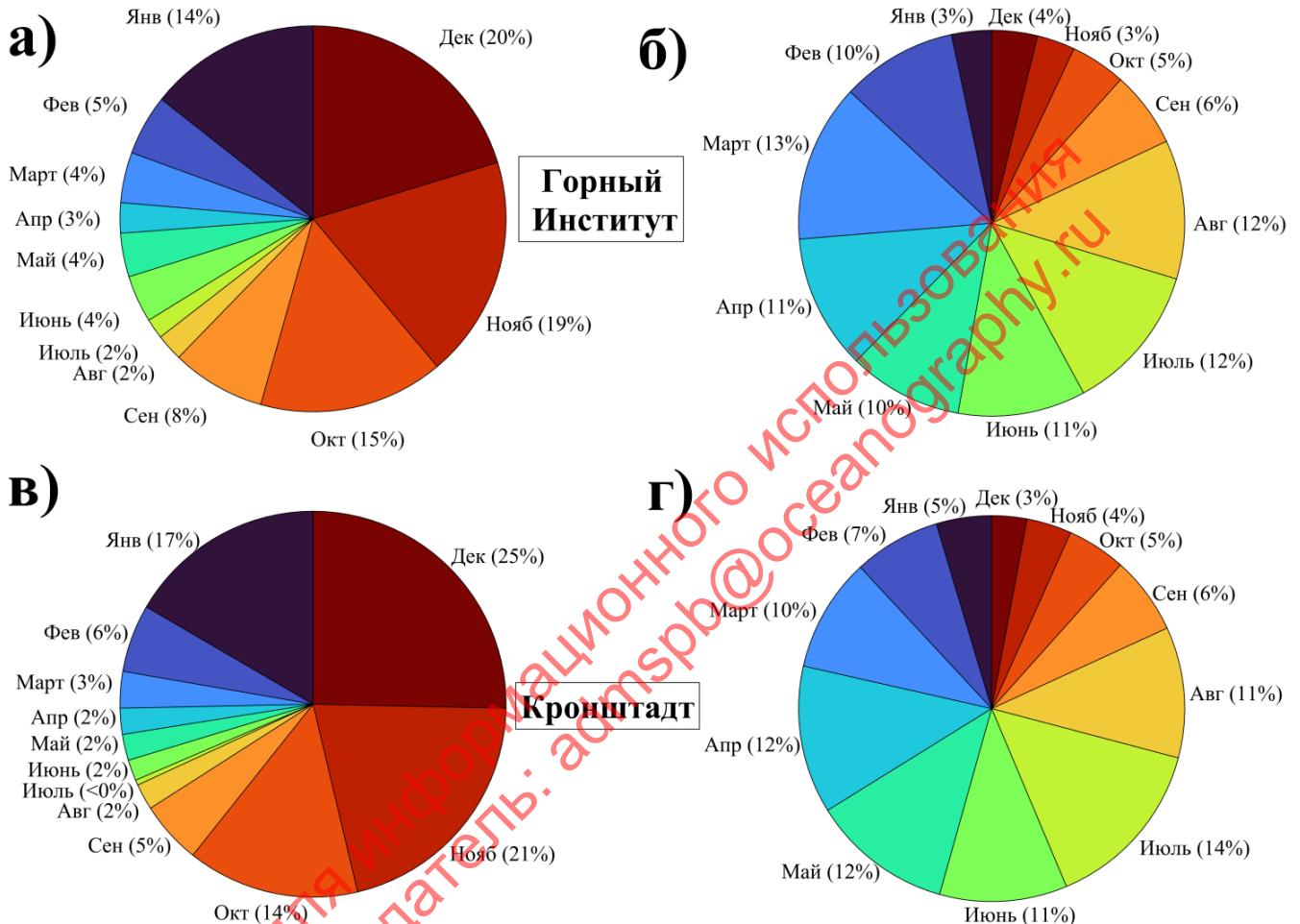


Рисунок 83. Диаграммы распределения экстремально высоких ≥ 100 см (а, в) и низких ≤ 10 см (б, г) значений внутрисуточного размаха уровня в Невской губе по месяцам за период 1971-2022 гг.

В многолетнем сезонном ходе внутрисуточного размаха уровня моря в Невской губе выделяются следующие особенности режима (Рисунок 84). За период 1971-2011 гг. колебания суточного размаха уровня составили 2-7 см, 25-46 см и 125-251 см для минимальных, средних и максимальных месячных отметок соответственно. Наибольшие значения величины наблюдаются в холодное время года, причём особо экстремальные оценки (>200 см) обнаруживаются с октября по декабрь. В целом, поведение максимумов суточного размаха уровня хорошо согласуется с повторяемостью штормовых нагонов (Рисунок 68), что позволяет рассматривать их в качестве косвенного индикатора штормовых условий в акватории. Наименьшие же показания суточного перепада уровня достигаются в теплое время года. При этом абсолютные минимумы для средних и максимальных отметок размаха проявляются в мае и июле месяце.

За последнее десятилетие сезонный ход внутрисуточного размаха уровня в Невской губе претерпел некоторые изменения (Рисунок 84). В целом, за год был выявлен слабый (примерно на 1 см) рост минимальных отметок перепада уровня моря. Одновременно с этим средние значения

размаха суточных колебаний, за исключением отдельных месяцев (февраль, март, апрель) демонстрируют обратную тенденцию – падение оценки на 1-6 см, усиливающееся в зимние месяцы. Наиболее значительная перестройка произошла у сезонных колебаний максимумов внутрисуточного размаха уровня: здесь выявляется резкое снижение оценок, варьирующееся на величину от около 20-60 см в март-августе до 70-110 см в сентябре-феврале. Среднее снижение экстремума в течение года составило порядка 60 см.

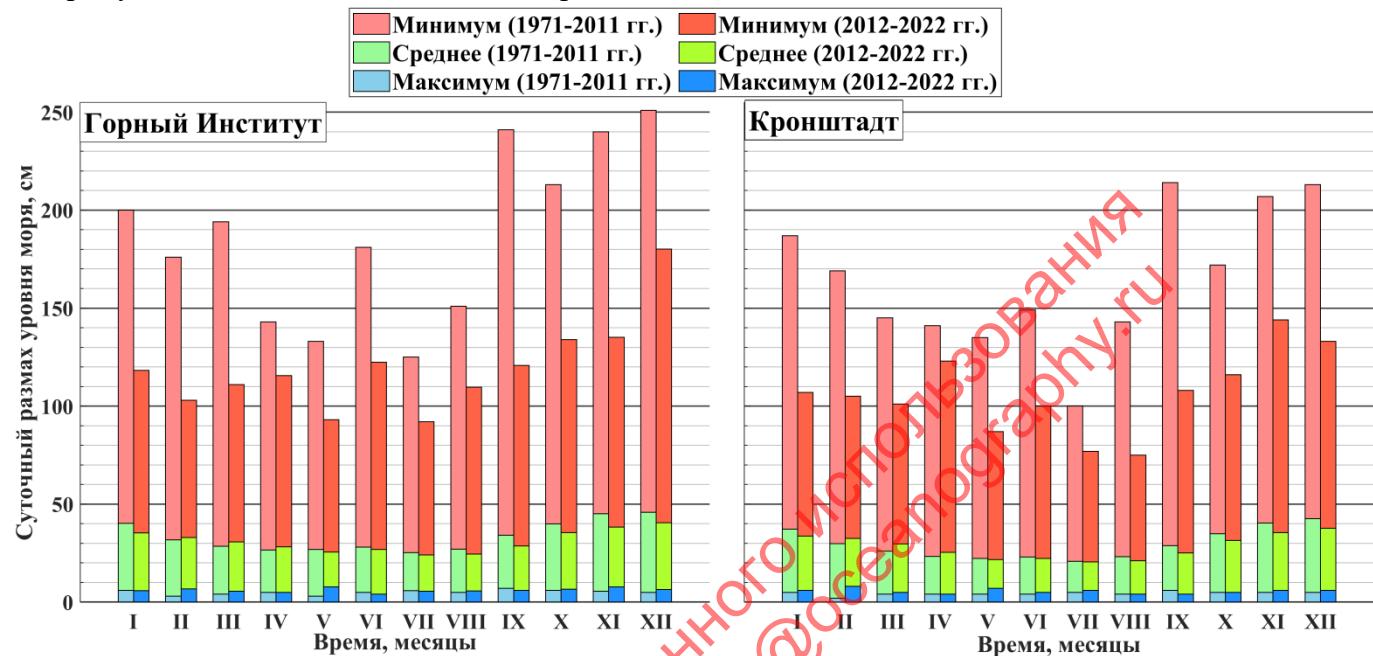


Рисунок 84. Многолетний сезонный ход минимальных, средних и максимальных значений суточного размаха уровня моря в Невской губе за периоды 1971-2011 гг. и 2012-2023 гг.

2.3. Режим уровня воды в системе «река Нева - Невская губа».

Данные и методы исследования уровня воды

Река Нева – единственная река, соединяющая Ладожское озеро с Балтийским морем. Небольшая протяжённость Невы (74 км, [36]) при достаточно высокой её водности (средний расход около 2500 м³/с, [30]) формирует своеобразный гидрологический режим реки, тесно связанный с природными процессами как в Ладожском озере, так и восточной части Финского залива (Невской губе).

Данное исследование посвящено анализу пространственно-временной изменчивости уровня воды в системе взаимосвязанных водных объектов «река Нева - Невская губа». В качестве исходных данных были использованы среднесуточные измерения уровня воды на 12 метеорологических постах, полученные оцифровкой архивных записей Северо-Западного УГМС за период 1980-2023 гг. (Таблица 22, Рисунок 85).

Таблица 22. Информация о метеорологических измерениях уровня моря в реке Неве и Невской губе.

№	Станция	Район	Широта (° с.ш.)	Долгота (° в.д.)	Период наблюдений	Шаг по времени	Длина ряда	Пропуски, %
1	Петрокрепость	р. Нева	59,95	31,03	1980-2023	1 сутки	16071	0,19
2	Отрадное	р. Нева	59,77	30,78	1980-2023	1 сутки	16071	2,28
3	Новосаратовка	р. Нева	59,83	30,55	1980-2023	1 сутки	16071	1,51
4	Обуховский з-д	р. Нева	59,85	30,48	1980-2023	1 сутки	16071	10,78
5	Литейный мост	р. Нева	59,95	30,35	1980-2023	1 сутки	16071	4,16
6	Горный институт	р. Нева	59,93	30,27	1980-2023	1 сутки	16071	0,00
7	ИЦП	р. Нева	59,97	30,28	1980-2023	1 сутки	16071	0,00
8	Невская-порт	Невская губа	59,90	30,25	1980-2023	1 сутки	16071	0,00
9	Лисий Нос	Невская губа	60,00	29,98	1980-2023	1 сутки	16071	4,55
10	Ломоносов	Невская губа	59,90	29,80	1980-2023	1 сутки	16071	0,00
11	Кронштадт	Невская губа	60,00	29,80	1980-2023	1 сутки	16071	0,00
12	Шепелево	Невская губа	60,00	29,10	1989-2023	1 сутки	12783	1,68

В процессе первичной обработки данных среднесуточные измерения уровня воды приводились к дискретности ежемесячных значений – формировались соответствующие многолетние массивы минимальных, средних и максимальных отметок. Далее полученные ряды приводились к Балтийской системе высот путём введения специальной поправки (-5 м). На Завершающем этапе обработки являлось выявление и исправление «выбросов» в гидрологических показаниях уровня воды. Стоит отметить, что в конечных измерениях уровня не учитывается влияние гляциоизостатического поднятия суши. Согласно действующим полуэмпирическим моделям, скорость вертикальных подвижек в рассматриваемом районе Невской губы и реки Невы составляет менее 1 мм/год [118,119], а значит, в контексте данного исследования, ею можно пренебречь.



Рисунок 85. Карта расположения метеорографов в реке Неве (зелёный) и Невской губе (красный).

Для описания уровненного режима реки Невы и Невской губы производился анализ межгодовых, сезонных колебаний уровня воды, а также их экстремальных отметок. Также для оценки влияния на уровненный режим комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС, открыт с 12 августа 2011 года) многолетние ряды наблюдений были разделены на 2 характерных периода: 1980-2011 гг. – период до полного ввода этих сооружений в эксплуатацию, и 2012-2023 гг. – период после ввода их в эксплуатацию. Каждый из отмеченных периодов подвергался отдельному анализу и затем сравнивался друг с другом.

Межгодовая изменчивость уровня в Невской губе исследовалась по среднегодовым значениям данных. Для описания многолетних изменений среднего уровня рассчитывались следующие статистические параметры: минимумов, максимумов, размаха колебаний, математического ожидания, стандартного отклонения и коэффициента вариации. Оценивался многолетний линейный тренд (см. формулы 1 и 2). Поведение межгодовых колебаний определялось по конечно-интегральной кривой (см. формула 3)

При помощи распределения Пирсона III типа рассчитывались уровня воды различной обеспеченности: 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95, 99 %.

Спектральная структура многолетних колебаний уровня моря описывалась при помощи Фурье анализа и вейвлет-анализа (формулы 4, 5, 6).

Сезонная изменчивость уровня в Невской губе анализировалась по среднемесячным значениям данных. Оценивался профиль многолетнего сезонного хода средних, минимальных и максимальных значений уровня воды.

Межгодовая изменчивость сезонных колебаний уровня моря описывалась по диаграмме размаха («ящик с усами»). Также для каждого месяца рассчитывались характерные значения статистик: минимумы, максимумы, математическое ожидание, стандартное отклонение.

Изменчивость экстремальных значений уровня в Невской губе рассчитывалась по минимальным и максимальным за год отметкам воды. Для межгодовых изменений экстремумов рассчитывались их характерные значения: абсолютный минимум и максимум, математическое ожидание, стандартное отклонение, коэффициент вариации. Производилась оценка многолетнего линейного тренда в изменениях экстремумов (см. формулы 1 и 2). Поведение межгодовых колебаний экстремумов уровня определялось по конечно-интегральной кривой (см. формула 3).

При помощи распределения Пирсона III типа оценивались значения уровня различной обеспеченности: 0.1, 1, 2, 5, 10, 15, 25 % - для максимумов стока; 75, 80, 85, 90, 95, 97, 99 % - для минимумов стока.

Межгодовая изменчивость уровня воды в реке Неве и Невской губе

Рисунок 86 (верхний) демонстрирует межгодовую изменчивость среднего уровня воды в реке Неве в период 1980-2023 гг. Средний уровень в Неве, вследствие естественного уклона русла, варьируется от 440-450 см в районе её истока до 20-25 см в устьевой части. Минимальные отметки уровня в реке, в основном, прослеживаются в 2003 г. и 2014-2015 гг., а максимальные регистрируются в 1982-1983 гг. и 2018 г. Таблица 23 (станции №1-7) показывает, что изменчивость среднего уровня воды в Неве последовательно снижается от истока к устью: стандартное отклонение уровня от нормы может составить 8-44 см, а общий размах до 30-200 см.

Анализ межгодовых колебаний уровня моря в Невской губе показал следующие результаты (Рисунок 86, нижний). Локальные минимумы проявляются в 1996, 2010 и 2014 гг. а максимумы – в 1983, 1989, 2008 и 2020 гг. Средний уровень изменяется от 4-6 см в открытой части залива до 16-22 см в его вершине. Его стандартное отклонение внутри Невской губы оказывается в пределах 7,5-8,0 см, а размах колебаний редко превышает 35 см (Таблица 23). В последнее десятилетие (2012-2023 гг.) временной ход демонстрирует видимое повышение среднего уровня моря, однако статистический анализ не подтвердил наличие значимого положительного тренда.

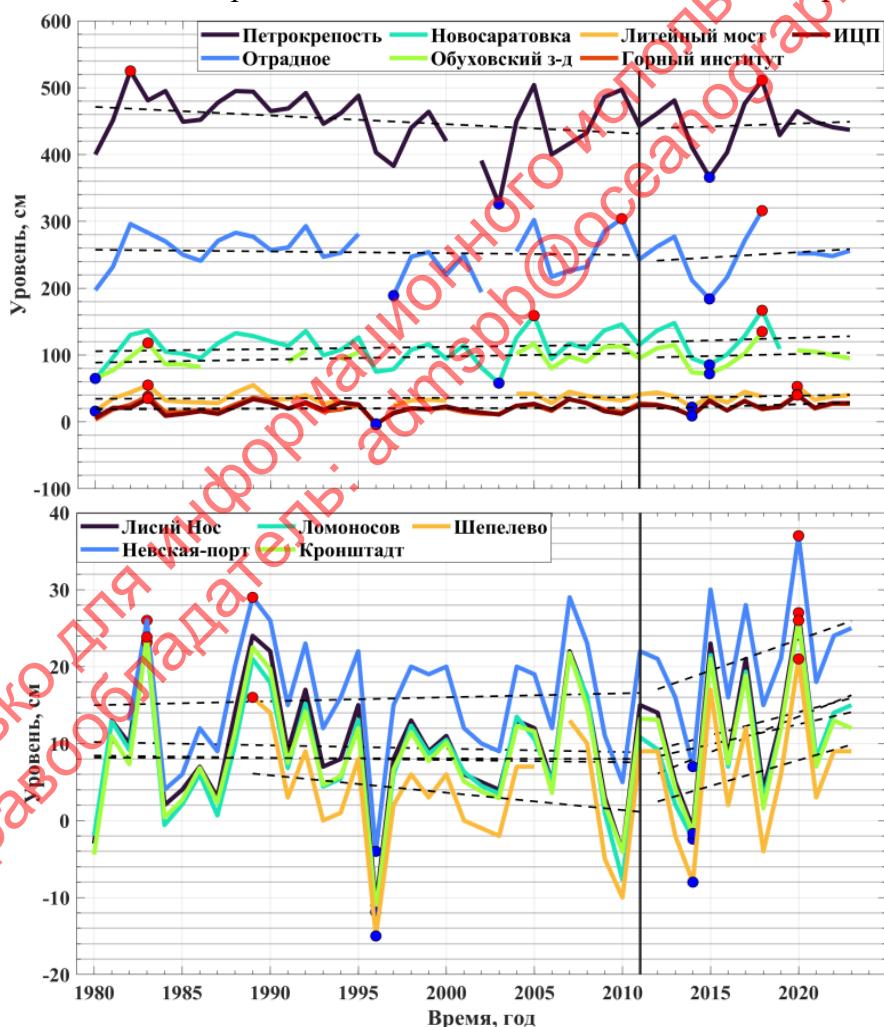


Рисунок 86. Временной ход среднегодовых значений уровня воды в реке Неве и Невской губе за 1980-2023 гг. (чёрной линией разграничены периоды наблюдений 1980-2011 гг. и 2012-2023 гг.).

Таблица 23. Статистические характеристики распределения среднегодовых значений уровня воды в различных точках Невской губы за различные периоды времени.

№	Станция	Период наблюдений	Минимум, см	Максимум, см	Размах, см	Среднее, см	СКО, см	Дисперсия, см ²
1	Петрокрепость	1980-2011 гг.	326	525	199	452	43,6	1898,2
		2012-2023 гг.	366	511	145	444	39,0	1524,9
2	Отрадное	1980-2011 гг.	189	304	115	254	31,3	978,3
		2012-2023 гг.	184	316	132	250	35,6	1267,3
3	Новосаратовка	1980-2011 гг.	58	159	101	111	23,3	541,3
		2012-2023 гг.	85	167	82	123	26,2	688,4
4	Обуховский з-д	1980-2011 гг.	65	118	53	96	14,2	201,9
		2012-2023 гг.	72	135	63	100	18,4	336,9
5	Литейный мост	1980-2011 гг.	16	55	39	36	8,7	75,5
		2012-2023 гг.	22	53	31	38	8,2	67,6
6	Горный институт	1980-2011 гг.	-4	38	42	20	8,9	79,1
		2012-2023 гг.	9	41	32	24	8,3	68,4
7	ИЦП	1980-2011 гг.	-3	35	38	20	8,7	75,0
		2012-2023 гг.	9	40	31	24	8,1	65,4
8	Невская-порт	1980-2011 гг.	-4	29	33	16	7,9	61,7
		2012-2023 гг.	7	37	30	22	8,0	63,5
9	Лисий Нос	1980-2011 гг.	-11	26	37	10	8,1	66,1
		2012-2023 гг.	-1	27	28	13	8,3	68,6
10	Ломоносов	1980-2011 гг.	-12	23	35	8	7,9	62,8
		2012-2023 гг.	-2	26	28	11	8,5	71,6
11	Кронштадт	1980-2011 гг.	-12	24	36	8	7,9	62,0
		2012-2023 гг.	-2	26	28	11	8,1	65,5
12	Шепелево	1989-2011 гг.	-15	16	31	4	7,5	57,0
		2012-2023 гг.	-8	21	29	6	8,5	72,2

В поведении среднегодовых колебаний уровня воды в реке Неве и Невской губе можно выделить несколько общих особенностей. По данным конечно-интегральной кривой (Рисунок 87) в период 1980-х по начало 1990-х гг. отмечалось последовательное накопление положительных аномалий уровня воды, ненадолго прерываемое обратными событиями 1983-1986 гг., имевшими место лишь в акватории Невской губы. Примерно со второй половины 1990-х гг. общая положительная тенденция сменилась на противоположную, которая, с небольшим перерывом в 2007-2008 г. для Невской губы и 2009-2013 г. для реки Невы, продлилась до 2014-2016 гг. С этого момента и по настоящее время (2023 г.) сохраняется тенденция к преобладанию положительных аномалий уровня воды.

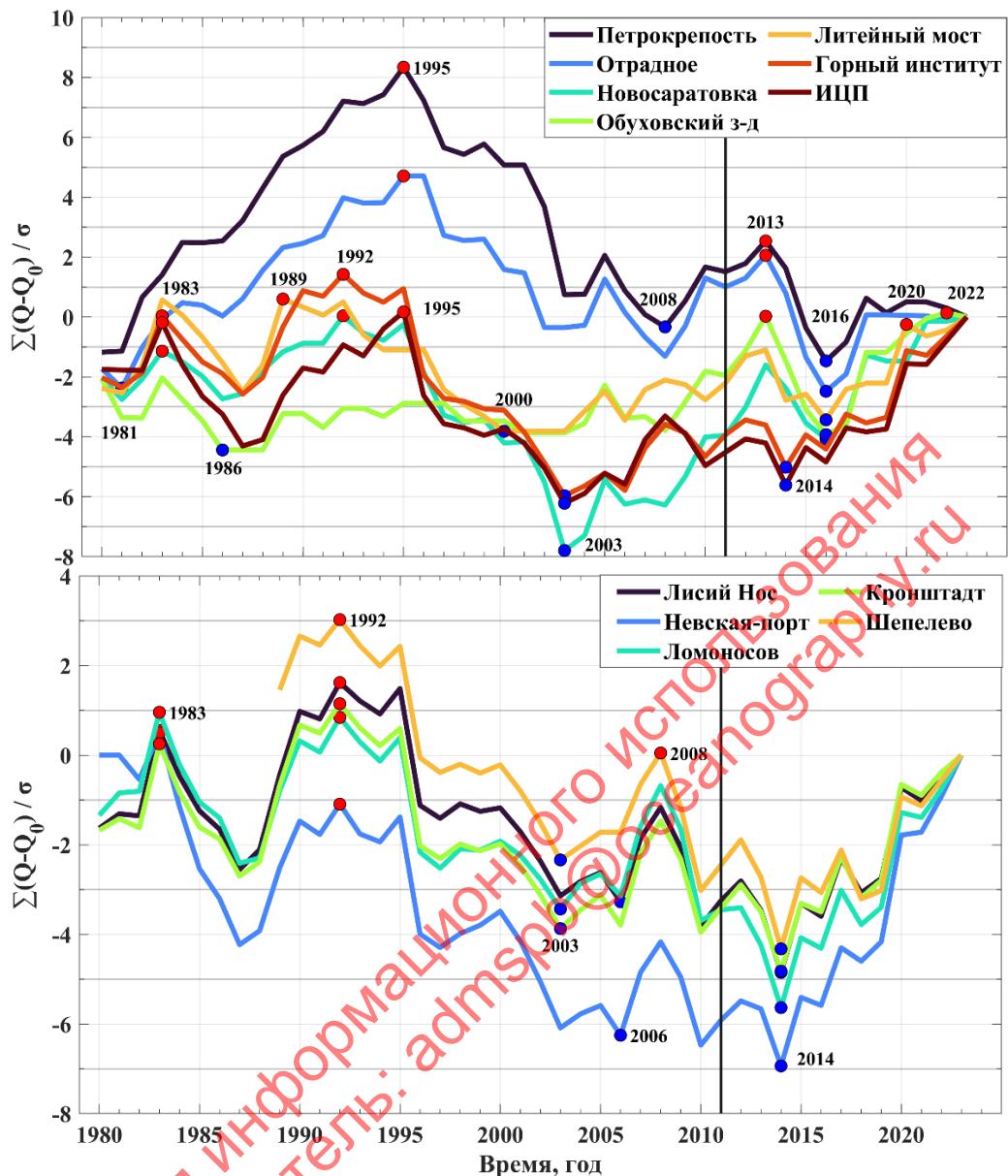


Рисунок 87. Конечно-интегральная кривая изменчивости среднегодовых значений уровня воды в реке Неве и Невской губе за 1980-2023 гг.

Для оценки среднего уровня воды с заданной обеспеченностью для каждой метеографной станции было проведена аппроксимация эмпирического распределения кривой Пирсона III типа. Рисунок 88 показывает, что теоретическая кривая довольно хорошо описывает реальное распределение уровня воды в Неве и Невской губе. По данным выбранной кривой были рассчитаны возможные отметки уровня воды, соответствующие различной вероятности появления (Таблица 24). Результаты расчётов показывают, что на большинстве метеографных станций, за исключением пунктов Петрокрепость и Отрадное, в последнее десятилетие наблюдается повышение характерных значений уровня воды, наиболее проявляющее себя непосредственно перед устьевой зоной Невы (пункты Новосаратовка, Обуховский завод).

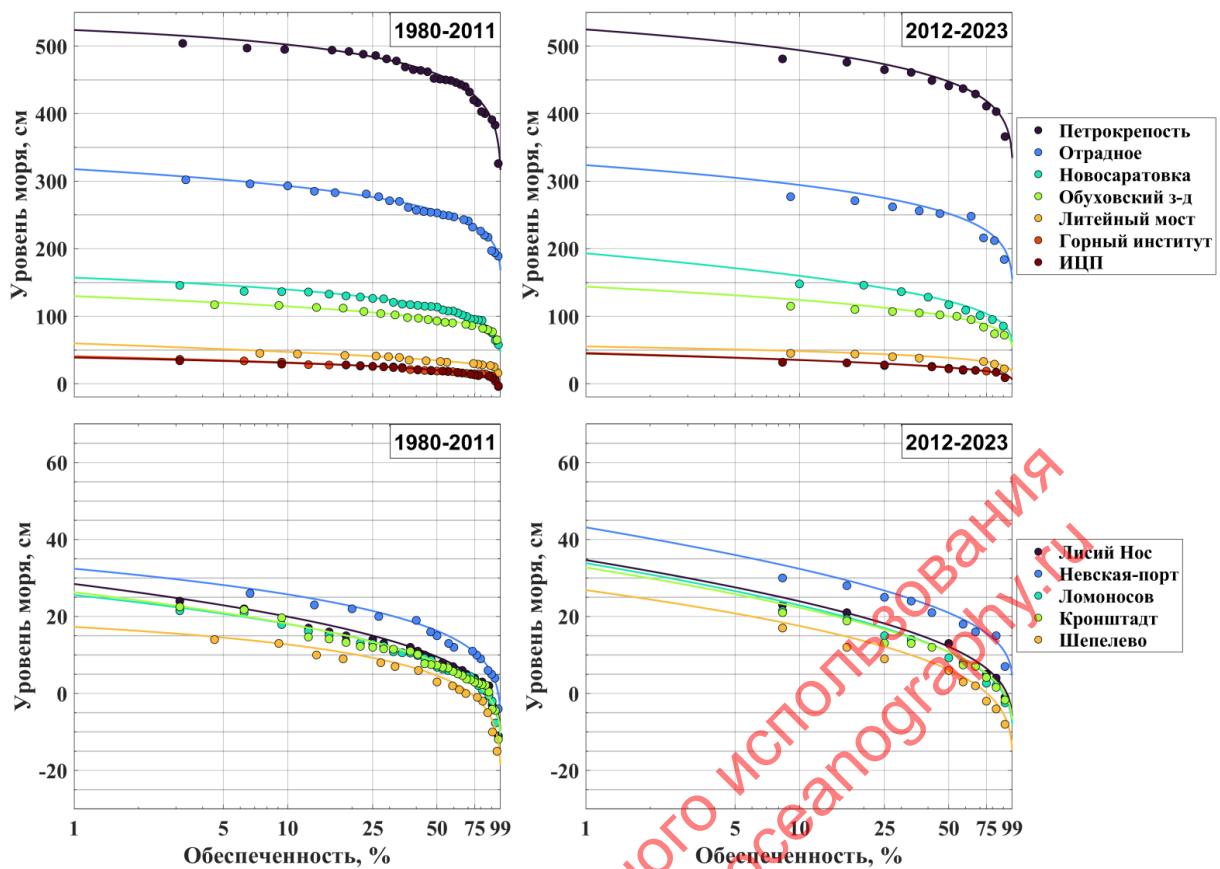


Рисунок 88. Сравнение теоретического распределения среднегодового уровня воды в реке Неве и Невской губе с эмпирическими данными, полученными за периоды 1980-2011 гг. и 2012-2023 гг.

Таблица 24. Статистические характеристики теоретического распределения среднегодовых значений уровня воды в реке Неве и Невской губе за период 1980-2023 гг.

№	Станция	Период	Cs	Cv	1%	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%	99%
1	Петрокрепость	1980-2011	-0,82	0,10	524	511	502	484	459	427	392	368	318
		2012-2023	-0,35	0,09	525	505	494	473	447	419	390	372	336
2	Отрадное	1980-2011	-0,35	0,12	318	302	293	276	256	234	211	197	169
		2012-2023	-0,13	0,14	324	305	294	275	252	227	202	187	156
3	Новосаратовка	1980-2011	-0,35	0,21	157	146	140	128	113	96	79	69	47
		2012-2023	0,16	0,21	193	171	160	142	122	104	88	79	63
4	Обуховский з-д	1980-2011	-0,09	0,15	130	120	115	106	96	86	77	72	62
		2012-2023	0,10	0,18	144	131	124	113	100	87	76	69	56
5	Литейный мост	1980-2011	0,41	0,24	60	51	47	41	35	29	25	23	20
		2012-2023	-0,22	0,22	55	51	48	44	38	33	27	24	17
6	Горный институт	1980-2011	-0,28	0,44	41	35	32	26	20	14	9	6	0
		2012-2023	0,22	0,34	46	39	35	30	24	18	14	11	6
7	ИЦП	1980-2011	-0,34	0,43	39	34	31	26	20	14	9	5	-2
		2012-2023	0,06	0,33	45	39	35	30	24	19	14	11	6
8	Невская-порт	1980-2011	-0,13	0,85	28	23	20	15	10	4	-1	-4	-9
		2012-2023	0,19	0,66	35	28	24	18	12	7	2	-1	-6
9	Лисий Нос	1980-2011	-0,36	0,50	32	28	26	21	16	11	5	2	-5
		2012-2023	0,21	0,37	43	36	32	27	21	16	11	9	5
10	Ломоносов	1980-2011	-0,27	0,99	26	21	18	14	8	3	-2	-5	-11
		2012-2023	0,17	0,76	34	27	23	17	11	5	0	-3	-8
11	Кронштадт	1980-2011	-0,09	0,97	26	21	18	13	8	3	-2	-5	-10
		2012-2023	0,23	0,72	33	26	22	17	11	5	1	-2	-7
12	Шепелево	1989-2011	-0,69	2,05	17	15	13	9	5	-1	-7	-10	-18
		2012-2023	0,05	1,38	27	21	18	12	6	0	-5	-9	-15

Для описания спектральной структуры многолетних колебаний среднего уровня моря в Неве и Невской губе был проведен Фурье-анализ временных рядов, позволяющий изучить изменения уровня в стационарном приближении (Рисунок 89). Было установлено, что общими для реки Невы являются колебания уровня с периодами 4, 6 и 7-8 лет, амплитуды которых последовательно снижаются от района истока (около 20 см) к устьевой зоне (менее 5 см). В районе истока также отмечается единственный долгопериодный максимум с периодом 44 года и амплитудой около 18 см, расположенной у истока Невы. Вблизи Невской дельты появляются колебания с периодами 3 года и 15 лет, имеющие амплитуду порядка 4 см.

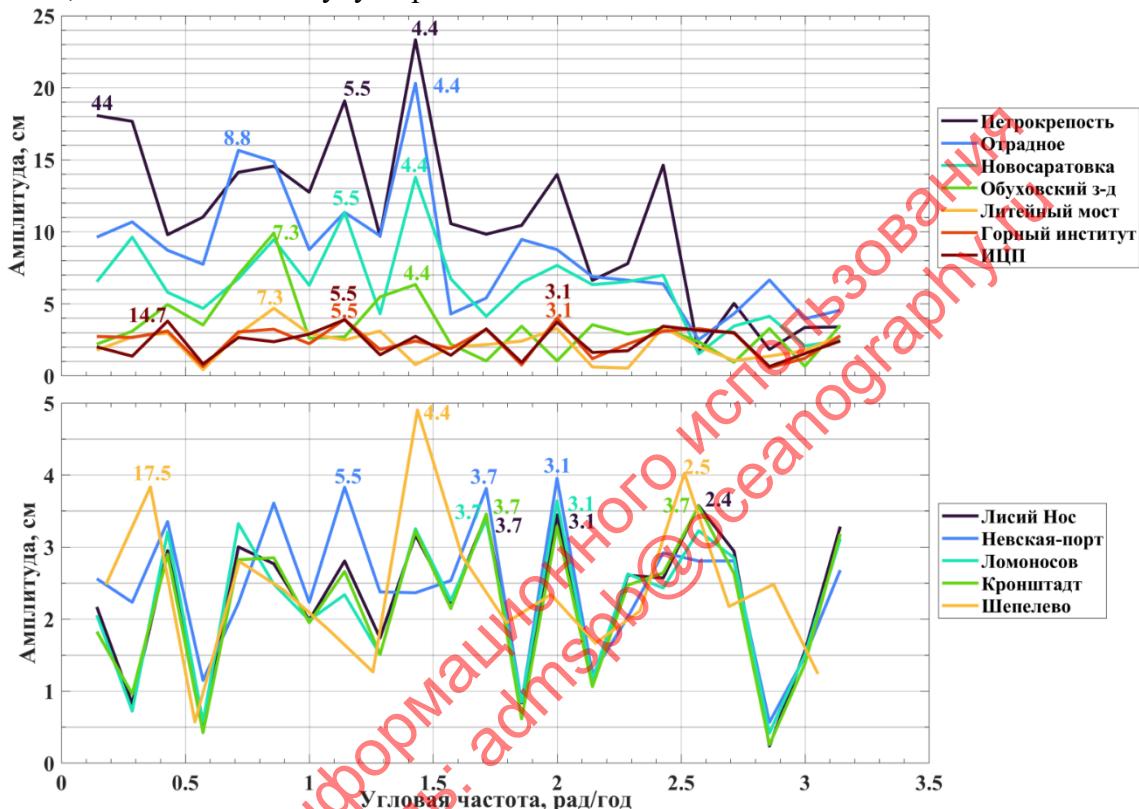


Рисунок 89. Амплитудные спектры Фурье изменчивости среднегодовых значений уровня воды в русле реки Невы и Невской губе за период 1980-2023 гг. (цифрами указаны периоды статистически значимых колебаний уровня)

Более точная, нестационарная характеристика спектра была получена путём вейвлет-анализа метеорологических записей уровня за период 1980-2023 гг. (Рисунок 90). Вейвлет-диаграммы уровня воды в Неве показывают, что колебания с периодом 4 года отмечаются в 2003-2018 гг., 6-летний пик является доминирующим в 1998-2005 гг., а максимумы с периодом 7-8 лет прослеживаются с 2010-х гг. Причём интенсивность отмеченных колебаний быстро уменьшается вниз по течению. В дельте Невы структура спектра уровня оказывается схожей с Невской губой.

Колебания же уровня воды в Невской губе несколько отличаются (Рисунок 91). Согласно диаграммам уровня, 4-летние пики остаются локализованными в пределах 2003-2018 гг. Исчезает 6-летний максимум в начале 2000-х. Обнаруживаются непродолжительные 3-летние колебания в 1993-1997 гг. и 2018-2020 гг. Интенсивность возмущений слабо меняется в пределах акватории.

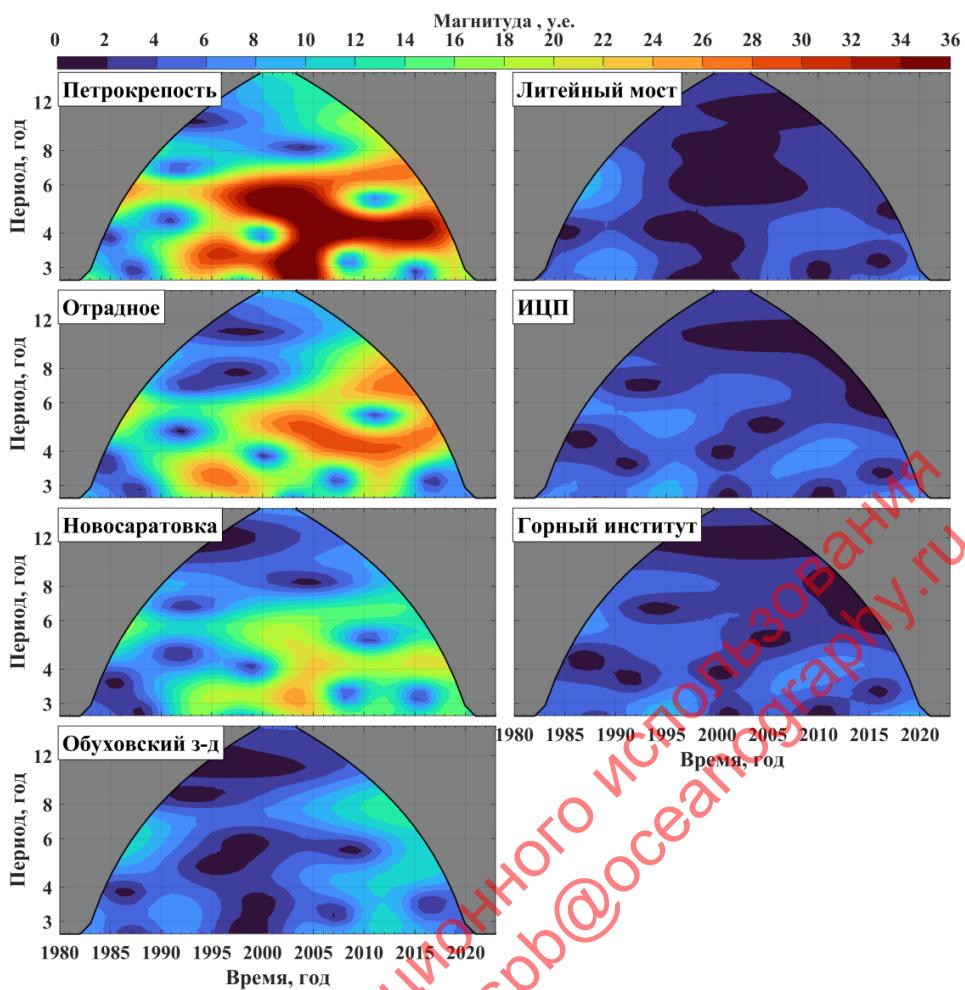


Рисунок 90. Вейвлет диаграммы изменчивости среднегодовых значений уровня воды в русле реки Невы за период 1980-2023 гг.

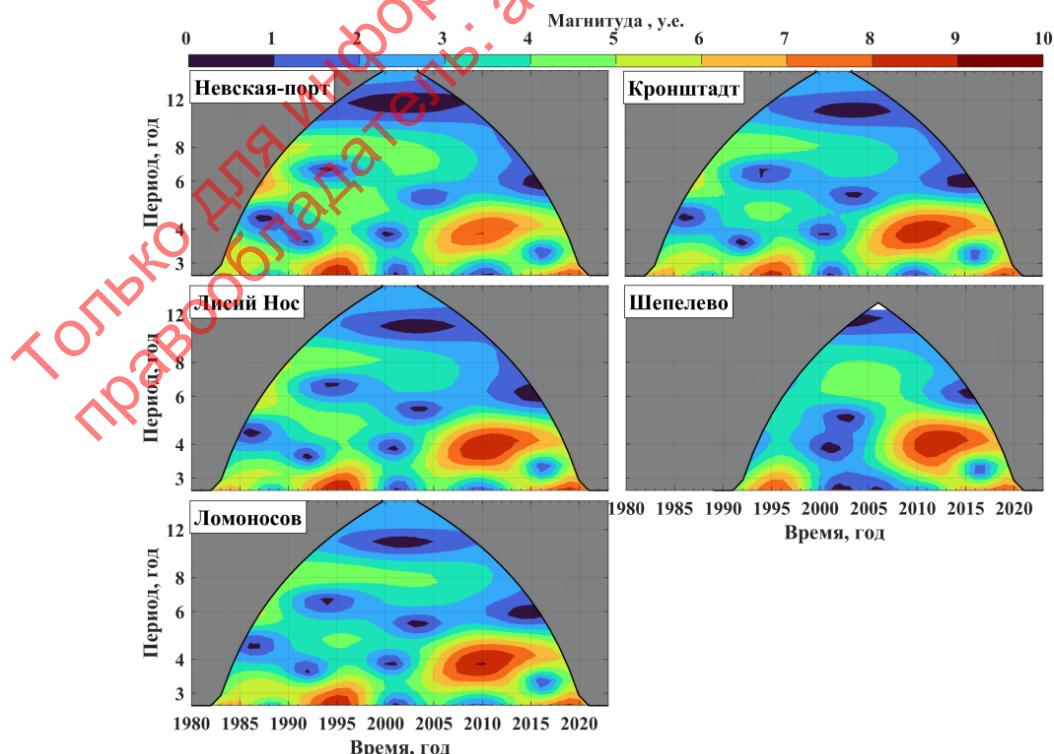


Рисунок 91. Вейвлет диаграммы изменчивости среднегодовых значений уровня воды в акватории Невской губы за период 1980-2023 гг.

Сезонная изменчивость уровня воды в реке Неве и Невской губе

На Рисунок 92 представлен многолетний сезонный ход минимальных, средних и максимальных значений уровня воды в русле реки Невы. Анализ среднего уровня моря позволил выделить 3 типа кривой её сезонного хода. Первый тип кривой, отмеченный в верховье реки Невы, характеризуется максимальными отметками уровня воды в мае-июне и его минимумами в ноябре-декабре. Второй тип сезонного хода приходится участок между постами Отрадное и Обуховский завод. Его особенностью является максимум среднего уровня воды в период с ноября по февраль и слабо выраженный минимум, наблюдаемый в летний сезон. Экстремальные же отметки уровня воды здесь также приходятся на осенне-зимнее время. Наконец, третий тип сезонного ход представлен сравнительно однородным в течение года средним уровнем моря, экстремальные отметки уровня которого проявляются, преимущественно, осенью и зимой.

Сравнительный анализ колебаний уровня воды в реке Неве, реализованный для двух временных периодов (1980-2011 гг. и 2012-2023 гг.), позволил выделить некоторые характерные черты в изменчивости его сезонного хода (Таблица 25). С 2011 года на большинстве метеорографных станций было отмечено значительное снижение абсолютных максимумов уровня в осенне-зимний период, особенно в приусадебной зоне Невы (до более 100 см в отдельные месяцы). Одновременно с этим произошло менее значительное повышение минимальных отметок воды с конца весны до начала осени, наиболее проявившееся в верховье Невы (около 100 см).

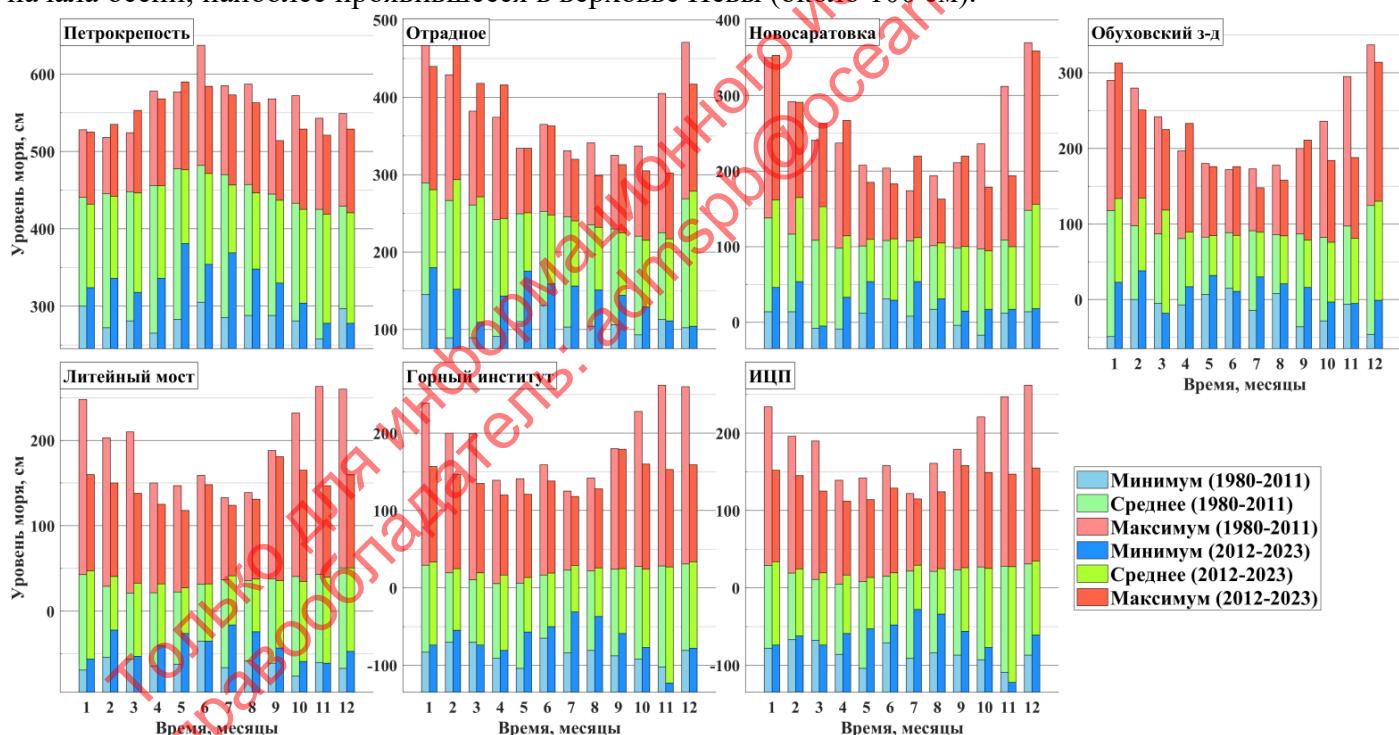


Рисунок 92. Многолетний сезонный ход минимальных, средних и максимальных значений уровня воды в русле реки Невы за периоды 1980-2011 гг. и 2012-2023 гг.

Многолетний сезонный ход уровня моря в Невской губе демонстрирует достаточно однородный ход в пределах своей акватории (Рисунок 93). Средние месячные отметки уровня слабо варьируются в пределах года. В то же время экстремальные показания уровня регистрируются, главным образом, в осенне-зимнее время, когда над территорией залива развивается повышенная циклоническая активность, способствующая как значительному нагону, так и сгону уровня вблизи берегов.

Что касается межгодовой изменчивости сезонного хода в рассматриваемом районе, то в пределах Невской губы с 2011 года отмечается существенное понижение максимальных значений уровня в холодное время года (Таблица 25). Чаще всего это объясняется завершением в августе 2011 года строительства Комплекса защитных Санкт-Петербурга от наводнений, предназначенного для предохранения города и его окрестностей от опасных подъёмов уровня воды выше 160 см. Исключение из этого составляет станция Шепелево, расположенная к юго-западу от Невской губы и находящаяся за пределами комплекса защитных сооружений. В её измерениях за последние десятилетия можно отметить отдельные повышения уровня моря, приходящиеся, чаще всего, в осенние и зимние месяцы.

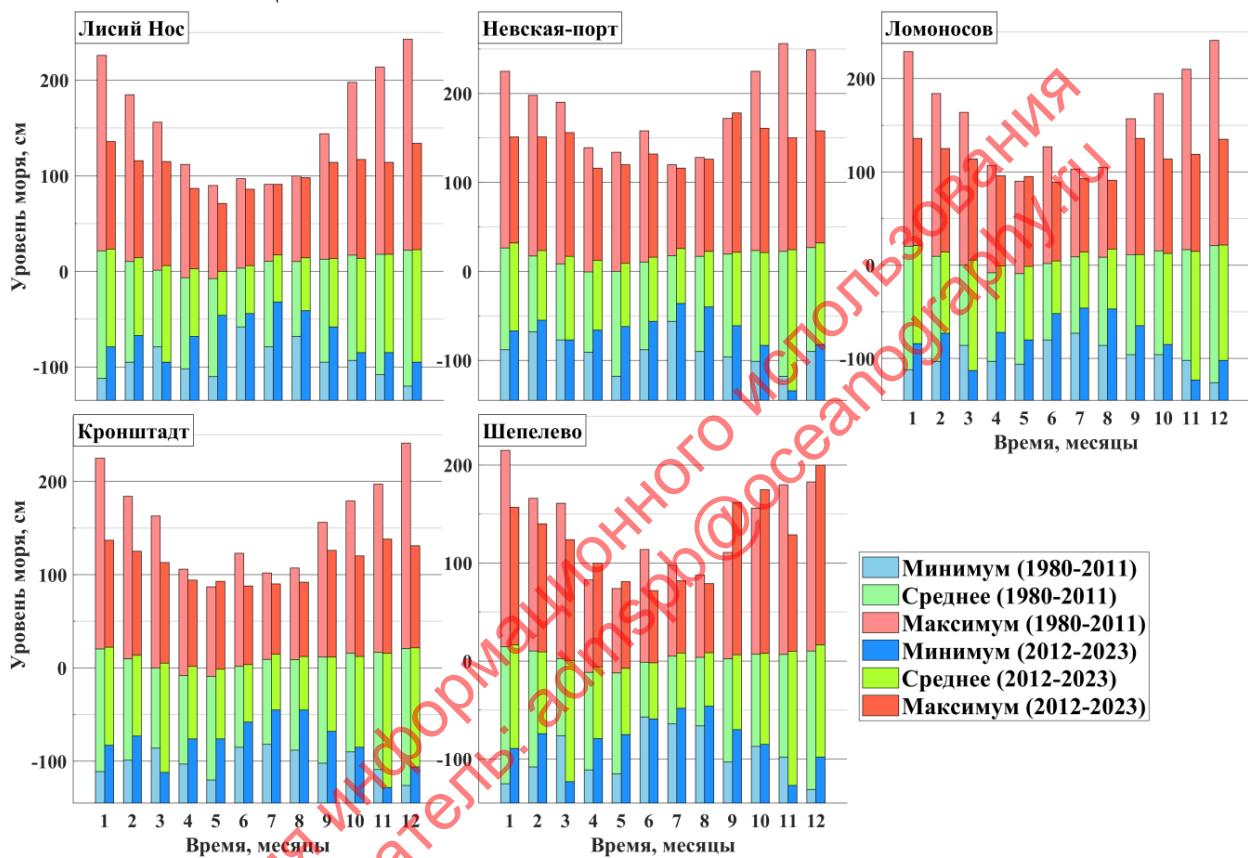


Рисунок 93. Многолетний сезонный ход минимальных, средних и максимальных значений уровня воды в Невской губе за периоды 1980-2011 гг. и 2012-2023 гг.

Таблица 25. Многолетний сезонный ход ежемесячных значений уровня воды на станциях за 1980-2011 гг. и 2012-2023 гг.

№	Месяц	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		
		Параметр	1980-2011	2012-2023	1980-2011	2012-2023	1980-2011	2012-2023	1980-2011	2012-2023	1980-2011	2012-2023	1980-2011	2012-2023	1980-2011	2012-2023	1980-2011	2012-2023	1980-2011	2012-2023	1980-2011	2012-2023	1980-2011	2012-2023		
1	Минимум	300	324	272	336	281	318	265	336	283	381	305	354	285	369	288	348	288	330	281	304	258	278	297	278	
	Среднее	441	432	446	442	448	446	456	456	478	476	482	472	470	457	457	446	445	437	433	425	425	419	429	421	421
	Максимум	528	525	518	535	524	553	578	568	577	590	637	584	585	573	587	563	568	514	572	529	543	521	549	529	529
	СКО	42,9	45,3	47,6	45,6	47,2	48,8	50,2	45	46,8	44,5	49,1	43,3	52,1	41,6	49,5	46,5	39,5	45,9	43,4	46,3	48,6	41,5	50,1	41,5	50,1
2	Минимум	145	180	89	152	89	109	91	143	110	175	131	159	103	156	104	151	106	144	93	129	113	111	102	104	104
	Среднее	289	280	267	294	261	271	242	243	249	251	253	248	246	240	235	232	230	225	221	215	225	217	269	278	278
	Максимум	467	440	429	470	382	418	374	416	334	365	363	331	320	341	299	325	313	337	305	405	302	471	417	417	417
	СКО	51,2	50,4	57,8	62,1	46,4	57,5	38,2	42,9	37,1	35,2	36,9	34,3	30,7	39,7	29,6	35,1	32,1	34,1	34,5	37,8	39,9	59,9	68,3	59,9	68,3
3	Минимум	14	46	14	54	-8	-5	-9	33	12	54	31	29	8	54	17	31	-4	15	-17	17	12	17	14	18	18
	Среднее	138	162	116	165	109	153	98	114	101	110	108	110	107	112	101	105	98	100	97	94	109	100	148	156	156
	Максимум	350	353	292	291	241	263	237	267	208	185	204	183	174	220	194	163	211	220	236	179	312	194	370	359	359
	СКО	46,1	48,9	45	47,3	41,6	48,4	25,4	30,8	23,1	21,6	20,7	22,7	23	16,6	24,6	18,8	23,9	22,7	22,5	26,3	26,5	27,8	45,7	53,4	53,4
4	Минимум	-49	23	0	38	-5	-18	-7	17	7	32	15	11	-14	30	8	21	-36	16	-28	-3	-6	-5	-46	-1	-1
	Среднее	118	134	98	134	87	118	81	90	83	85	89	85	91	89	86	84	87	79	82	76	97	81	125	130	130
	Максимум	290	313	280	251	242	225	197	233	180	176	172	176	173	148	178	158	200	211	236	184	295	188	337	314	314
	СКО	46,2	37,7	33,7	36,1	32,5	35,7	20,7	24,3	20,2	16,6	17,1	16,2	17	13,9	20,6	14,9	18,8	19,2	22,4	23,9	24	24,9	40,3	39,1	39,1
5	Минимум	-69	-56	-54	-22	-56	-53	-64	-40	-62	-26	-35	-35	-66	-16	-58	-24	-61	-43	-76	-59	-60	-61	-67	-47	-47
	Среднее	43	47	29	40	21	33	22	32	23	27	32	32	37	41	36	38	38	36	41	35	43	40	51	51	51
	Максимум	248	160	203	150	210	138	150	125	147	118	159	148	133	124	139	131	188	181	232	165	263	147	260	160	160
	СКО	30,7	21,5	25	25,7	26	15,1	15,3	13	12	8,6	9,9	12	11,3	13	14,9	8,8	19,2	17	17,2	21,1	22,1	21,7	22,4	22,4	22,4
6	Минимум	-83	-74	-70	-55	-70	-74	-91	-81	-104	-57	-65	-50	-84	-31	-81	-37	-88	-59	-92	-77	-102	-123	-81	-78	-78
	Среднее	29	33	19	25	11	19	5	17	6	14	17	19	23	29	22	26	24	25	28	24	28	27	31	34	34
	Максимум	239	157	200	147	199	135	139	120	141	121	159	138	125	118	142	128	180	179	228	160	262	153	260	159	159
	СКО	28,9	22,3	27,2	27,5	27,8	18,5	15	15,2	10,8	9,8	9,4	12	10,3	13,5	13,9	8,1	19,6	16,5	19,6	20,7	22,7	23,9	27,5	27,5	
7	Минимум	-78	-74	-67	-62	-68	-74	-86	-59	-104	-53	-71	-48	-91	-28	-84	-34	-87	-56	-93	-77	-109	-122	-87	-61	-61
	Среднее	29	34	19	25	11	19	5	16	8	13	15	20	22	29	21	25	23	26	27	25	28	27	31	35	35
	Максимум	234	152	196	145	190	125	139	112	142	114	158	129	122	115	161	124	179	158	221	149	247	147	262	155	155
	СКО	29,1	22,2	27,7	27,5	27,8	17,5	14,6	14,9	19,1	9,2	10,2	11,9	10,8	13,2	13,7	8,2	18,5	15,3	18,8	21	21,7	22,3	24,5	25,7	25,7
8	Минимум	-88	-67	-68	-55	-77	-77	-91	-66	-118	-62	-88	-56	-56	-36	-90	-40	-96	-61	-101	-83	-118	-134	-90	-82	-82
	Среднее	26	32	17	23	9	17	-1	12	0	9	11	16	18	26	17	23	20	22	23	21	23	25	27	32	32
	Максимум	225	151	198	151	190	156	139	116	134	120	158	132	120	116	128	172	178	225	161	256	150	249	158	158	
	СКО	28,5	21,4	28,6	27,6	27,1	18,2	14,7	15,8	9,7	10,5	9,8	11,9	10,3	14,2	12,8	8,1	18,2	16,3	19,8	21	21	22,1	24,1	26,9	26,9
9	Минимум	-112	-79	-95	-67	-79	-95	-102	-68	-110	-46	-58	-44	-79	-32	-68	-41	-95	-58	-93	-85	-108	-85	-120	-95	-95
	Среднее	22	23	10	14	1	6	6	3	-7	0	3	6	11	17	10	14	13	13	17	14	18	18	22	23	23
	Максимум	226	136	185	116	156	115	112	87	90	71	97	86	91	91	100	98	144	114	114	117	214	114	243	134	134
	СКО	29,4	22,6	29,8	28,3	27,7	20,7	14	16,3	9,4	9,9	9,1	11,9	10	13,5	12,9	7,8	17,9	16,5	19,1	20,7	20,9	21,7	24,2	28	28
10	Минимум	-112	-84	-103	-73	-86	-113	-103	-72	-106	-80	-80	-52	-73	-46	-86	-47	-96	-65	-96	-85	-102	-123	-126	-102	-102
	Среднее	21	21	9	14	0	6	-8	-1	-9	-1	2	5	9	14	9	17	11	11	16	13	17	15	21	22	22
	Максимум	229	136	184	125	164	114	107	96	90	95	127	89	103	93	105	91	157	136	184	114	210	119	241	135	135
	СКО	29,5	22,6	29	29,5	27,3	22,3	13,9	19	9,3	10,4	9	11,7	10,1	14	12,5	17,8	15	18,8	20,6	21,6	23,1	24,2	27,4	27,4	
11	Минимум	-111	-83	-99	-73	-86	-112	-103	-76	-120	-76	-85	-58	-82	-45	-88	-45	-102	-68	-90	-85	-109	-128	-126	-106	-106
	Среднее	20	22	10	14	0	5	-8	2	-9	-2	2	4	9	15	9	12	12	12	16	12	17	16	21	22	22
	Максимум	225	137	184	125	163	113	106	94	87	93	123	88	102	90	107	92	156	126	179	120	197	138	241	131	131
	СКО	29,4	22,1	28,7	28,3	27,5	20,5	13,9	16,5	9,4	9,8	9,2	11,5	10,2	13	12,8	7,8	18,2	16,2	19,2	19,9	20,9	22,2	23,8	27,7	27,7
12	Минимум	-125	-89	-108	-74	-76	-123	-111	-79	-115	-75	-57	-59	-64	-48	-66	-46	-103	-70	-87	-85	-98	-127	-131	-98	-98
	Среднее	15	16	10	9	3	1</td																			

Минимальные колебания уровня моря в реке Неве и Невской губе

Рисунок 94 (верхний) представляет многолетний ход годовых минимумов уровня воды на метеорологических станциях реки Неве за 1980-2023 гг. За отмеченный период выделяется несколько локальных минимумов уровня, приходящихся на 1997, 2003, 2007 и 2015 гг. Абсолютное значение минимума уровня воды на станциях варьируется в пределах от 230 см в истоке реки до -120 см в устье. Мощность колебаний годовых минимумов в реке Неве снижается от истока к устью: стандартное отклонение годовых минимумов в русле реки составляет 15-55 см, а общий размах значений может достигать 50-230 см (Таблица 26). Несмотря на некоторое увеличение средних статистик (на 5-10 см) в последнее десятилетие, статистически значимых трендов в рассматриваемых рядах не было обнаружено.

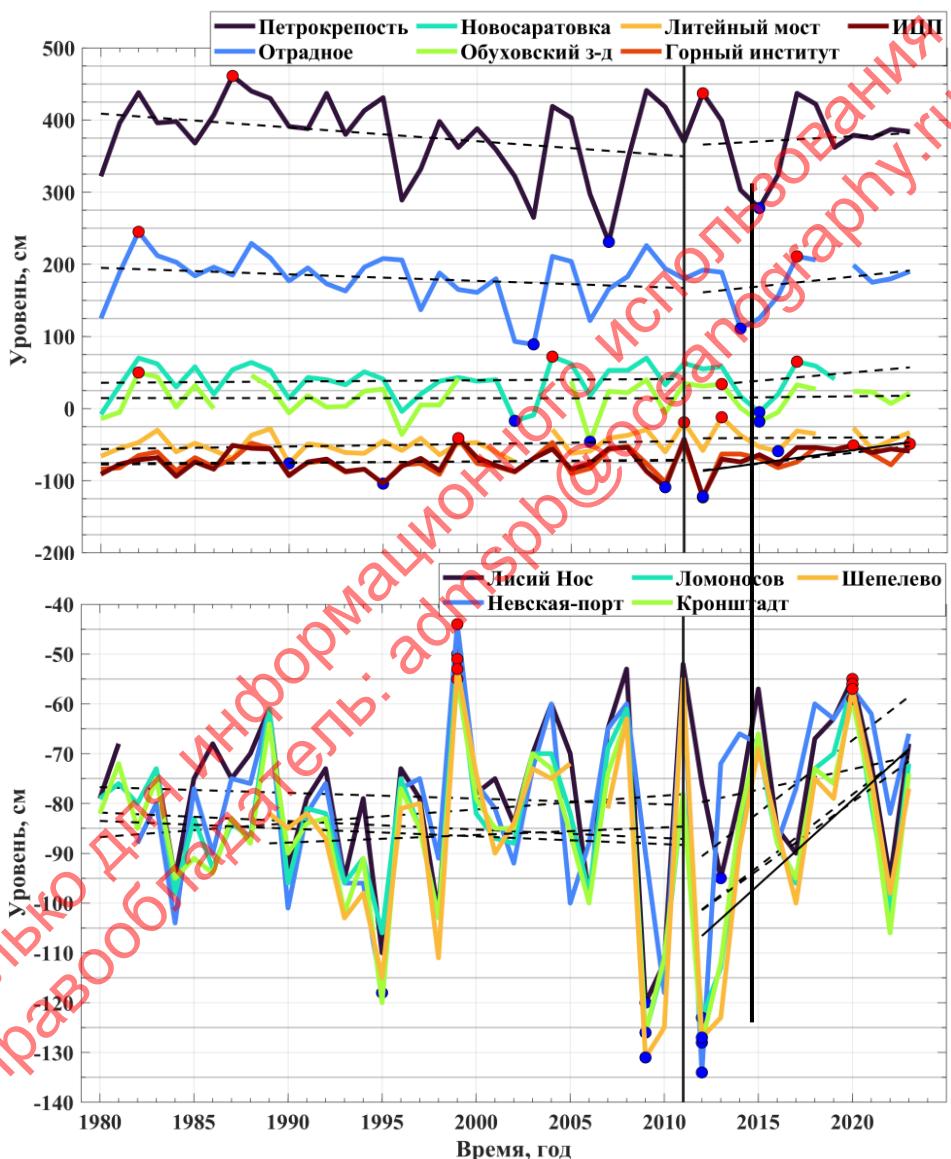


Рисунок 94. Временной ход годовых минимумов уровня моря в реке Неве и Невской губе за 1980-2023 гг.

Изменчивость годовых минимумов в Невской губе (Рисунок 94, нижний) описывается следующим образом. Минимальные значения уровня фиксируются в 1995, 1997, 2009 и 2011 гг. Абсолютная величина экстремума в заливе составляет около -130 см. Стандартное отклонение минимумов обычно составляет менее 20 см; общий же размах составляет до 70 см (Таблица 26). Последнее десятилетие отмечено тенденцией к последовательному повышению отметок годовых минимумов. Однако лишь на посту Шепелево был зафиксирован статистически значимый тренд величиной порядка +3 см/год.

Таблица 26. Статистические характеристики распределения годовых минимумов уровня воды в реке Неве и Невской губе за 1980-2011 гг. и 2012-2023 гг.

№	Станция	Период наблюдений	Минимум, см	Максимум, см	Размах, см	Среднее, см	СКО, см	Дисперсия, см ²
1	Петрокрепость	1980-2011 гг.	231	461	230	379	55,1	3039,6
		2012-2023 гг.	278	437	159	374	50,5	2551,2
2	Отрадное	1980-2011 гг.	89	245	156	181	36,1	1304,6
		2012-2023 гг.	111	211	100	176	32,4	1051,8
3	Новосаратовка	1980-2011 гг.	-17	72	89	38	24,2	584,1
		2012-2023 гг.	-5	65	70	42	25,2	636,3
4	Обуховский з-д	1980-2011 гг.	-46	50	96	15	24,2	585,1
		2012-2023 гг.	-18	34	52	16	17,3	301,0
5	Литейный мост	1980-2011 гг.	-76	-19	57	-51	14,5	209,1
		2012-2023 гг.	-59	-12	47	-40	15,0	224,1
6	Горный институт	1980-2011 гг.	-104	-42	62	-74	16,3	264,5
		2012-2023 гг.	-123	-49	74	-70	20,4	415,1
7	ИЦП	1980-2011 гг.	-109	-41	68	-74	16,8	282,5
		2012-2023 гг.	-122	-51	71	-67	19,3	373,2
8	Невская-порт	1980-2011 гг.	-118	-44	74	-82	17,4	301,6
		2012-2023 гг.	-134	-57	77	-75	20,9	434,8
9	Лисий Нос	1980-2011 гг.	-120	-50	70	-79	17,5	305,2
		2012-2023 гг.	-95	-55	40	-75	13,9	193,8
10	Ломоносов	1980-2011 гг.	-126	-51	75	-84	15,4	237,4
		2012-2023 гг.	-123	-56	67	-85	19,9	394,4
11	Кронштадт	1980-2011 гг.	-126	-55	71	-86	15,5	239,8
		2012-2023 гг.	-128	-59	69	-87	20,3	412,5
12	Шепелево	1989-2011 гг.	-131	-53	78	-86	20,5	418,6
		2012-2023 гг.	-127	-57	70	-88	21,0	442,0

На Рисунок 95 приводится конечно-интегральная кривая, описывающая поведение годовых минимумов уровня воды за 1980-2023 гг. Для верхней половины русла Невы (Петрокрепость, Отрадное) отмечается накопление положительных аномалий уровня в 1980-1995 гг., сменившееся обратной тенденцией, продолжающейся по настоящий момент (2023 г.). Во второй половине русла Невы изменения уровня имели более сложный характер: в 1980-1989 гг. происходило накопление положительных аномалий, после чего с 1989 по 2002-2006 гг. регистрировалась противоположная ситуация, вновь сменившаяся положительным приростом аномалий до конца периода наблюдений. Для акватории Невской губы временной ход минимумов уровня имел следующую картину: в 1980-2012-2013 гг. отмечалась повышенная повторяемость отрицательных аномалий экстремумов, прерываемая периодом 1998-2008 гг. с обратной тенденцией. С начала же 2010-х гг. вновь прослеживается увеличение вероятности положительных аномалий минимумов уровня.

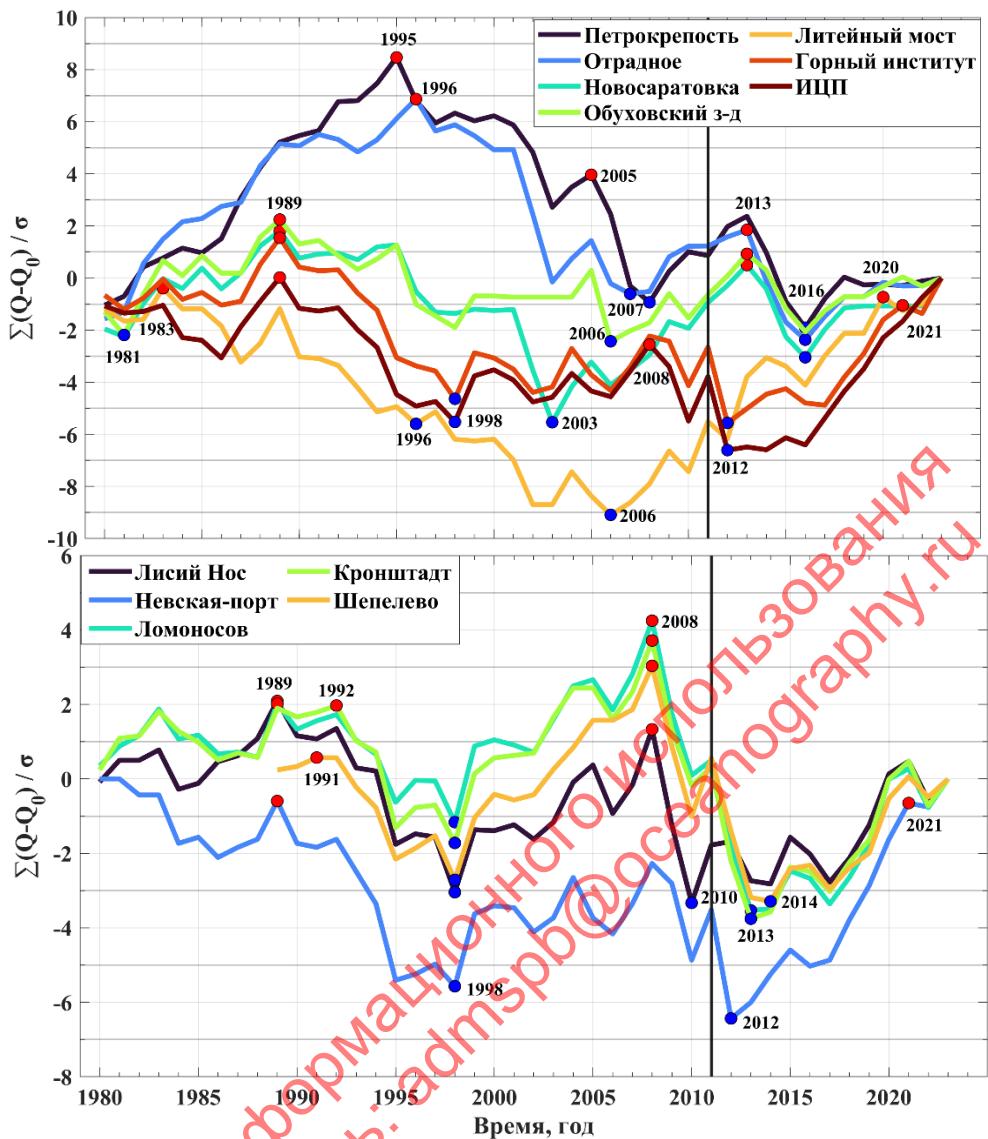


Рисунок 95. Конечно-интегральная кривая изменчивости годовых минимумов уровня воды в реке Неве и Невской губе за 1980-2023 гг.

Для оценки минимумов уровня воды с заданной обеспеченностью было применено теоретическое распределение Пирсона III типа, показавшее хорошие результаты в сравнении с эмпирическими данными (Рисунок 96). Полученные по данным распределения характерные значения были приведены в таблице вместе с коэффициентами асимметрии и вариации (Таблица 27). Результаты расчётов установили небольшое снижение абсолютной величины минимумов уровня в последнее десятилетие для большей части станций. Исключения из этой тенденции составляют пункты Петрокрепость, Отрадное, Ломоносов, Кронштадт и Шепелево.

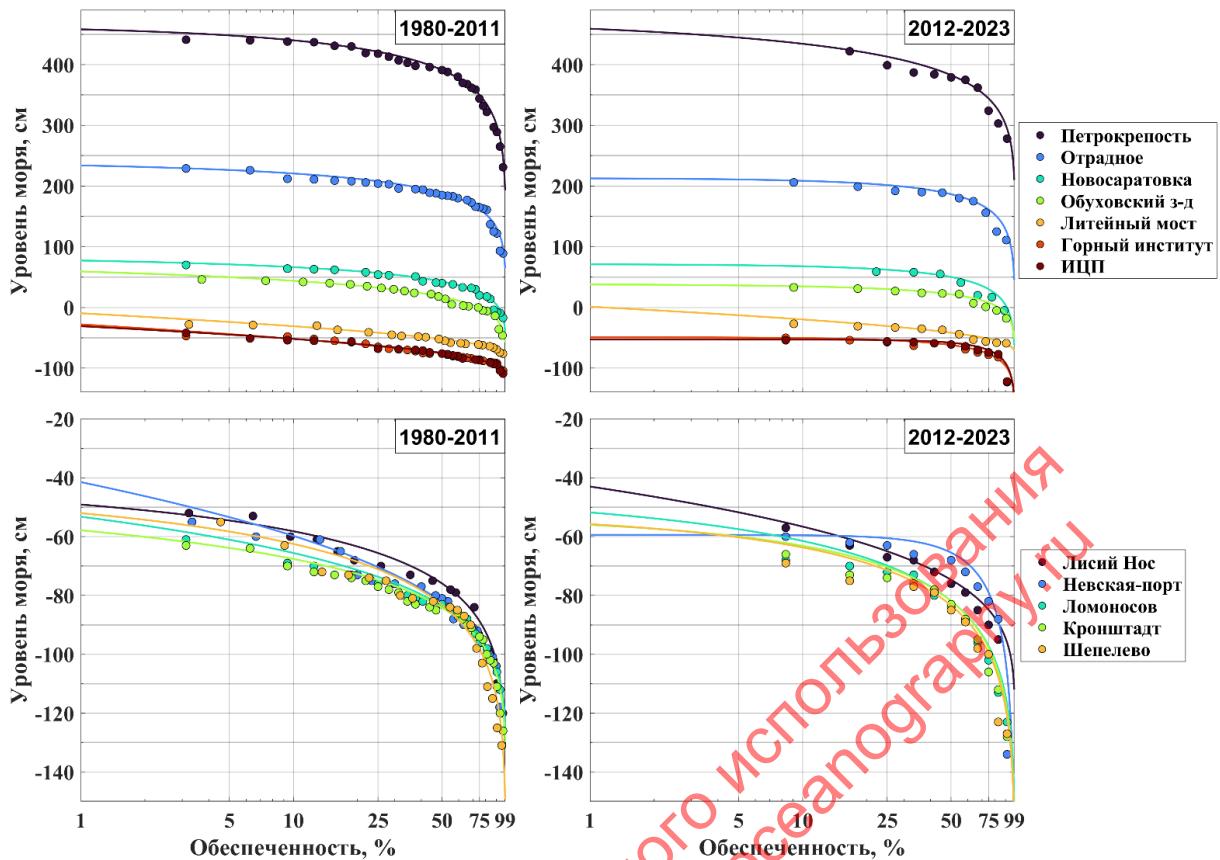


Рисунок 96. Сравнение теоретического распределения годовых минимумов уровня воды в реке Неве и Невской губе с эмпирическими данными, полученными за период 1980-2023 гг.

Таблица 27. Статистические характеристики распределения минимальных значений уровня воды в реке Неве и Невской губе за период 1980-2023 гг.

№	Станция	Период	Cs	Cv	75%	80%	85%	90%	95%	97%	99%
1	Петропавловская крепость	1980-2011	-0,96	0,15	350,1	338,1	323	302,6	269	245,1	195,3
		2012-2023	-0,62	0,14	344,2	333,3	320	302,1	273,4	253,4	212,2
2	Отрадное	1980-2011	-0,98	0,20	161,9	154,3	144,9	132,2	111,4	96,7	66,2
		2012-2023	-1,14	0,18	161,4	153,5	143,2	128,8	104,2	86,2	47,5
3	Новосаратовка	1980-2011	-0,75	0,63	24,8	19,7	13,4	5,0	-8,6	-18,2	-37,8
		2012-2023	-0,9	0,61	30,2	23,9	15,7	4,3	-15,2	-29,5	-60,1
4	Обуховский з-д	1980-2011	-0,66	1,69	-0,4	-5,3	-11,1	-18,9	-31,2	-39,6	-56,6
		2012-2023	-0,90	1,07	7,9	3,7	-1,7	-9,1	-21,7	-30,9	-50,3
5	Литейный мост	1980-2011	0,37	-0,29	-61,4	-63,5	-65,8	-68,6	-72,4	-74,6	-78,6
		2012-2023	0,34	-0,37	-51,6	-53,9	-56,5	-59,6	-64,0	-66,7	-71,5
6	Горный институт	1980-2011	0,33	-0,22	-86,0	-88,3	-90,9	-94,1	-98,4	-101	-105,5
		2012-2023	-1,93	-0,29	-76,4	-81,2	-87,3	-96,0	-111	-122,1	-146,1
7	ИЦП	1980-2011	0,14	-0,23	-86,2	-88,8	-91,8	-95,6	-101	-104,3	-110,5
		2012-2023	-2,44	-0,29	-70,4	-75,1	-81,7	-91,4	-109,2	-123	-153,7
8	Невская-порт	1980-2011	-0,64	-0,22	-88,7	-92,2	-96,6	-102,3	-111,6	-118	-131,1
		2012-2023	-0,12	-0,19	-84,8	-87,4	-90,5	-94,4	-100,2	-104,1	-111,6
9	Лисий Нос	1980-2011	-0,06	-0,21	-94,0	-96,9	-100,3	-104,6	-110,9	-115,1	-122,9
		2012-2023	-2,39	-0,28	-79,0	-84,1	-91,1	-101,6	-120,6	-135,3	-168
10	Ломоносов	1980-2011	-0,39	-0,18	-94,2	-97,0	-100,3	-104,7	-111,3	-115,7	-124,5
		2012-2023	-0,57	-0,23	-97,2	-101,5	-106,8	-113,9	-125,4	-133,4	-149,9
11	Кронштадт	1980-2011	-0,63	-0,18	-95,1	-98,1	-101,7	-106,5	-113,9	-119,1	-129,3
		2012-2023	-0,79	-0,23	-97,7	-102,3	-108	-115,8	-128,6	-137,7	-156,7
12	Шпелево	1989-2011	-0,62	-0,24	-98,2	-102,4	-107,5	-114,4	-125,3	-132,9	-148,5
		2012-2023	-0,75	-0,24	-99,5	-104,1	-109,9	-117,8	-130,5	-139,6	-158,4

Для анализа межгодовой изменчивости сезонного хода минимумов уровня воды в реке Неве были построены усиковые диаграммы (Рисунок 97). Согласно этим диаграммам, наименьшие значения экстремума приходились на осенне-зимний период, когда наблюдался наибольший размах колебаний. Это же время года было отмечено увеличением месячных значений минимума уровня воды в последнее десятилетие (2012-2023 гг.) по сравнению с прошлым тридцатилетием (1980-2011 гг.). На отдельных станциях (Новосаратовка, Обуховский завод) отмеченное увеличение отметок абсолютных минимумов может охватывать и начало весны. Наконец, в последнее время также фиксируется уменьшение общего размаха в колебаниях параметра.

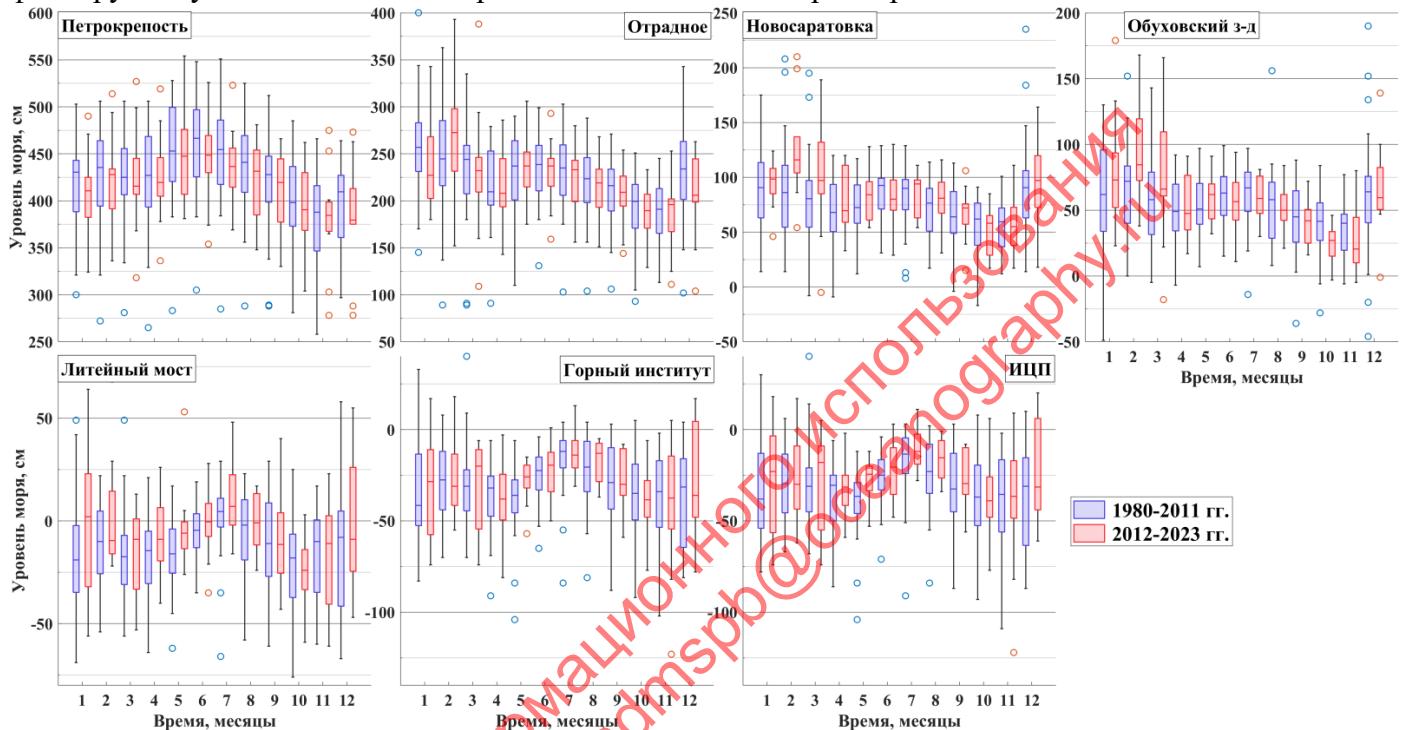


Рисунок 97. Диаграммы разброса минимального уровня воды за каждый месяц в реке Неве за 1980-2011 гг. и 2012-2023 гг.

Аналогичный анализ был проведён и для метеографных постов, расположенных в Невской губе (Рисунок 98). Данные усиковых диаграмм демонстрируют, что минимальные значения уровня моря соответствуют осенним и зимним месяцам. Наименьшие колебания экстремума уровня наблюдаются в летний сезон, а наибольшие – в холодный период. За последние годы минимумы уровня воды в Невской губе претерпевают некоторое снижение своих значений в осенне-зимний период, в то время как в остальное время года их отметки остаются либо неизменными, либо слегка повышенными.

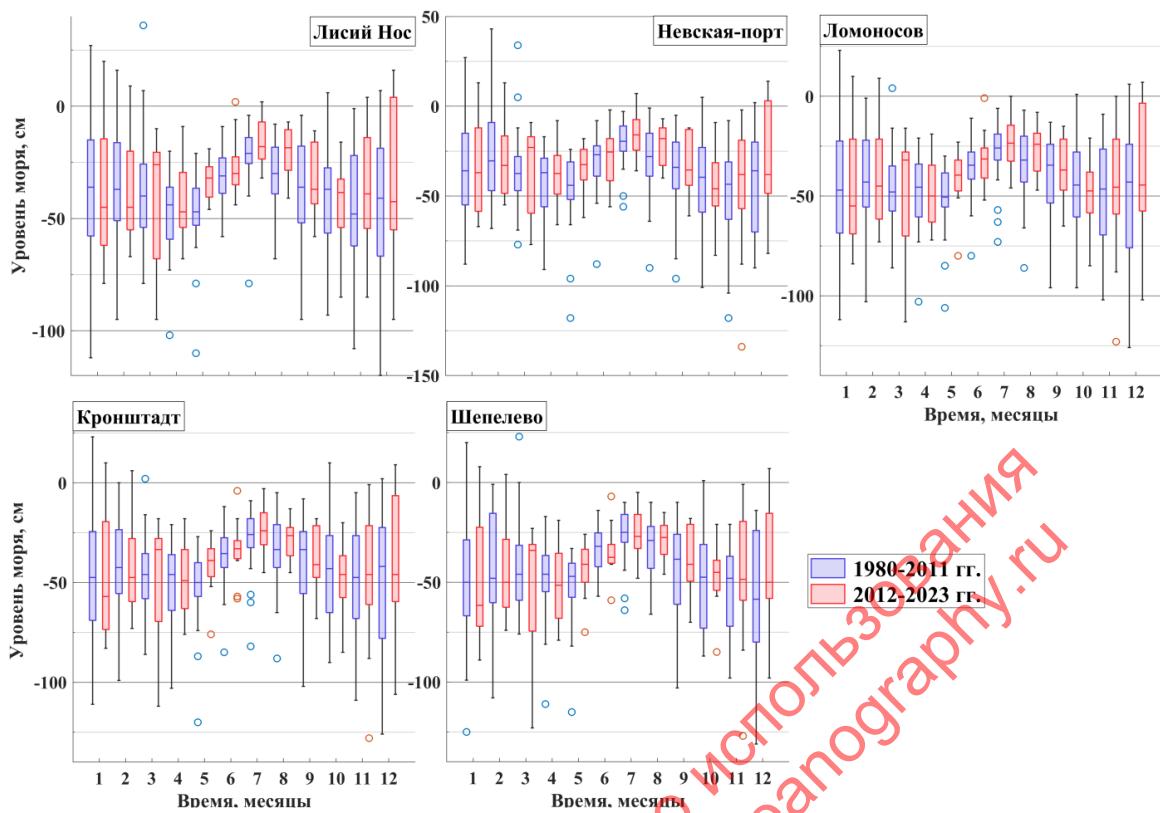


Рисунок 98. Диаграммы разброса минимального уровня воды за каждый месяц в Невской губе за 1980-2011 гг. и 2012-2023 гг.

Максимальные колебания уровня моря в реке Неве и Невской губе

На рисунке Рисунок 99 (верхний) проведён многолетний ход годовых максимумов уровня воды, наблюдаемых в реке Неве в 1980-2023 гг. В соответствии с графиками, в русле Невы можно выделить несколько выраженных максимумов уровня: 1982, 1987, 1992, 2005, 2011 и 2017 гг. Абсолютная отметка максимума уровня воды в русле Невы находятся в диапазоне от 630 см до 260 см в районе истока и устья реки, соответственно. Результаты статистического анализа (Таблица 28) показывают, что межгодовая изменчивость годового экстремума уровня постепенно снижается вниз по течению Невы: в зависимости от участка реки, среднее отклонение колебаний от нормы может составлять около 35-55 см, а общий размах - порядка 125-195 см. В последнее время (2012-2023 гг.) статистические параметры демонстрируют снижение величины годовых максимумов и их дисперсии по сравнению с предыдущим периодом наблюдений (1980-2011 гг.). Однако подтвердить статистическую значимость подобной тенденции не удалось.

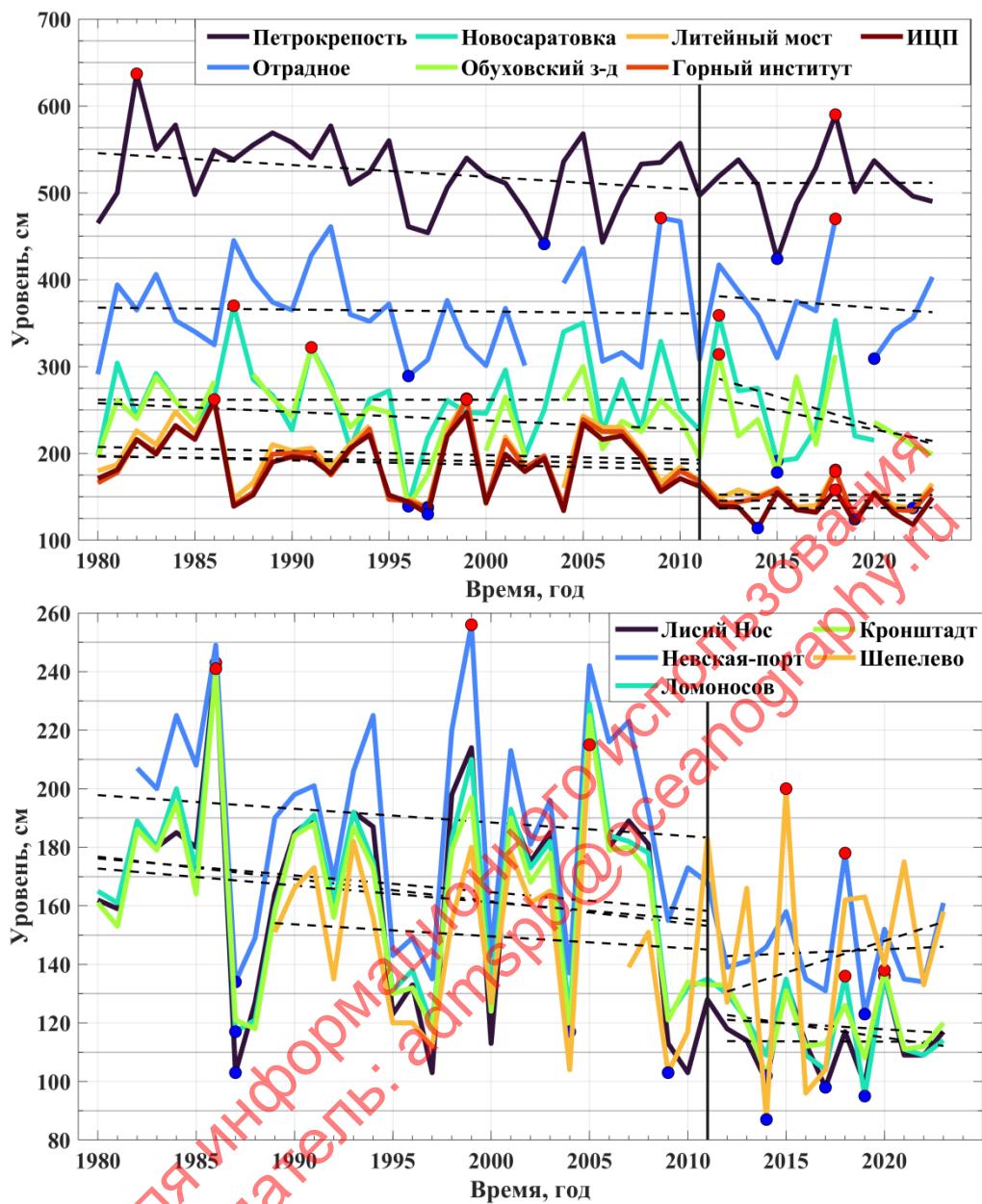


Рисунок 99. Временной ход годовых максимумов уровня моря в реке Неве и Невской губе за 1980-2023 гг.

Изменчивость годовых максимумов уровня моря в Невской губе в 1980-2023 гг. также представлена на рисунке Рисунок 99 (нижний). На метеографных записях локальные экстремумы уровня отмечаются в 1986, 1996, 2005, 2015 и 2018 гг. Абсолютный максимум за весь период наблюдений имеет величину около 250 см. С 1980 по 2011 гг. стандартное отклонение экстремума находилась в пределах 30-35 см, а размах составлял порядка 120-140 см. После 2012 г. стандартное отклонение экстремума на большинстве станций, за исключением Шепелево, снизилось почти в 2,5 раза, а общий размах параметра упал почти на 100 см. Причиной такого резкого снижения является открытие в августе 2011 года Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений, препятствующего проникновению в Невскую губу штормовых нагонов, приходящих из открытой части Финского залива. Тем не менее, анализ многолетних рядов годовых максимумов при заданном уровне точности (формула 2) не выявил статистически значимых трендов.

Таблица 28. Статистические характеристики распределения годовых максимумов уровня воды в реке Неве и Невской губе за 1980-2011 гг. и 2012-2023 гг.

№	Станция	Период наблюдений	Минимум, см	Максимум, см	Размах, см	Среднее, см	СКО, см	Дисперсия, см ²
1	Петропрость	1980-2011 гг.	441	637	196	525	44,2	1956,6
		2012-2023 гг.	424	590	166	511	39,2	1537,9
2	Отрадное	1980-2011 гг.	289	471	182	364	55,3	3059,8
		2012-2023 гг.	309	470	161	372	47	2208,7
3	Новосаратовка	1980-2011 гг.	140	370	230	262	48,9	2396
		2012-2023 гг.	191	359	168	264	58,3	3401,6
4	Обуховский з-д	1980-2011 гг.	139	322	183	242	39,8	1581,8
		2012-2023 гг.	178	314	136	239	46	2119
5	Литейный мост	1980-2011 гг.	138	263	125	200	35,2	1241,1
		2012-2023 гг.	137	181	44	152	13,6	186,0
6	Горный институт	1980-2011 гг.	137	262	125	192	35,5	1263,2
		2012-2023 гг.	124	179	55	146	15,4	236,1
7	ИЦП	1980-2011 гг.	130	262	132	189	34,5	1193,5
		2012-2023 гг.	114	158	44	137	14,9	222,4
8	Невская-порт	1980-2011 гг.	134	256	122	190	35,5	1263,7
		2012-2023 гг.	123	178	55	144	15,4	237,5
9	Лисий Нос	1980-2011 гг.	103	243	140	165	37,8	1427,4
		2012-2023 гг.	98	136	38	114	12,2	149,5
10	Ломоносов	1980-2011 гг.	117	241	124	167	32,7	1070,4
		2012-2023 гг.	95	136	41	117	13,9	192,6
11	Кронштадт	1980-2011 гг.	117	241	124	164	32	1021,3
		2012-2023 гг.	102	138	36	119	11,1	123,6
12	Шепелево	1989-2011 гг.	103	215	112	150	29,9	892,7
		2012-2023 гг.	87	200	113	143	34,4	1183,4

Закономерности временной изменчивости максимумов уровня в Неве и Невской губе в 1980-2023 гг. исследовались посредством анализа конечно-интегральной кривой (Рисунок 100). Поведение экстремума уровня воды в Неве описывалось, главным образом, приростом положительным аномалий в 1980-1995 гг., отрицательных аномалий в период с 1995 по 2003-2008 гг. и возобновлением первоначальной тенденции в последние десятилетия. Исключение из этого правила составили измерения в устьевой зоне, характеризующиеся преобладанием положительных аномалий экстремума в 1980-2008 гг. и отрицательных в 2008-2023 гг. Аналогичная ситуация отмечалась и для акватории Невской губы: повышенная вероятность высоких значений максимумов уровня до начала 2010-х, сменившаяся сниженной вероятностью в 2010-х - начале 2020-х гг. Лишь на станции Шепелево, расположенной за акваторией Невской губы, с 2017 года наблюдалось увеличение положительных отклонений в колебаниях максимумов уровня.

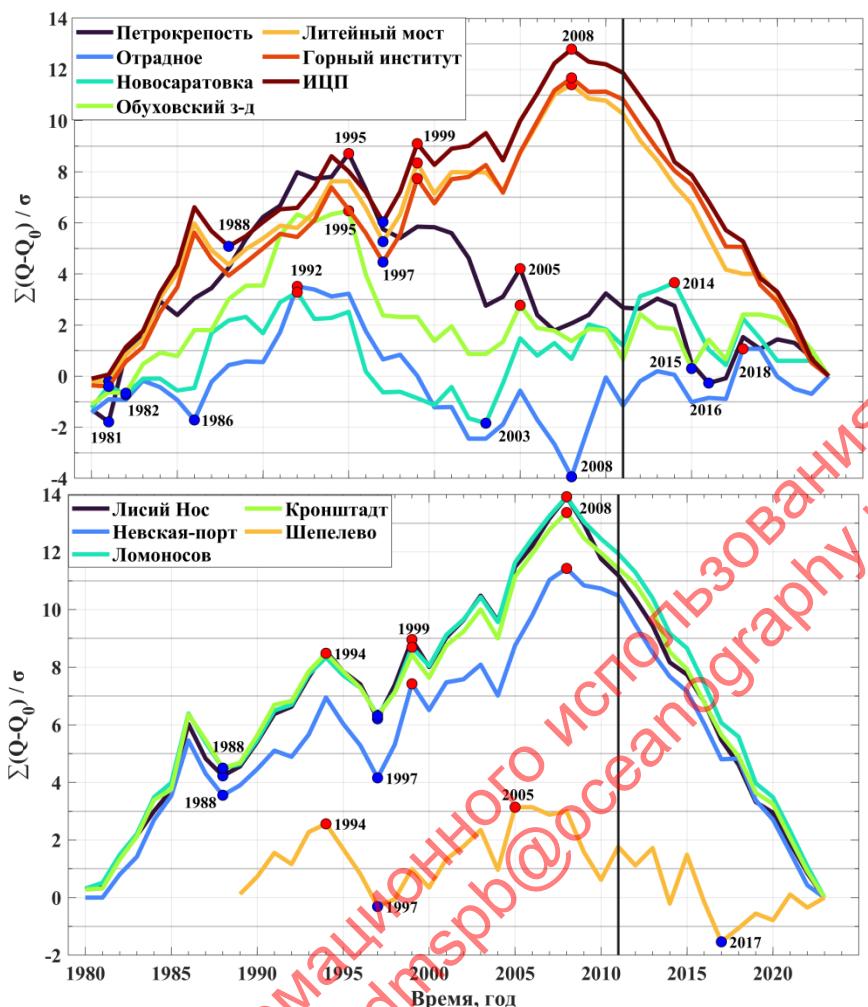


Рисунок 100. Конечно-интегральная кривая изменчивости годовых максимумов уровня воды в реке Неве и Невской губе за 1980-2023 гг.

Оценки максимумов уровня воды с заданной обеспеченностью были получены при помощи аппроксимации распределения кривой Пирсона III типа (Рисунок 101). Сравнительный анализ реального и теоретического распределения показал заметную недооценку (более 15-20 см) величины максимумов уровня воды в Неве для станций Петрокрепость и Отрадное, особенно с обеспеченностями менее 2 % в 1980-2011 гг. и менее 10% в 2012-2023 гг. Искажённые показания максимумов также прослеживаются и в распределениях максимального уровня для Невской губы. Здесь занижение экстремума уровня отчётливо проявляется в 1980-2011 гг. в диапазоне обеспеченности 10-15 %, становясь менее выраженным в последние десятилетия. Самая высокая неопределённость оценок теоретических максимумов (более 40 см) отмечается в пункте Шепелево в интервале обеспеченности менее 5% в 1980-2011 гг. и менее 15% в 2012-2023 гг. Рассчитанные значения потенциальных экстремумов уровня воды в районе исследования, а также статистики формы их эмпирического распределения приведены в таблице Таблица 29.

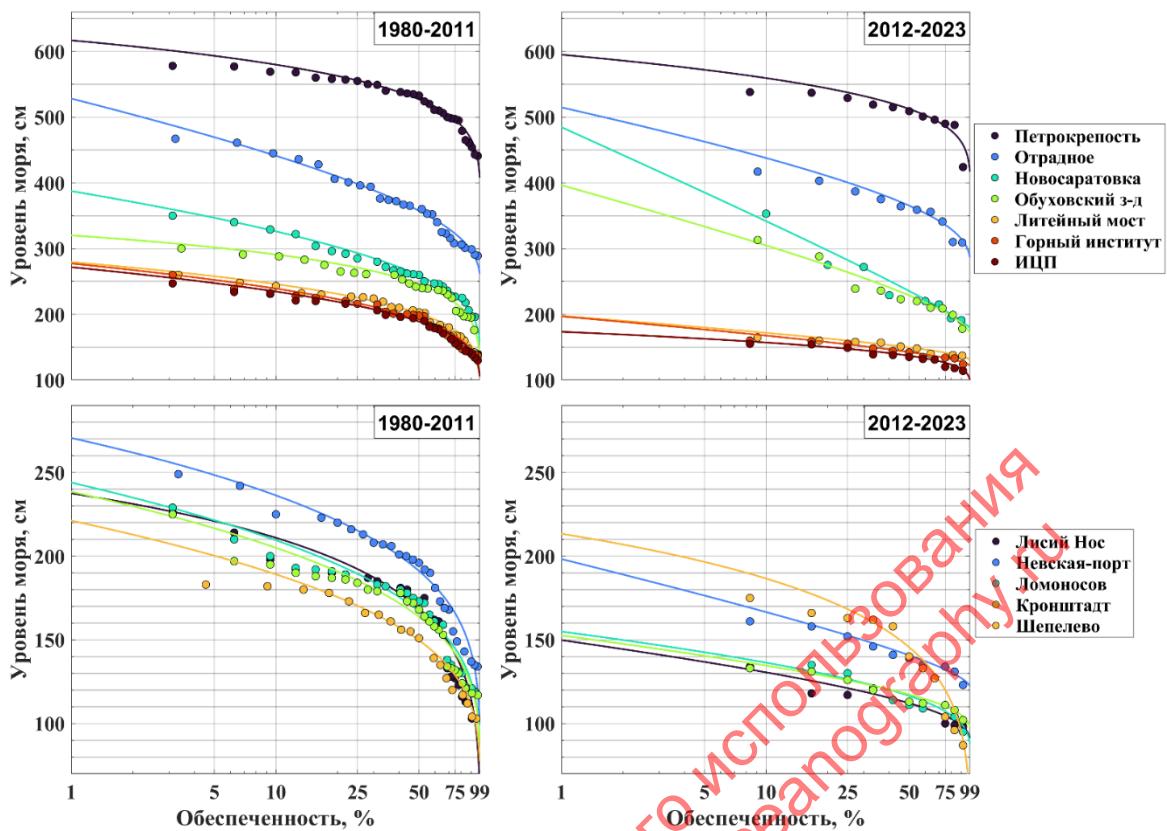


Рисунок 101. Сравнение теоретического распределения годовых минимумов уровня воды в реке Неве и Невской губе с эмпирическими данными, полученными за период 1980-2023 гг.

Таблица 29. Статистические характеристики распределения минимальных значений уровня воды в реке Неве и Невской губе за период 1980-2023 гг. (* указывает на высокую степень недостоверности)

№	Станция	Период	Cs	Cv	0,1%	1%	2%	5%	10%	15%	25%
1	Петрокрепость	1980-2011	-0,02	0,08	640,6*	616,7*	607,6*	593,2	579,8	570,3	555,8
		2012-2023	-0,30	0,08	619,6*	595,0*	585,9*	572,0*	559,3*	550,6	537,5
2	Отрадное	1980-2011	0,44	0,15	603,2*	528,1*	503,7*	469,4	441,1	423,2	398,4
		2012-2023	0,64	0,13	581,8*	514,7*	493,0*	462,6*	437,7*	422,1	400,5
3	Новосаратовка	1980-2011	0,09	0,19	436,2	387,4	370,8	346,7	326,1	312,6	293,2
		2012-2023	0,98	0,24	624,2	484,6	442,1	385,3	341,7	315,8	282,5
4	Обуховский з-д	1980-2011	-0,47	0,16	337,4	320,1	313,1	301,8	291,0	283,2	270,9
		2012-2023	0,74	0,19	481,7	396,4	369,7	333,4	304,8	287,3	264
5	Литейный мост	1980-2011	-0,10	0,18	302,5	279,5	271,0	257,9	245,9	237,7	225,3
		2012-2023	0,78	0,09	221,1	197,5	190,1	179,9	171,8	166,7	160
6	Горный институт	1980-2011	0,06	0,18	305,1	277,2	267,3	252,4	239,1	230,1	216,9
		2012-2023	0,81	0,11	223,8	196,9	188,4	176,8	167,5	161,9	154,3
7	ИЦП	1980-2011	0,04	0,18	298,8*	271,7*	262,0*	247,5*	234,6*	225,8	213
		2012-2023	-0,06	0,11	185,4*	173,4*	169,2*	162,7*	157,0*	153,2	147,5
8	Невская-порт	1980-2011	-0,21	0,23	252,8	237,5	231,2	220,9	211,0*	203,7	192,3
		2012-2023	0,59	0,11	166,5*	149,8*	144,4*	136,8*	130,5	126,6	121,1
9	Лисий Нос	1980-2011	-0,07	0,19	294,3*	270,6	261,9	248,5	236,3*	227,9*	215,3
		2012-2023	0,90	0,11	228,0*	198,2*	189,0*	176,4*	166,6*	160,6	152,6
10	Ломоносов	1980-2011	0,10	0,20	269,1	243,9	235,0	221,5	209,5*	201,4*	189,5
		2012-2023	0,19	0,12	169,9	154,9	149,9	142,5	136,3	132,3	126,5
11	Кронштадт	1980-2011	0,21	0,20	263,1*	238,5*	229,8*	216,6*	205,0*	197,1	185,5
		2012-2023	0,37	0,09	168,2	152,6	147,5	140,4	134,6	130,9	125,8
12	Шепелево	1989-2011	0,13	0,20	244,7*	221,2*	212,8*	200,3*	189,1*	181,6	170,4
		2012-2023	-0,21	0,24	229,5*	213,4*	206,9*	196,6*	186,6*	179,5	168,3

Для оценки сезонного хода максимумов уровня воды в русле реки Невы и его межгодовой изменчивости были построены соответствующие усиковые диаграммы (Рисунок 102). Результаты показали, что максимальные значения экстремума на большей части станций регистрировались в осенне-зимний период, отмеченный наибольшим разбросом данных. В то же время в истоке Невы абсолютный максимум уровня воды приходится на июнь месяц. Также за последнее десятилетие было установлено общее понижение верхней границы максимума уровня воды внутри года, особенно осенью и зимой в устьевой части реки. Лишь в предустьевой части Невы, на станции Новосаратовка, прослеживается рост годовых максимумов, регистрируемый с декабря по март.

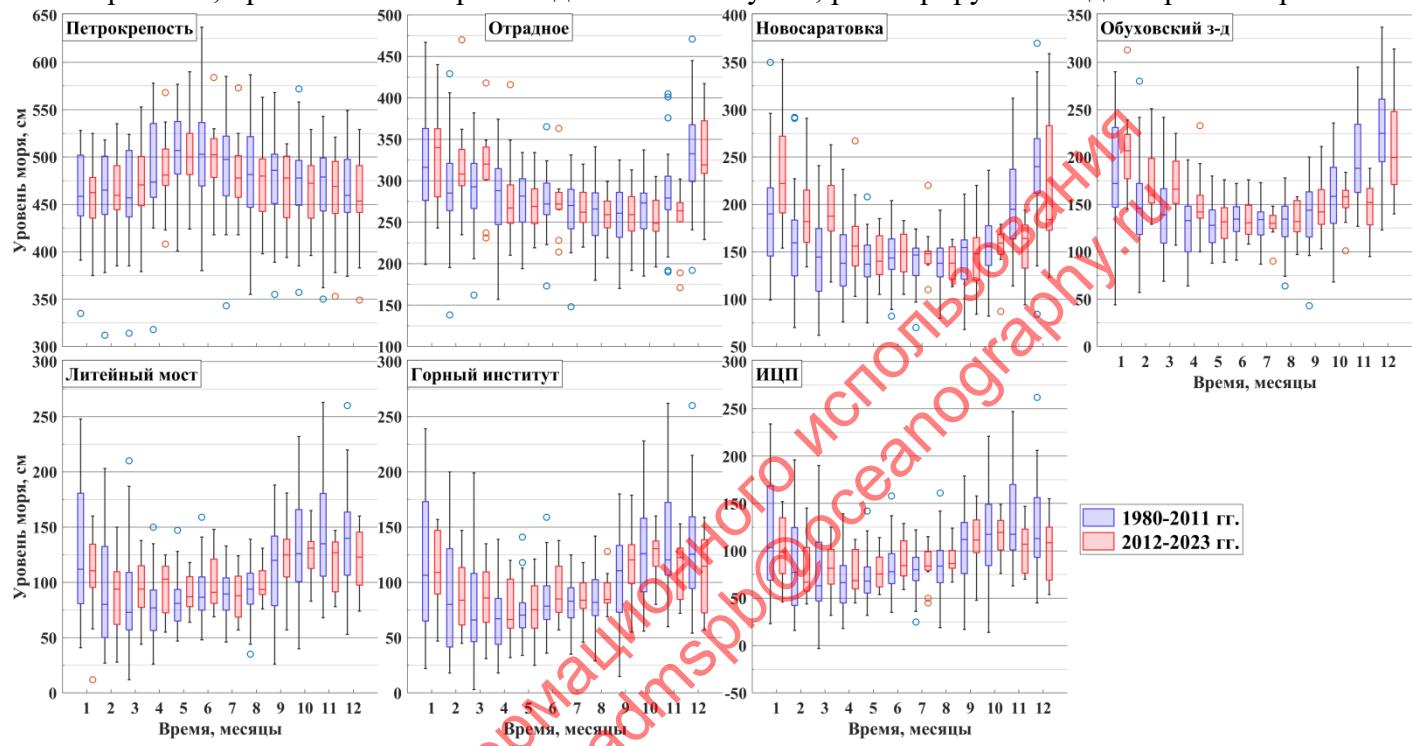


Рисунок 102. Диаграммы разброса максимального уровня воды за каждый месяц в реке Неве за 1980-2011 гг. и 2012-2023 гг.

Аналогичный анализ сезонного хода был проведён и для максимумов уровня в Невской губе (Рисунок 103). Согласно данным усиковых диаграмм, наибольшие значения уровня воды наблюдались также в осенние и зимние месяцы. Наибольший размах данных приходился на холодное время года, в то время как наименьшая вариабельность уровня моря был представлена в мае-августе. С конца 2011 года в акватории залива прослеживается падение абсолютных отметок экстремума и его дисперсии по сравнению с предыдущим тридцатилетием. Величина падения составила от первых десятков см весной-летом до более 100 см в осенне-зимний период. Причина такого резкого снижения максимумов уровня связана с вводом в 2011 году в эксплуатацию Комплекса защитных сооружений, препятствующего развитию штормовых нагонов в Невской губе. Только в пункте Шепелево, расположенном за периметром защитных сооружений, происходит повышение верхней отметки максимума уровня в сентябре, ноябре и декабре месяцах.

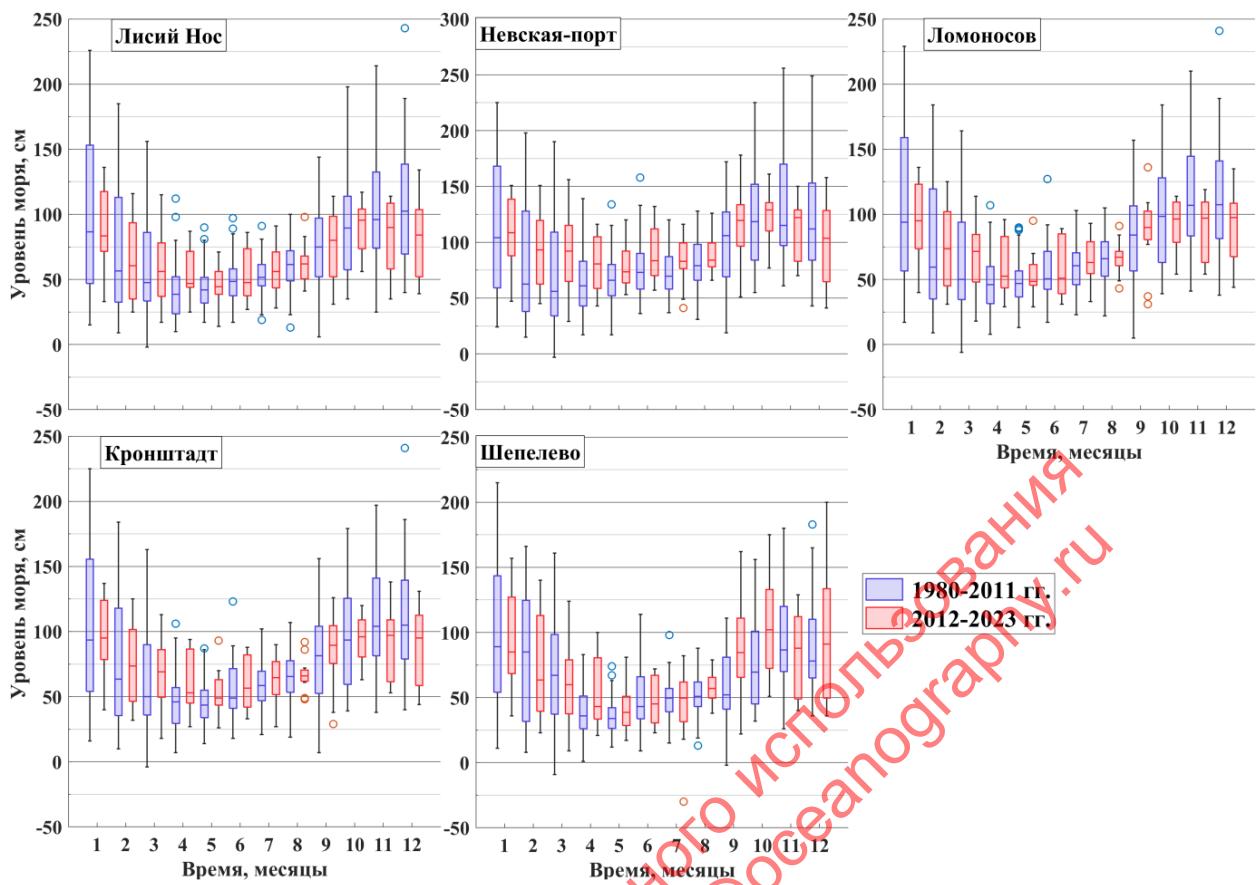


Рисунок 103. Диаграммы разброса максимального уровня воды за каждый месяц в Невской губе за 1980-2011 гг. и 2012-2023 гг.

3. ОПИСАНИЕ ОБЩЕЙ АРХИТЕКТУРЫ МОДЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА, ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ И ОСНОВНЫХ ВИДОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПРОДУКЦИИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВЕННОГО РЕЖИМА В ПРЕДЕЛАХ УСТЬЕВОГО ВЗМОРЬЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЯХ: ПРИ НАЛИЧИИ/ОТСУТСТВИИ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ; ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ; ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЛИЧИНАХ ПОСТУПАЮЩЕГО СТОКА РЕКИ. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ.

3.1. Данные и методы.

Для моделирования динамики вод, в том числе и 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 [120–122].

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 предназначено для численных моделей [123].

В INMOM включена модель термодинамики морского льда, состоящая из 3-х модулей. Модуль термодинамики [123] 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 [123]. Модуль переноса льда служит для расчёта эволюции ледяного и снежного покровов вследствие дрейфа, для чего используется монотонная схема переноса [123], 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 104). 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.

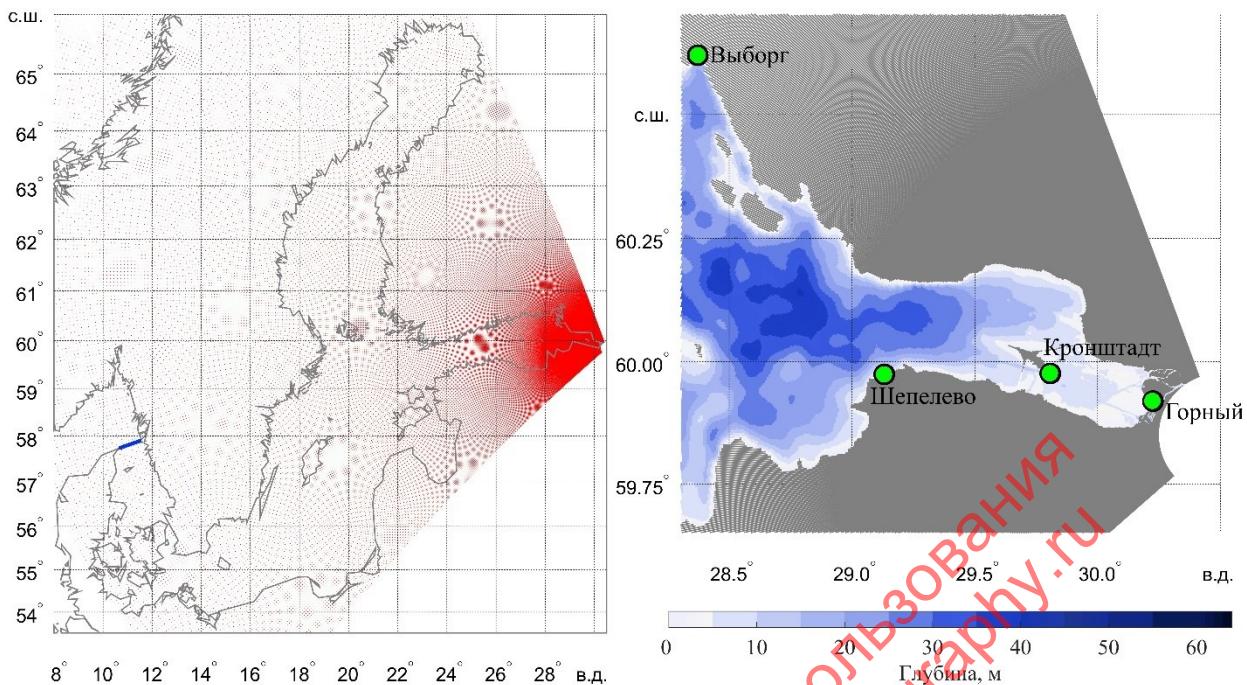


Рисунок 104 - Криволинейная сетка гидродинамической модели Балтийского моря с полюсом в Санкт-Петербурге, синей линией в Каттегате обозначена жидкая граница (а). Укрупнённый район модельной области восточной части Финского залива с Невской губой (б).

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.

После создания расчетной области была сделана маска суши/море (Рисунок 105-Рисунок 106). Маска суши/море использовалась в нескольких вариантах: (Рисунок 106а береговая линия современная до намывов Рисунок 106б) береговая линия с учетом намыва. Также береговая линия использовалась в модели Рисунок 106а) без дамбы и намывов на момент 1980г, Рисунок 106б) дамба и береговая линия с учетом намыва.

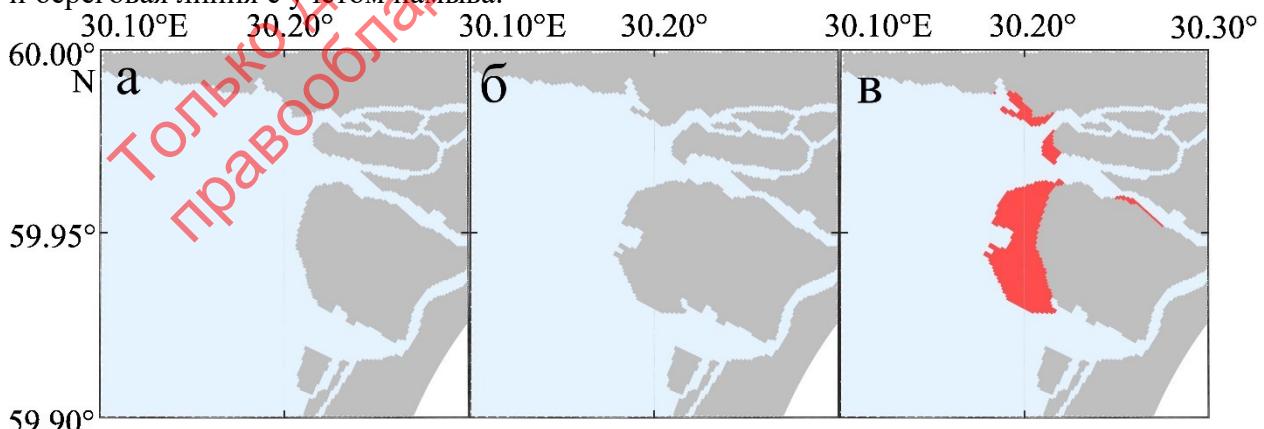


Рисунок 105. Маски сеточной области без учета намывных территорий (а), с учетом намывных территорий (б) и их разница (в).

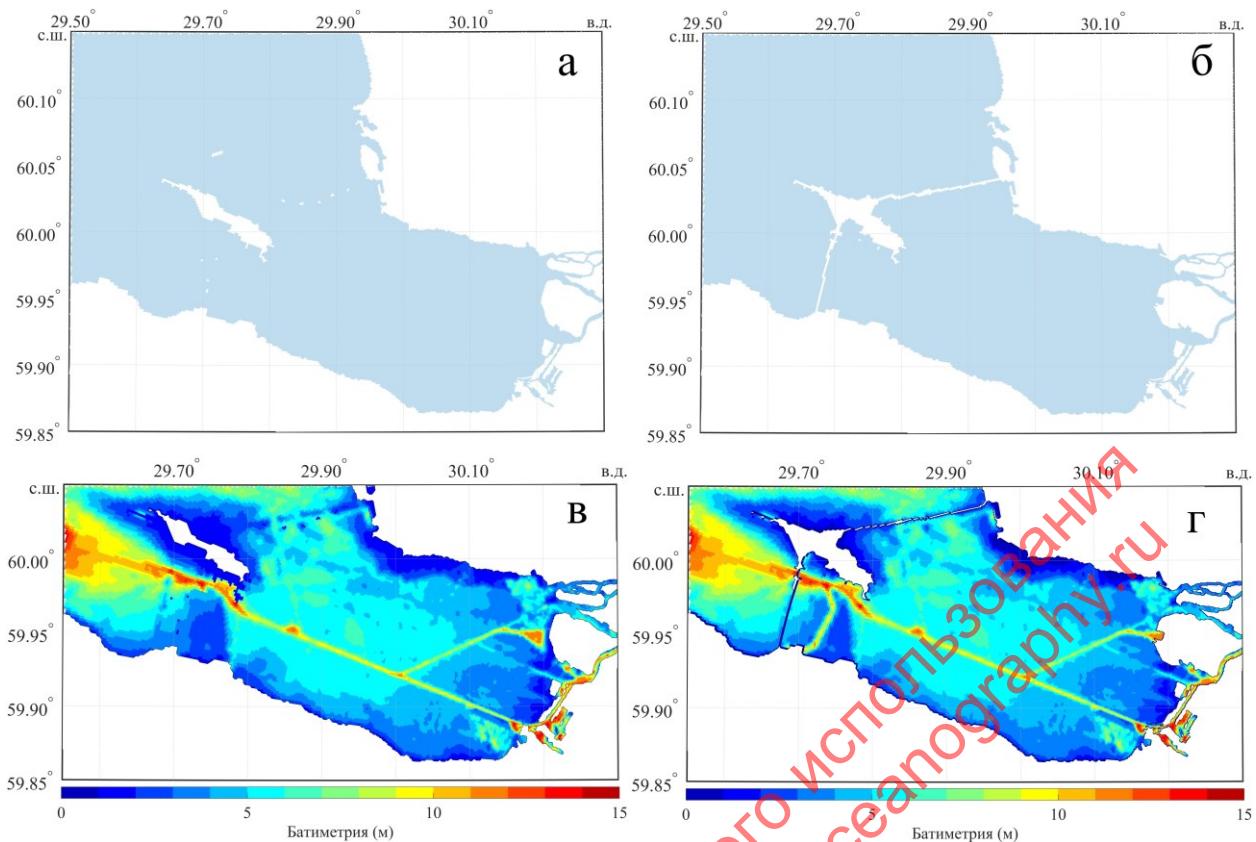


Рисунок 106. Маски сеточной области без учета намывных территорий и дамбы (1980г) (а), с учетом намывных территорий и дамбы (б), а также батиметрия без учета намывных территорий и КЗС (в) и с учетом (г)

Для проведения численных экспериментов, целью которых было оценить изменения гидрологических условий в Невской губе в условиях работающей дамбы и отсутствия дамбы, использовались следующие сценарии:

- 1 Расчет наводненческой ситуации 2019 г с современной береговой линией и открытой дамбой.
- 2 Расчет наводненческой ситуации 2019 г с современной береговой линией и закрытой дамбой.
- 3 Расчет наводненческой ситуации 2019 г с береговой линией 1980 г и отсутствующей дамбой.

Для проведения численных экспериментов, целью которых было оценить влияние намывных территорий на динамику вод в Невской акватории, использовались следующие сценарии:

Расчет наводненческой ситуации 2015г, береговая линия без намыва

Расчет наводненческой ситуации 2015г, береговая линия с намывом,

Для проведения численных экспериментов, целью которых было оценить изменения гидрологических условий в Невской губе при разных скоростях проходящего циклона в условиях работающей дамбы, использовались следующие сценарии:

1. Береговая линия с намывом, расход Невы 3000 м³/с, скорость циклона 2 м/с, максимальная скорость ветра 22 м/с.
2. Береговая линия с намывом, скорость циклона 5 м/с, максимальная скорость ветра 22 м/с.
3. Береговая линия с намывом, скорость циклона 11 м/с, максимальная скорость ветра 22 м/с.

4. Береговая линия с намывом, скорость циклона 15 м/с, максимальная скорость ветра 22 м/с.
5. Береговая линия с намывом, расход Невы 3000 м³/с, скорость циклона 20 м/с, максимальная скорость ветра 22 м/с.
6. Береговая линия с намывом, расход Невы 3000 м³/с, скорость циклона 26 м/с, максимальная скорость ветра 22 м/с.

3.2. Начальные и граничные условия

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

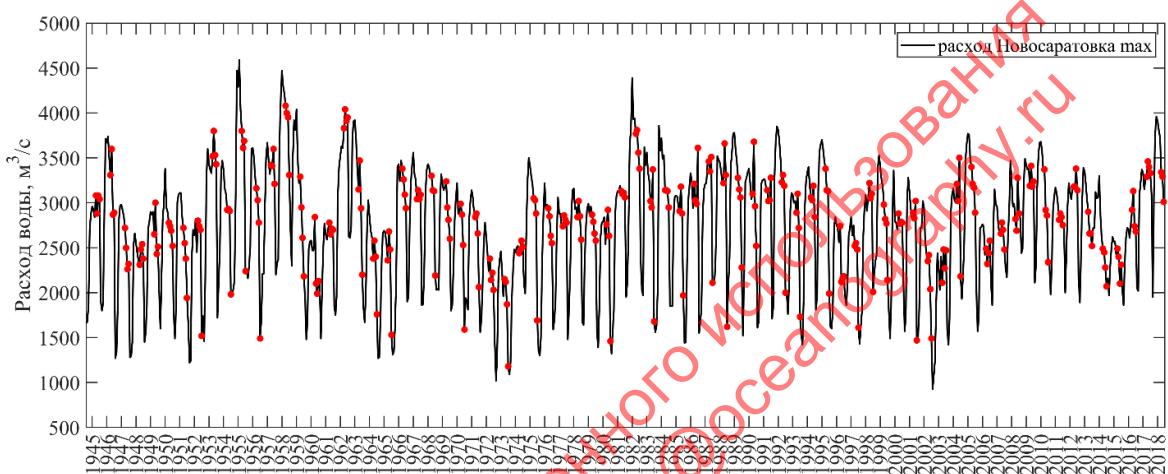


Рисунок 107 - Максимальные месячные расходы реки Невы в п. Новосаратовка с 1945 по 2018 гг. Красными точками обозначены осенне-зимние месяцы.

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 и 2019 года (см. вариант 1, Таблица 30), а также при максимальном среднем расходе Невы за осенне-зимний период в декабре (см. вариант 2, Таблица 30).

Таблица 30 - Используемые в экспериментах значения среднего расхода воды р. Нева за каждый месяц (м³/с).

	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сен.	Окт.	Ноя.	Дек.
2015	730	1760	2030	2250	2460	2450	2340	2260	2170	2080	1940	2000 (1 вариант) или 4080 (2 вариант)
2019	1600	1830	2300	2850	2930	2860	2740	2570	2440	2360	2400	2540

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 108, Таблица 31).

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.

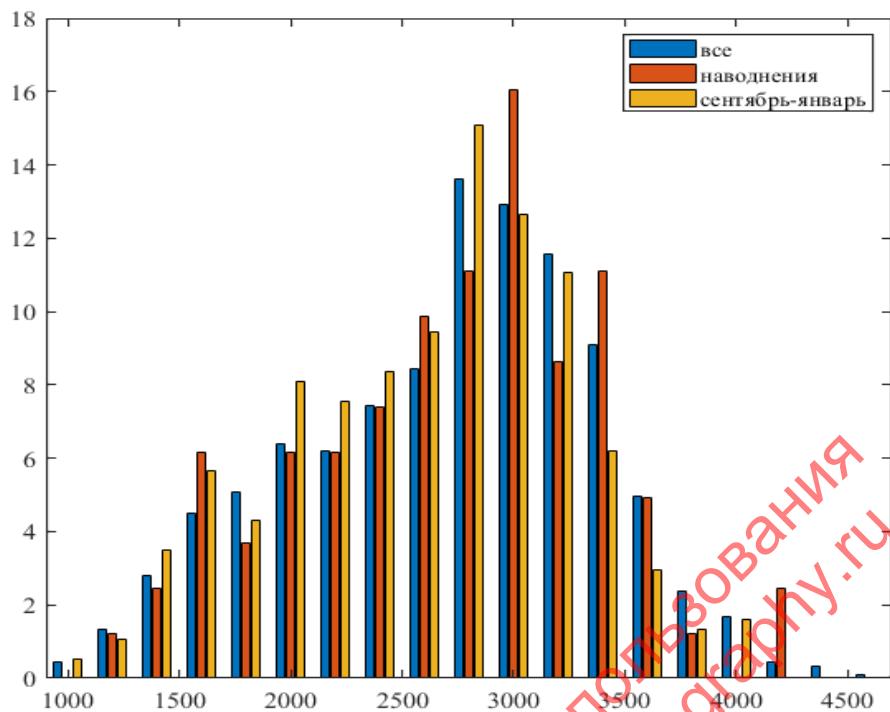


Рисунок 108 - Гистограмма расхода р. Невы в разные периоды. Синий цвет – все время наблюдений, красный – в период наводнений в Санкт-Петербурге, оранжевый – в осенне – зимний период.

Таблица 31 - 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

Расход рек, как граничное условие, вносит свой вклад в распределение солености 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. Так как, весь 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.

В качестве начальных условий используются среднемесячные данные температуры и солености воды за 2015г или 2019г с вертикальным разрешением 5 м и пространственным разрешением 3.7 км, полученные из системы «Copernicus Marine environment monitoring service» (<http://marine.copernicus.eu> (дата обращения: 18.11.2024)).

На жидкой границе в проливе Каттегат вдоль 57°44' с.ш. в буферной зоне, представляющей собой полосу шириной 15 км, значения температуры и солености принимались равными месячным средним значениям 2015 или 2019г.

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 некоторых расчетных сценариях использовались сгенерированные циклоны (Рисунок 109), проходящие над Балтийским морем. Скорости прохождения циклонов

варьировались от 2 до 26 м/с, а скорости ветра внутри циклонов достигали 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 [124]:

$$P_a = P_\infty - \frac{\Delta P}{\sqrt{1 + (r/r_t)^2}} \quad (9)$$

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, описанной в работе [124]:

$$\begin{aligned} W_x &= -\frac{K}{\rho_a f} \left[\frac{\partial P_a}{\partial y} \cos \beta + \frac{\partial P_a}{\partial x} \sin \beta \right] \\ W_y &= \frac{K}{\rho_a f} \left[\frac{\partial P_a}{\partial x} \cos \beta - \frac{\partial P_a}{\partial y} \sin \beta \right] \end{aligned} \quad (10)$$

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 (150°).

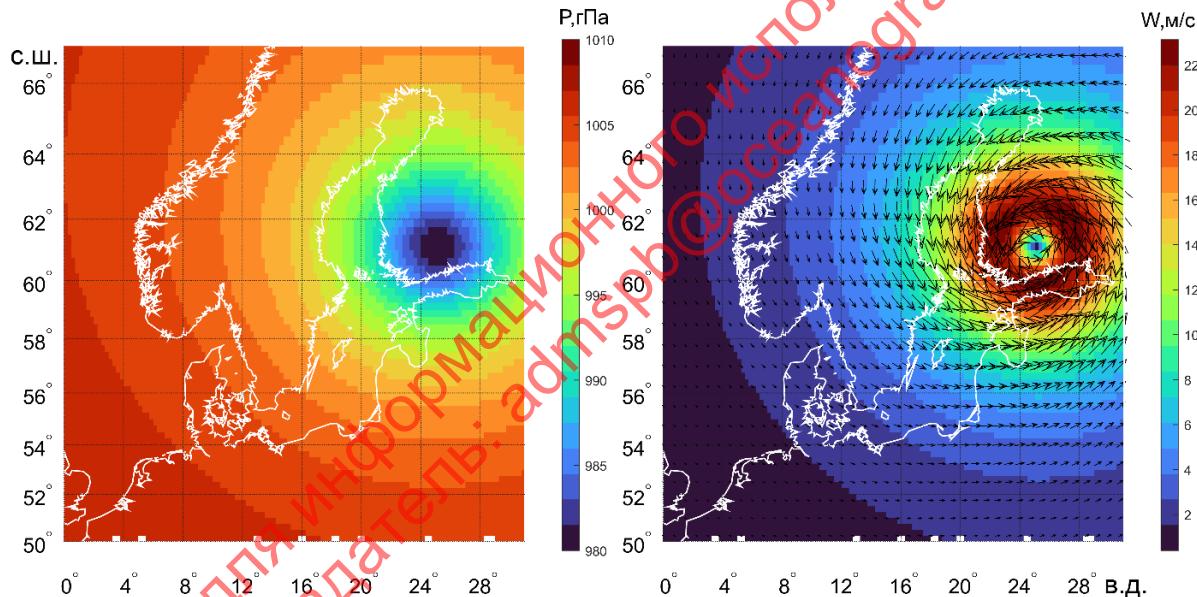


Рисунок 109 - Прохождение сгенерированного циклона над акваторией Балтийского моря.

При моделировании наводнения 2015г. и 2019г. в качестве форсинга использовался реанализ ERA5 [125]. 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 0.25оx0.25о, времененная дискретность – 3 часа.

На жидкой границе расчетной области были заданы ежечасные значения уровня моря, полученные со станций Смоген и Скаген при моделировании наводнения 2015 и 2019г. Данные инструментальных измерений уровня моря интерполировались в точки сетки буферной зоны вдоль всей жидкой границы. Для скорости течений здесь применялось условие протекания.

Для проверки качества модели был рассчитан 2019 год, результаты расчетов выдавались каждый час. Далее представлено (Рисунок 110) сравнение центрированных рядов уровня в пунктах Горный, Кронштадт, Шепелево и Выборг, рассчитанных по модели и измеренных на станциях.

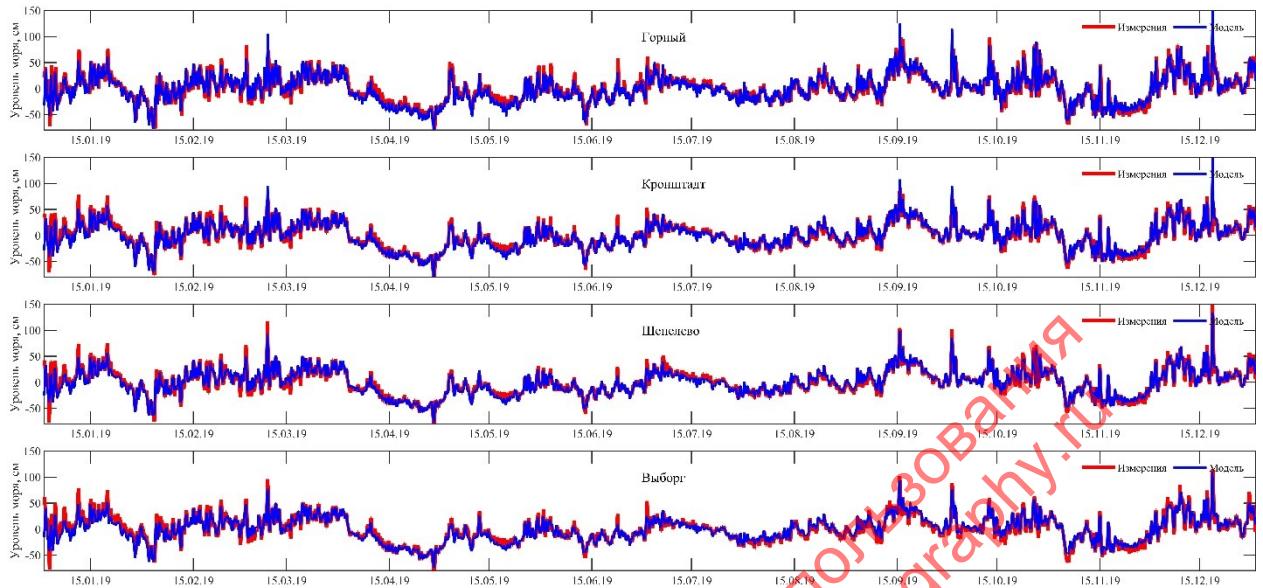


Рисунок 110. Ход уровня на станциях и рассчитанные по модели в акватории Финского залива.

Далее для сравнения представлен квантильный анализ рядов уровня (Рисунок 111 - Рисунок 114) измеренных и рассчитанных значений для каждой станции.

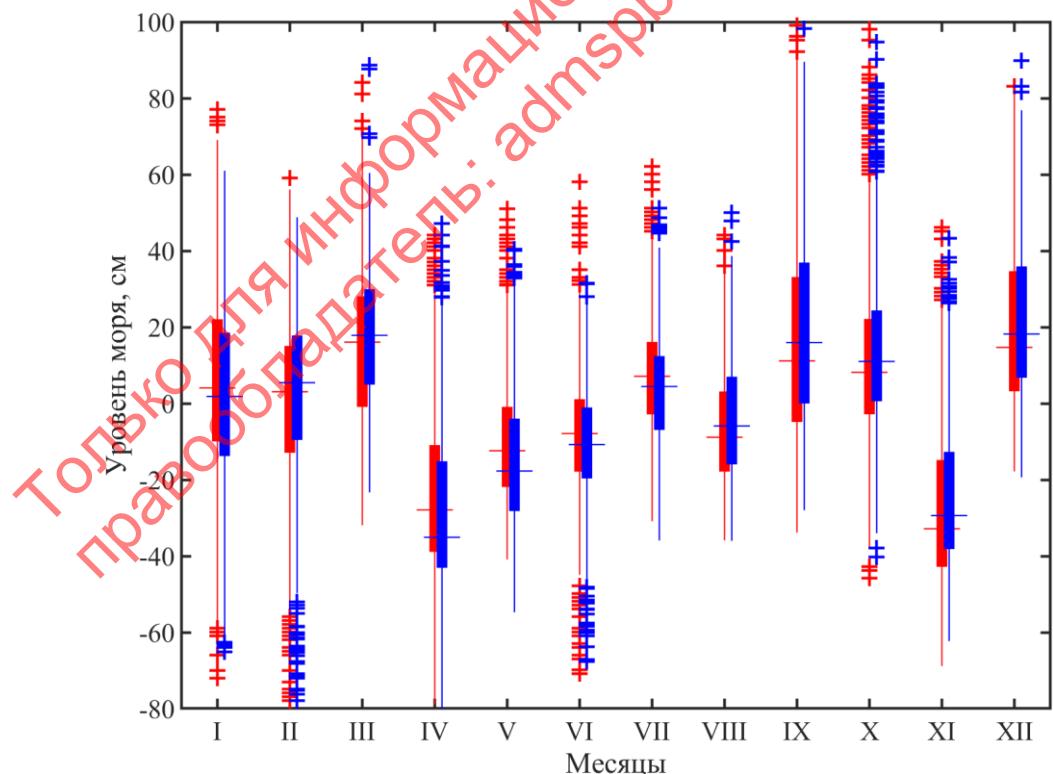


Рисунок 111. Квантильный анализ рядов уровня для измеренных (красный цвет) и рассчитанных по модели (синий цвет) значений на станции Горный.

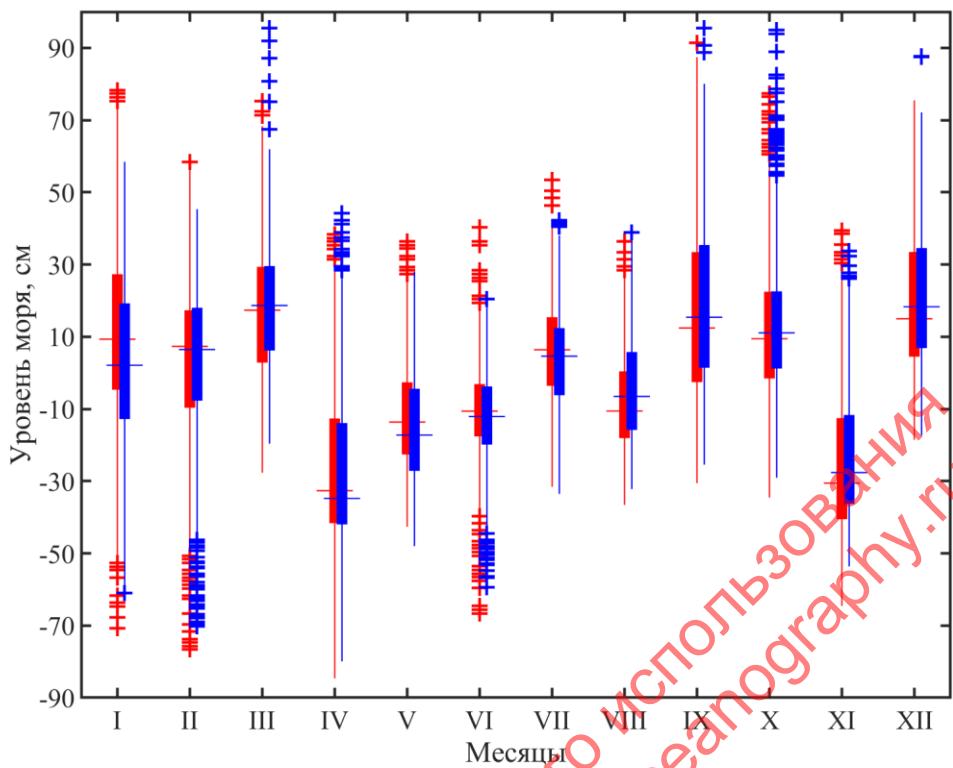


Рисунок 112. Квантильный анализ рядов уровня для измеренных (красный цвет) и рассчитанных по модели (синий цвет) значений на станции Кронштадт.

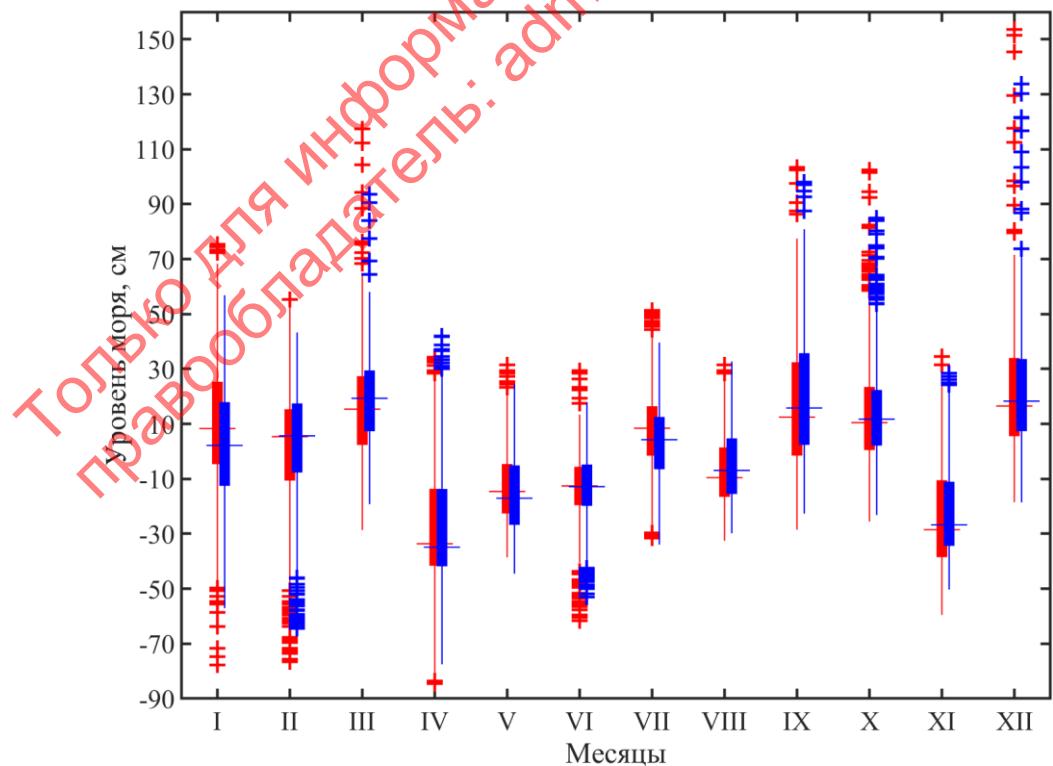


Рисунок 113. Квантильный анализ рядов уровня для измеренных (красный цвет) и рассчитанных по модели (синий цвет) значений на станции Шепелево.

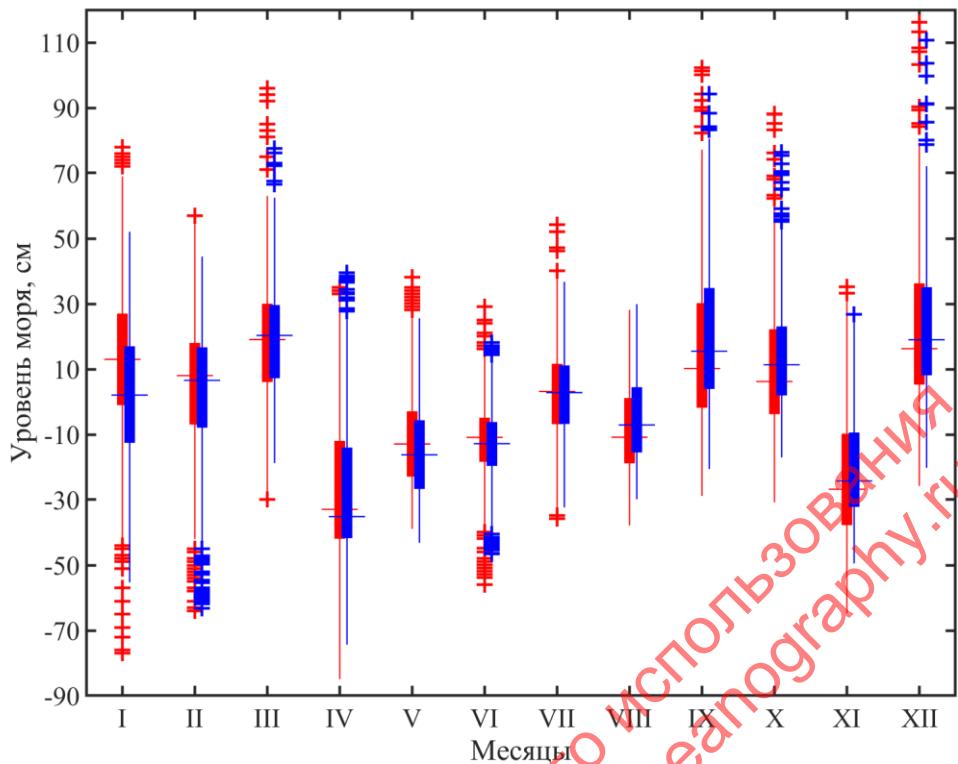


Рисунок 114. Квантильный анализ рядов уровня для измеренных (красный цвет) и рассчитанных по модели (синий цвет) значений на станции Выборг.

В таблице (Таблица 32), представлены статистические характеристики измеренных и рассчитанных значений уровня моря в береговых пунктах невской акватории.

Таблица 32 - Проверка качества модели по 4 пунктам береговых измерений.

Станция	Тип данных	Мин., см	Макс., см	СКО, см	Абс.ошиб., см	Отн.ошиб., %	Ср.кв. ошиб. модели	СКО модели /СКО исх*100%	<=0.674 *sig	r
Горный	Исходные	-78.9	99.1	25.5	8.3	4.7	11.3	44.4	90.1	0.91
	Модель	-84.8	188.1	26.3						
Кронштадт	Исходные	-84.6	91.4	24.9	5.3	3.0	7.6	30.6	97.8	0.95
	Модель	-79.9	150.8	24.8						
Шепелево	Исходные	-84.6	153.5	24.7	5.0	2.1	6.7	27.2	97.9	0.96
	Модель	-77.5	133.7	24.0						
Выборг	Исходные	-84.9	116.3	24.7	5.4	2.7	7.1	28.8	98.0	0.96
	Модель	-74.3	110.8	23.3						

Данный анализ показывает, что гидродинамическая модель INMOM достаточно качественно воспроизводит динамику вод в Невской акватории, описывает более 90 % всех колебаний уровня и подходит для анализа уровня и течений в условиях работы дамбы, а также влияния защитных

сооружений на акваторию невской губы и города Санкт-Петербурга. Расхождения между рассчитанными и измеренными данными уровня наблюдаются в основном в занижении дисперсии моделью, а также занижении некоторых краткосрочных пиков в уровне моря. Такое поведение модели вполне закономерно, т.к. модель основывается на данных атмосферного реанализа, имеющего сеточную область осреднения 0.25 градуса с дискретностью 3 часа. А также стоит учесть, что донная топография в большинстве районов существенна сглажена и основана на спутниковых измерениях, что влияет на локальное воспроизведение динамики моря в отдельных районах.

В таблице (Таблица 32), представлены статистические характеристики измеренных и рассчитанных значений уровня моря в береговых пунктах невской акватории. максимальные рассчитанные значения уровня в Горном и Кронштадте существенно выше измеренных, это связано с тем, что в 2019 г в Санкт-Петербурге, в период наводнения работал комплекс защитных сооружений, в то время как расчеты проводились на модели, для открытых ворот.

Только для информационного использования
правообладатель: admspp@oceanography.ru

3.3. Гидрологические условия Невской губы

Течения Невской губы

На следующих рисунках представлены среднемесячные течения на поверхности в конфигурации современной батиметрии и береговой линии с учетом намывных территорий и КЗС, а также батиметрии и береговой линии, соответствующей 1980 г.

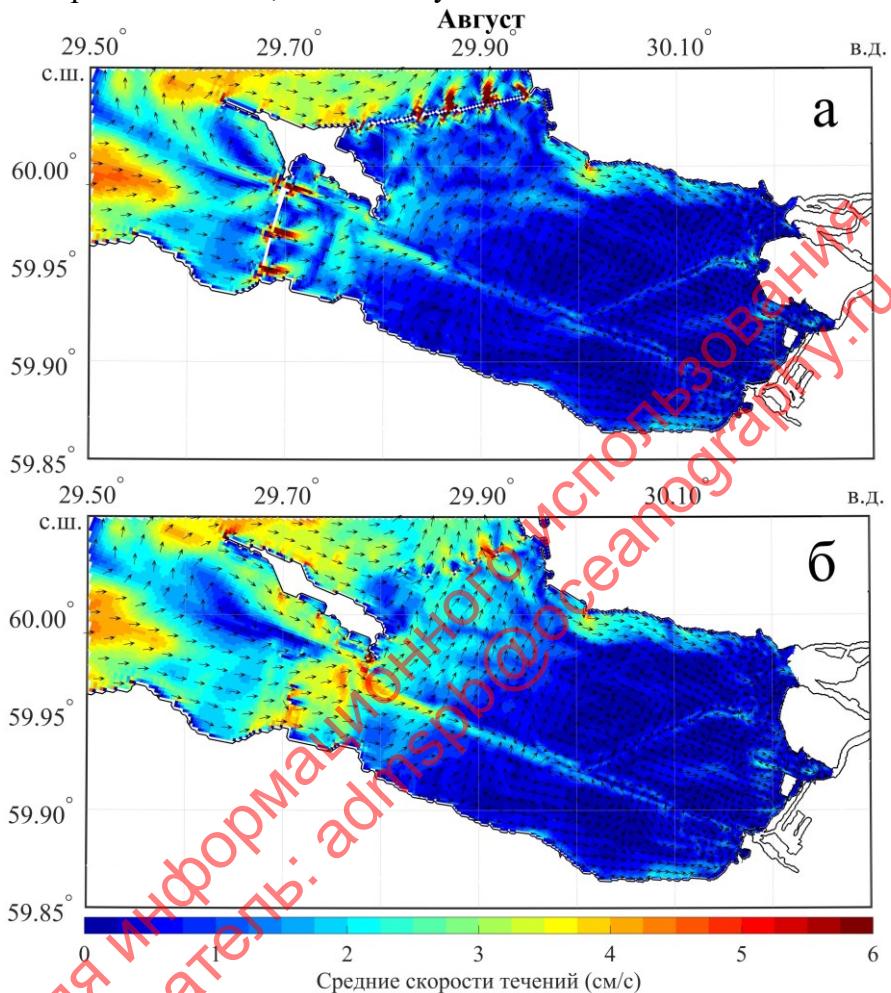


Рисунок 115. Средние течения за август 2019г по конфигурации новой береговой линии (а) и старой (б).

В летний период средние течения (Рисунок 115б) в невской акватории очень слабы и составляют около 1-2 см/с. В расчетах с отсутствующей дамбой характер течений выглядит следующим образом: основной поток воды переносится из открытой Балтики в Финский залив, а затем в Невскую акваторию вдоль южных берегов. За счет неровностей рельефа, течения усиливаются и попадают в невскую акваторию, затем делятся на два потока, один поток вдоль южного берега, теряя скорость распространяется до самого города, портовых акваторий и Васильевского острова, где течения практически останавливаются, сталкиваясь с речным стоком Невы. Второй поток входящего течения, обходя Неву по северу, опять раздваивается, одна часть выходит из невской акватории севернее Кронштадта на запад, другая ветвь поворачивает вдоль северного берега в сторону города, и опять, сталкиваясь с Невой, тормозит и поворачивает, создавая в центральной части акватории круговорот по часовой стрелке. Наибольшие значения среднего течения отмечаются на входе в невскую акваторию, за счет сужения прохода островом, также в районе фарватера, за счет увеличения глубины, и вдоль северного берега, скорости течения здесь

могут достигать 3-4 см/с. При строительстве комплекса защитных сооружений (Рисунок 115а), характер течений меняется только в районе Кронштадта и непосредственно створов ворот дамбы. Скорость входящего потока в южных створах и исходящего потока в северных створах достигают более 6 см/с, сразу после попадания водных масс внутрь невской акватории скорость течений резко падает до 1-2 см/с. В остальном картина средних течений остается прежней. За счет Невы, в центре невской акватории наблюдается круговорот, вращающийся по часовой стрелке, со скоростью 0-1 см/с. Входящие потоки воды с открытой части Финского залива, распространяются в сторону города по южному и северному берегу, основная же часть входящего потока через южные ворота, поворачивает на север и выходит из невской акватории в северные створы дамбы.

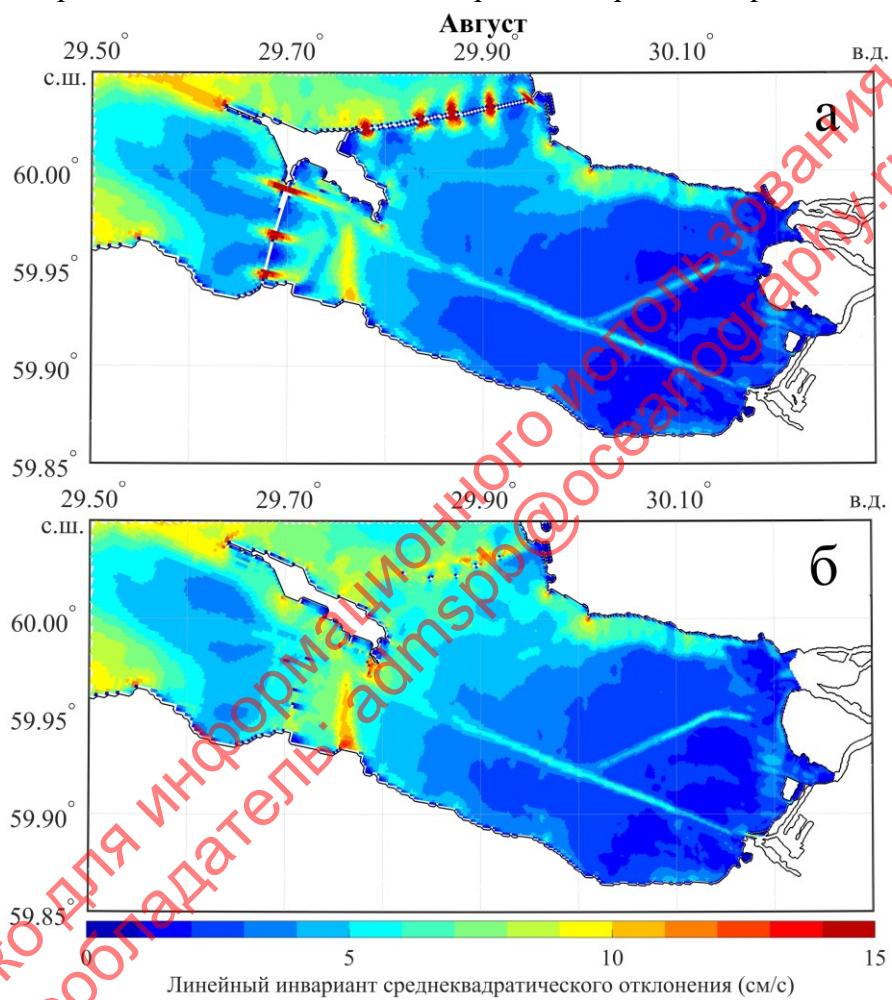


Рисунок 116. Линейный инвариант стандартного отклонения течений в августе с учетом современной береговой линии и КЗС (а), и береговой линии 1980г (б)

Максимальная дисперсия течений (Рисунок 116б) до строительства КЗС отмечается в районе Кронштадта, вблизи мелководья, линии фортов и фарватера, а также вдоль северного берега невской акватории. Значения стандартного отклонения линейного инварианта течений достигает 7-11 см/с. После строительства КЗС, картина дисперсии течений (Рисунок 116) изменилась. Теперь максимумы дисперсии отмечаются в створах дамбы в южной и северной ее частей, а в окрестностях дамбы северной стороны невской акватории, наоборот дисперсия резко понизилась до 3-5 см/с. В остальной части невской акватории характер дисперсии течений не меняется с учетом построенной КЗС.

Осенью, когда начинается период штормов (Рисунок 117), картина средних течений в невской акватории немного меняется. Входящий поток воды из открытой части Финского залива,

осенью существенно сильнее и может достигать 4-5 см/с. Расход Невы осенью также увеличивается, что создает хаотичные слабые противотечения в районе фарватеров, при этом круговорот в центральной части акватории сохраняется, также сохраняется и ветвь входящего течения вдоль северного берега в сторону города. Основная же ветвь входящего течения, более интенсивная чем в летний период, поворачивает на север и выходит по северной стороне из невской акватории на запад.

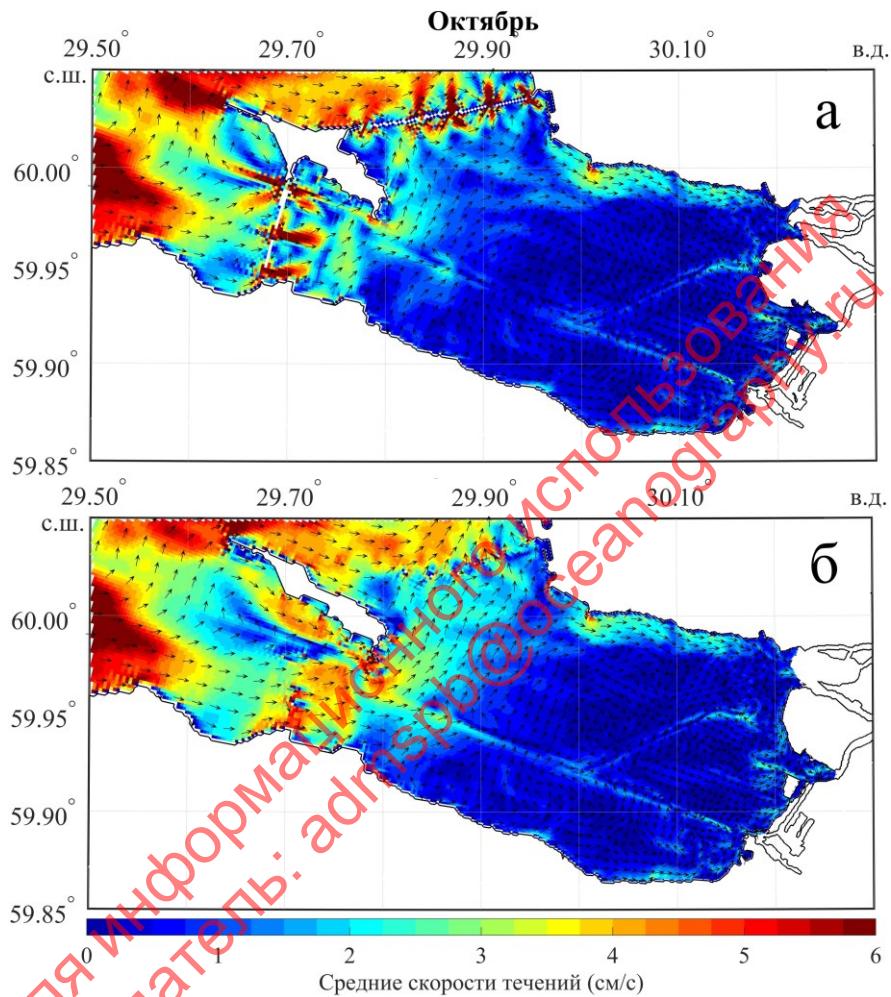


Рисунок 117 Средние течения за октябрь 2019г по конфигурации новой береговой линии (а) и старой (б).

После строительства КЗС (Рисунок 117а), в осенний период средние течения также немного сильнее в районе Кронштадта и створов, в самой же невской акватории от центра в сторону Санкт-Петербурга различий в средних течениях, рассчитанных между старой береговой линией и современной, практически не наблюдается.

Линейный инвариант стандартного отклонения течений (Рисунок 118) в осенний период существенно увеличился на всей акватории Невы. Наибольшие значения стандартного отклонения течений наблюдаются в районе острова Котлин, точнее вблизи Кронштадта с южной и северной стороны (Рисунок 118). В современной конфигурации береговой линии (Рисунок 118а) максимальное СКО фокусировано в створах дамбы, а также в фарватерах, при этом СКО течений резко уменьшается при удалении от створов дамбы в сторону Санкт-Петербурга, достигая минимума вблизи Васильевского острова, территории порта и Елагина острова. В исторической конфигурации, картина СКО немного другая. Большие значения линейного инварианта СКО течений наблюдаются не только севернее и южнее Кронштадта, но и практически до середины

акватории. Т.е построенная дамба, в условиях осенне-зимних штормов существенно снижает изменчивость течений в невской акватории.

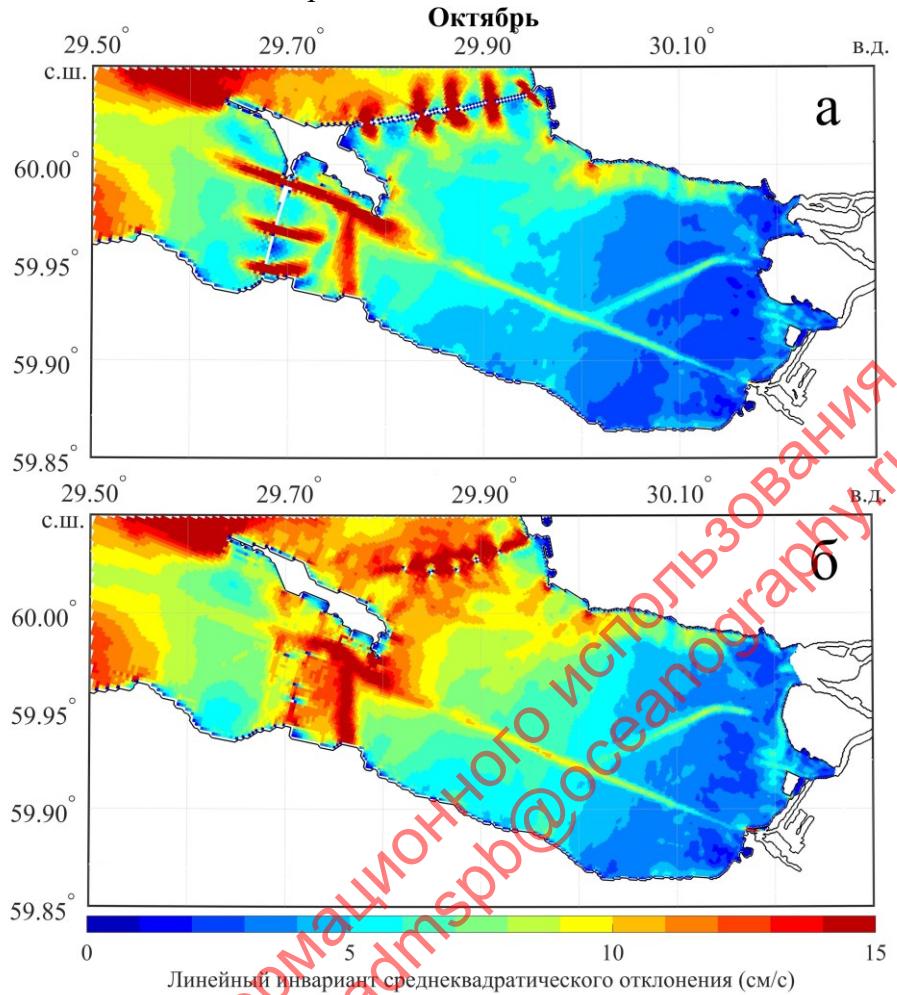


Рисунок 118. Линейный инвариант стандартного отклонения течений в октябре с учетом современной береговой линии и КЗС (а), и береговой линии 1980г (б)

В зимний период, когда наблюдаются шторма и начинается первое ледообразование, картина средних течений представлена на рисунке (Рисунок 119). Различия между экспериментами становятся сильнее, так, в старой конфигурации береговой линии (Рисунок 119б) в декабре наблюдаются два круговорота, один стационарный антициклический, находящийся севернее главного фарватера, второй циклонический образовался восточнее в треугольнике двух фарватеров и берега. Также наблюдается существенное среднее течение вдоль северного берега в сторону Санкт-Петербурга, достигающее 3-4 см/с. В расчетах с современной береговой линией (Рисунок 119а) стационарный вихрь в центре акватории Невы только один, при этом появляются небольшие вихри в районе Порта, Большой Невы и Корабельного фарватера, Морского вокзала. В целом наибольшие средние течения локализованы в створах дамбы и при обходе Кронштадта на север в сторону выхода через северные ворота. В остальной акватории Невы средние течения по значениям не превышают 1-2 см/с.

СКО течений в зимний период (Рисунок 120) в отличие от средних течений, не меняется и сохраняет свои максимумы в тех же районах: створы дамбы и фарватеры.

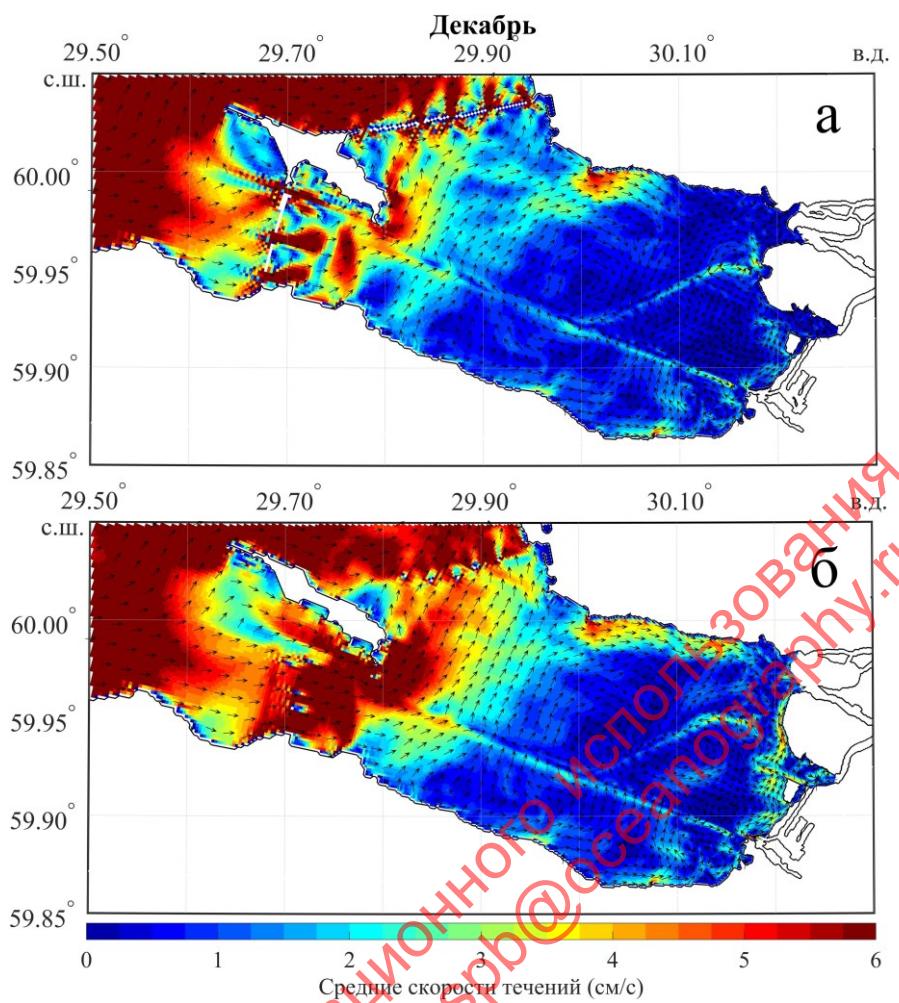


Рисунок 119. Средние течения за декабрь 2019г по конфигурации новой береговой линии (а) и старой (б).

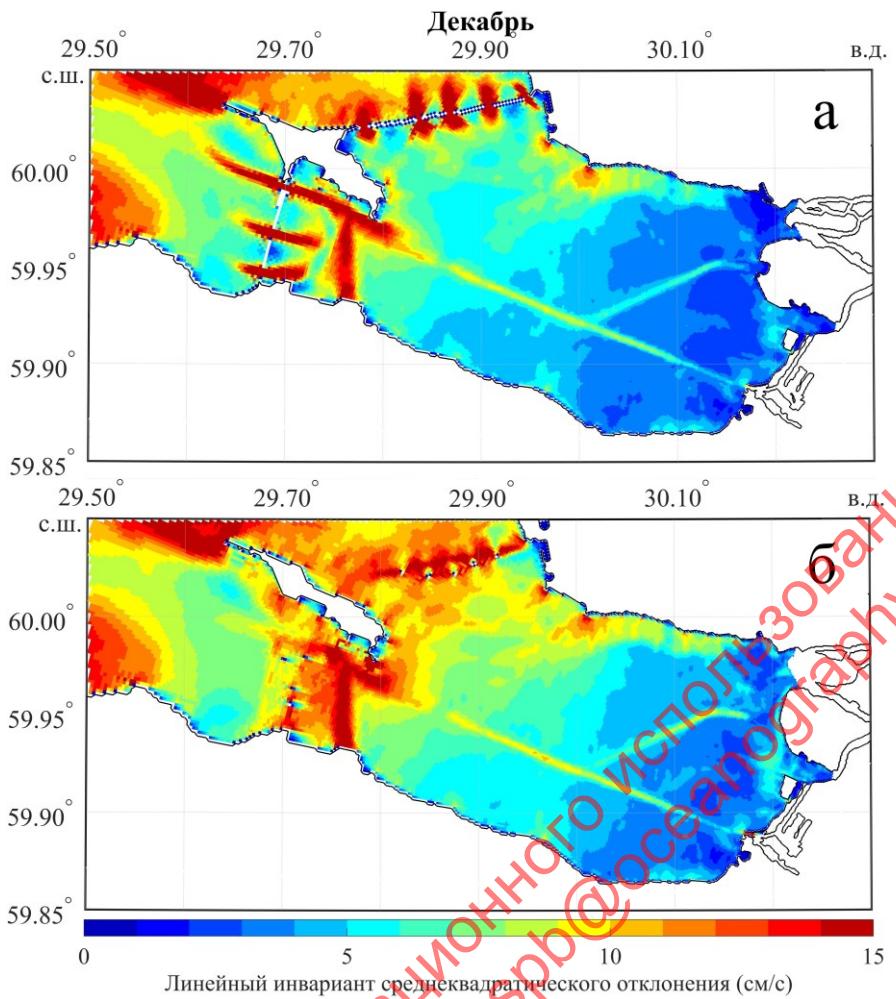


Рисунок 120. Линейный инвариант стандартного отклонения течений в декабре с учетом современной береговой линии и КЗС а), и береговой линии 1980г б)

Уровень моря

Сравнение СКО уровня моря (Рисунок 121-Рисунок 123) за летний , осенний и зимний периоды в расчетах с современной береговой линией и береговой линией 1980 г показало, что летом (Рисунок 121) изменчивость уровня самая низкая и достигает в акватории Невы 12-15 см, осенью (Рисунок 122), в период штормов, растет до 21-23 см и зимой (Рисунок 123), СКО уровня моря максимальное , достигает 25-26 см. При этом максимальные значения СКО уровня моря наблюдаются непосредственно на востоке Финского залива, у берегов Санкт-Петербурга, а минимальные, вблизи острова Котлин. Если же сравнивать расчеты уровня моря в современных условиях с учетом КЗС, и со старой береговой линией, то изменчивость уровня моря снизилась на 1-2 см, за счет комплекса защитных сооружений. Особенно хорошо видны различия в дисперсии уровня, вблизи ворот дамбы, Васильевского острова и русле Невы.

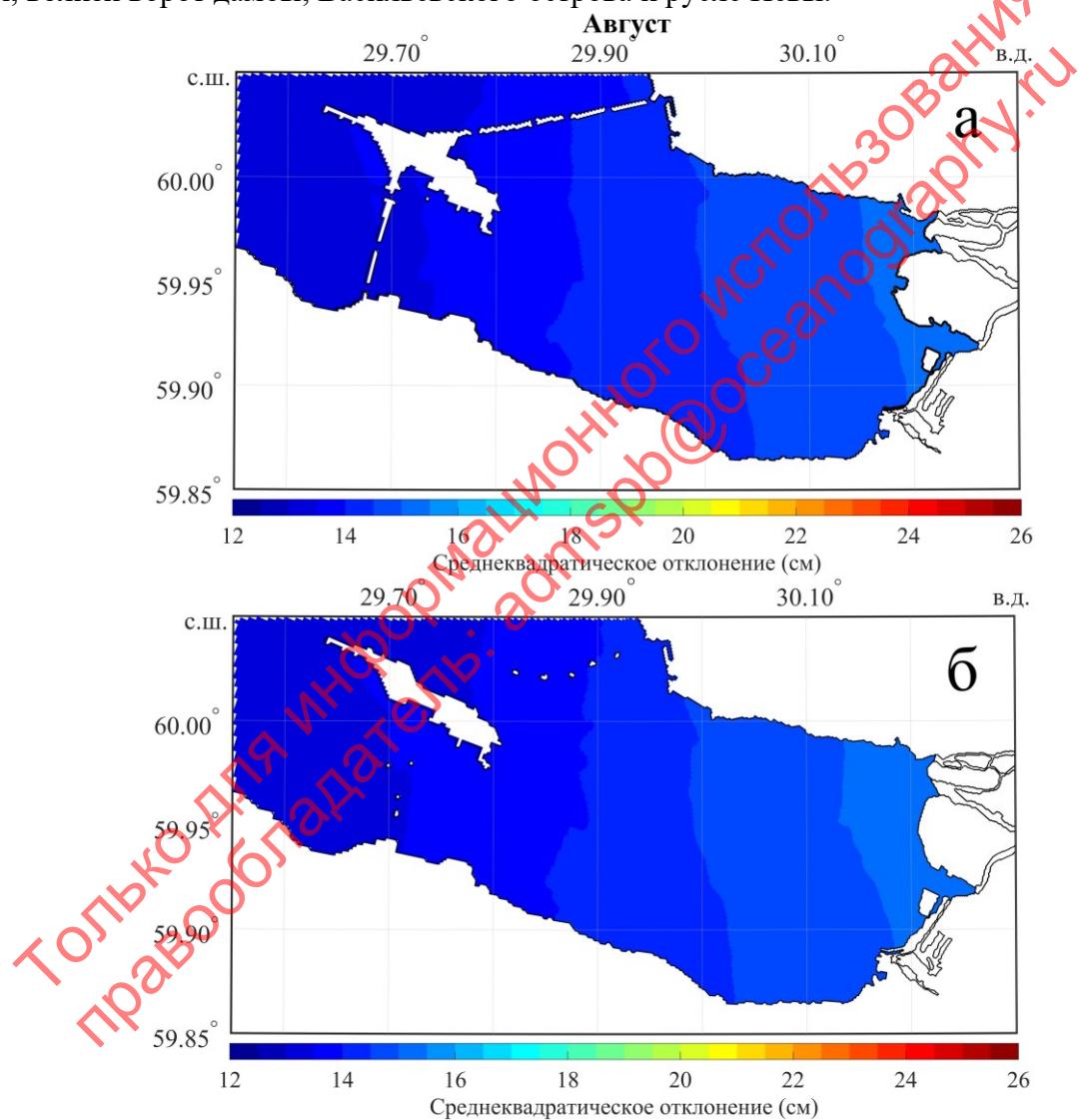


Рисунок 121. Стандартное отклонение уровня моря в августе, с учетом современной береговой линии и КЗС (а), и береговой линии 1980г (б)

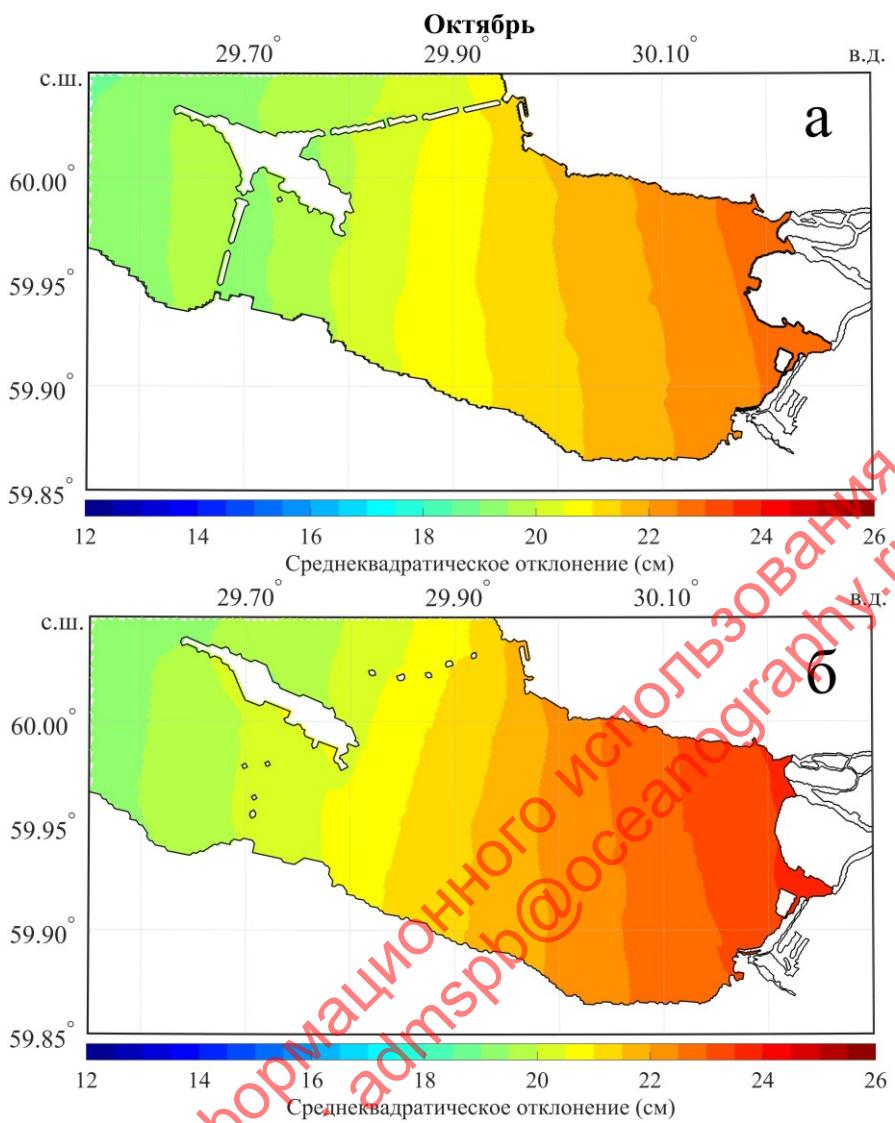


Рисунок 122. Стандартное отклонение уровня моря в октябре, с учетом современной береговой линии и КЗС а), и береговой линии 1980г б)

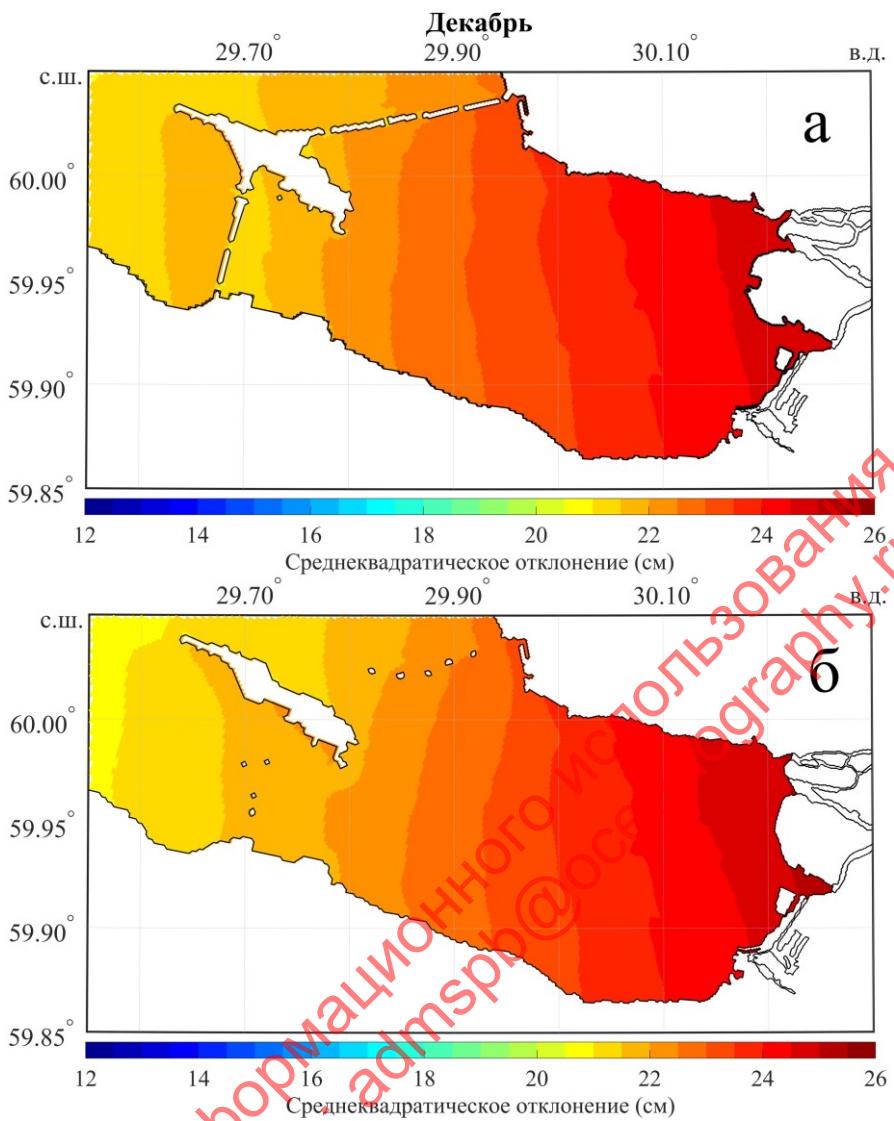


Рисунок 123. Стандартное отклонение уровня моря в декабре, с учетом современной береговой линии и КЗС а), и береговой линии 1980г б)

Далее проводился сравнительный анализ уровня моря по двум экспериментам, в 4 пунктах (Таблица 33, Рисунок 124-Рисунок 125): Горный, Кронштадт внутри акватории Невы, Шепелево и Выборг, с внешней стороны дамбы. Результаты сравнения показали, что в современных условиях, при существующей открытой дамбе уровень моря в Горном и Кронштадте в момент наводнения будет ниже на 16 см, с внешней стороны дамбы в Выборге и Шепелево, различия в момент наводнения не существенны и составляют 4 см. На рисунке (Рисунок 124) видно, что различия между расчетами будут заметны только при резком повышении уровня в акватории Невы, и могут достигать 35 см. При этом во всех случаях в современной конфигурации модели с учетом КЗС, уровень моря будет ниже в акватории Невы, с внешней стороны дамбы различия не существенны и не превышают 5 см.

Таблица 33 - Сравнение рядов уровня на станциях, рассчитанных по маске 1980г и в современных условиях.

Станция	Тип данных	Мин,см	Макс,см	СКО,см	Дисперсия,см
Горный	Маска 1980 г	-69	196	26	702
	Маска современная	-68	183	26	687
Кронштадт	Маска 1980 г	-60	157	24	590
	Маска современная	-59	146	24	578
Шепелево	Маска 1980 г	-56	127	23	520
	Маска современная	-56	128	23	522
Выборг	Маска 1980 г	-56	106	22	481
	Маска современная	-55	106	22	482

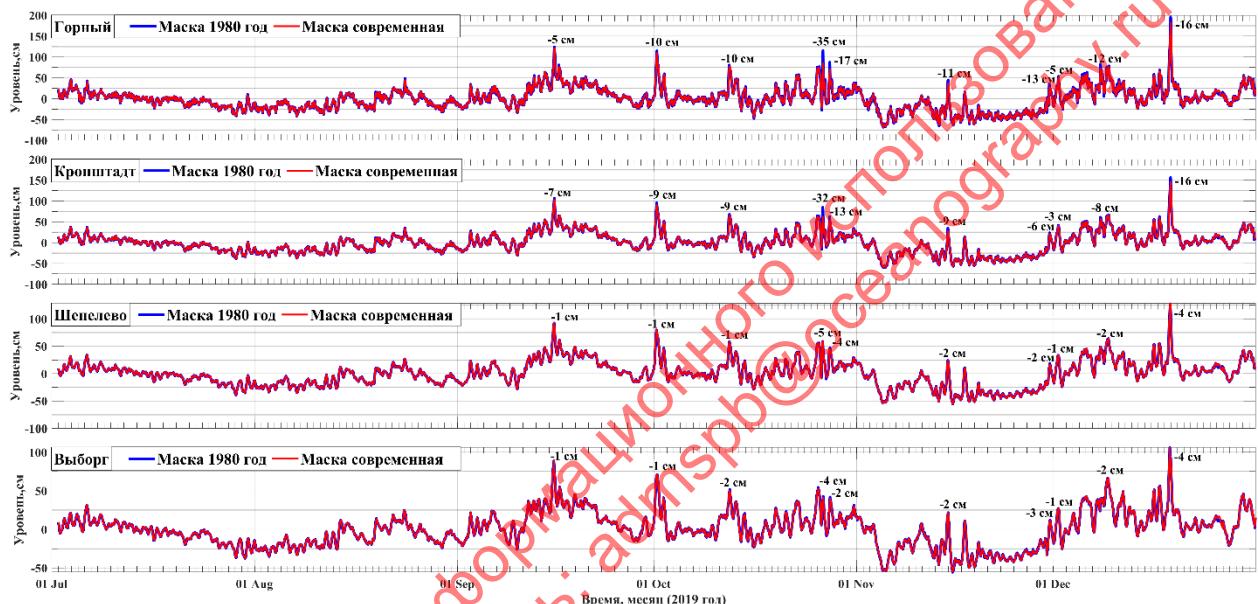


Рисунок 124. Ход уровня моря, в береговых пунктах, рассчитанный по модели с маской 1980г (синяя линия) и в современных условиях (красная линия).

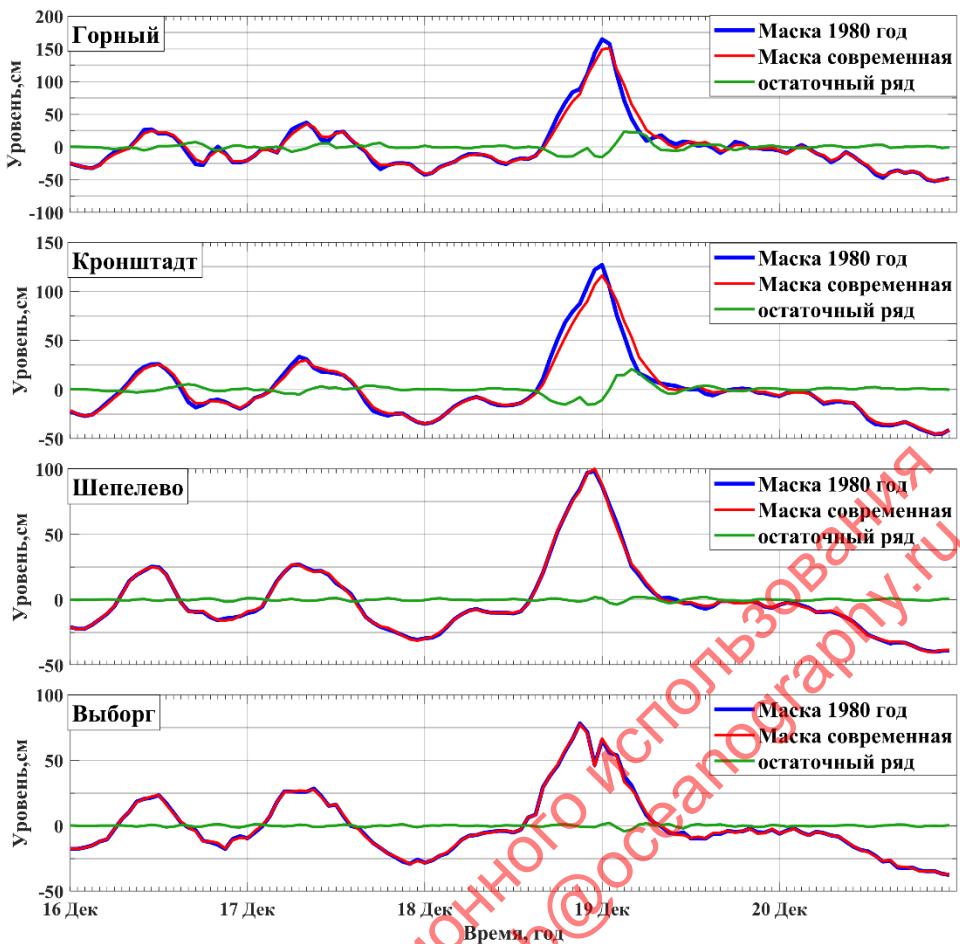


Рисунок 125. Ход уровня моря в декабре, в береговых пунктах, рассчитанный по модели с маской 1980г (синяя линия) и в современных условиях (красная линия) и разность между ними (зеленая линия).

Далее представлены результаты анализа наводненческой ситуации в декабре 2019г. Сначала был проведен расчет на модели с современной маской без закрытия дамбы, и отмечены моменты времени, когда отмечался максимум в Горном, когда необходимо закрыть дамбу. Затем был проведен численный эксперимент с закрытием и открытием дамбы. Таким образом, мы можем сравнить 3 сценария развития наводненческой ситуации в Санкт-Петербурге. На Рисунок 126 изображены поля уровня моря по модели со старой маской и новой маской перед тем, как закрыть дамбу, на Рисунок 127 а во время максимального подъема уровня в Горном при открытой дамбе, закрытой дамбе (Рисунок 127б) и в условиях старой маски (Рисунок 127в), а также на момент открытия дамбы (Рисунок 128) для тех же трех сценариев.

Рисунок 126 показывает, что перед началом наводнения уровень моря в расчетах по разным маскам существенно отличается. Через открытые ворота дамбы, большие объемы воды в невскую акваторию поступают медленнее, чем при отсутствии дамбы, и уровень моря меньше на 5 см, в то время как с внешней стороны уровень моря по современной маске немного выше, т.е водная масса, пришедшая с открытой части Финского залива, накапливается около о. Котлин. В момент наводнения (Рисунок 127) самый высокий уровень моря отмечается на старой маске, в районе Васильевского острова (Рисунок 127в), в современных условиях при открытых воротах (Рисунок 127а), уровень моря в акватории Невы ниже, что отмечалось ранее, по анализу рядов уровня (Рисунок 124-Рисунок 125) в пунктах Горный и Кронштадт, при этом с внешней стороны дамбы, уровень моря также значительно ниже чем в расчетах при отсутствующей дамбе и составляет около 20 см. Это можно объяснить тем, что накопившаяся масса воды у ворот дамбы отразилась от

комплекса защитных сооружений в виде гравитационной волны и направилась обратно, в открытую часть Балтийского моря. Если же рассматривать эксперимент с закрытой дамбой, то видно, уровень моря с внешней стороны соответствует уровню в сценарии без дамбы. Т.е. волна, которая подходит к защитному сооружению, частично отражается, частично накапливает свою массу у закрытой стенки (Рисунок 127б). Т.е в условиях открытой дамбы, максимум уровня моря отмечается в Горном, если же дамбу закрыть, максимум уровня будет отмечаться в районе Тарховки и Сестрорецка, а если бы дамба не была построена, то максимальные уровни воды отмечались бы по всему побережью как на востоке, так и западе о. Котлин.

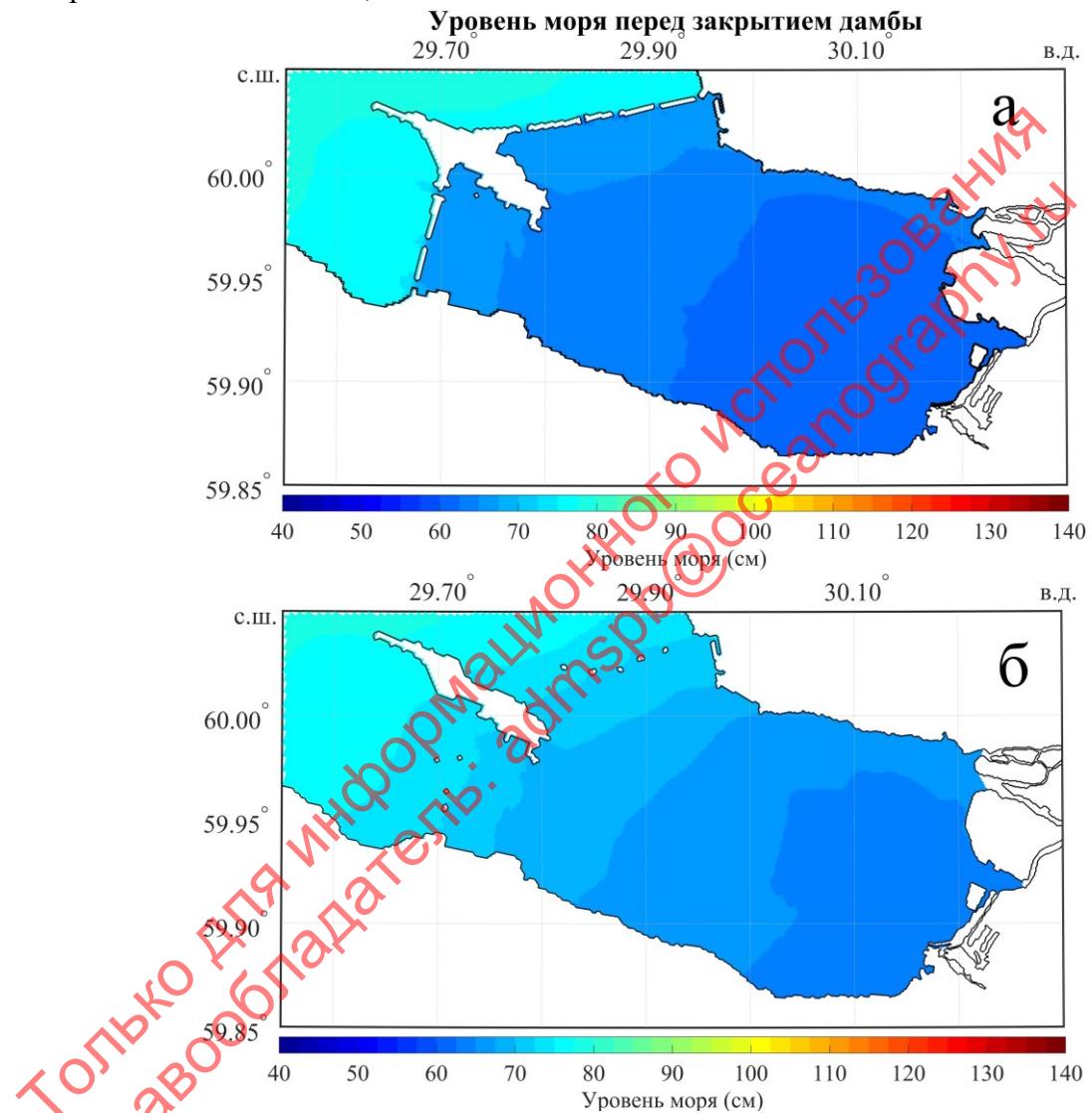


Рисунок 126. Уровень моря на момент закрытия дамбы, по модели с современной маской (а) и старой маской на 1980г (б).

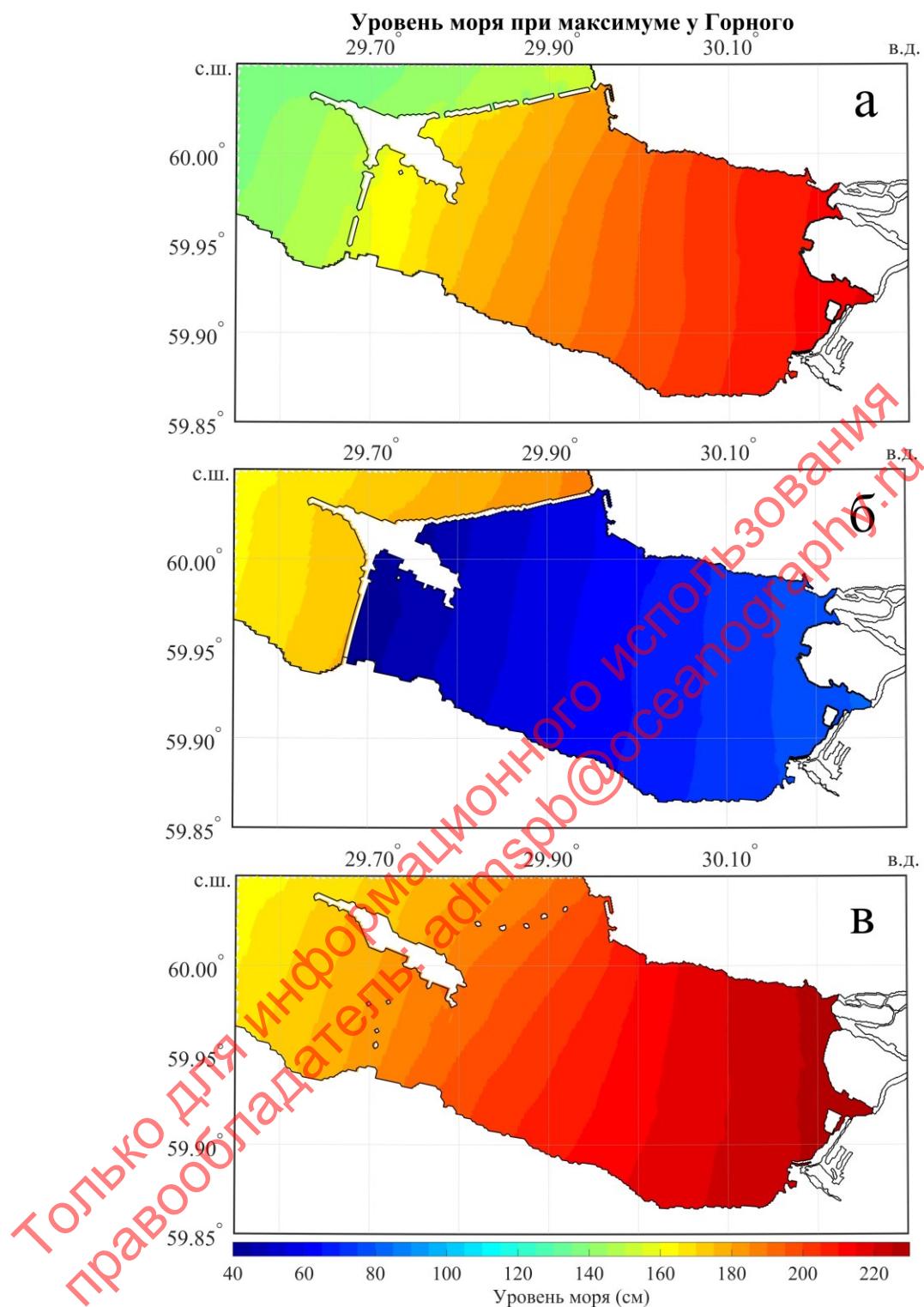


Рисунок 127. Уровень моря с максимумом в Горном по модели с современной маской и открытой дамбой (а), современной маской и закрытой дамбой (б), старой маской на 1980г (в).

Если рассматривать рисунок (Рисунок 127), на момент, когда пик наводнения пройден и необходимо открывать дамбу, видно, что на старой маске (Рисунок 127в) высокий уровень воды уже ушел, в то время как в эксперименте где дамба не закрывалась, видно, комплекс защитных сооружений даже с открытыми створами, мешает свободному проходу воды, и уровень моря в акватории Невы все еще высокий, хотя и не представляет опасности для города.

Таким образом можно сделать выводы, что строительство дамбы в целом способствует более низкому уровню воды во время наводнения в акватории Невы, препятствуя быстрому попаданию

водной массы через створы, при этом, эти же створы препятствуют и быстрому понижению уровня после прохождения пика наводнения. С внешней стороны, строительство дамбы не повлияло максимумы уровня моря, а только на время их наступления.

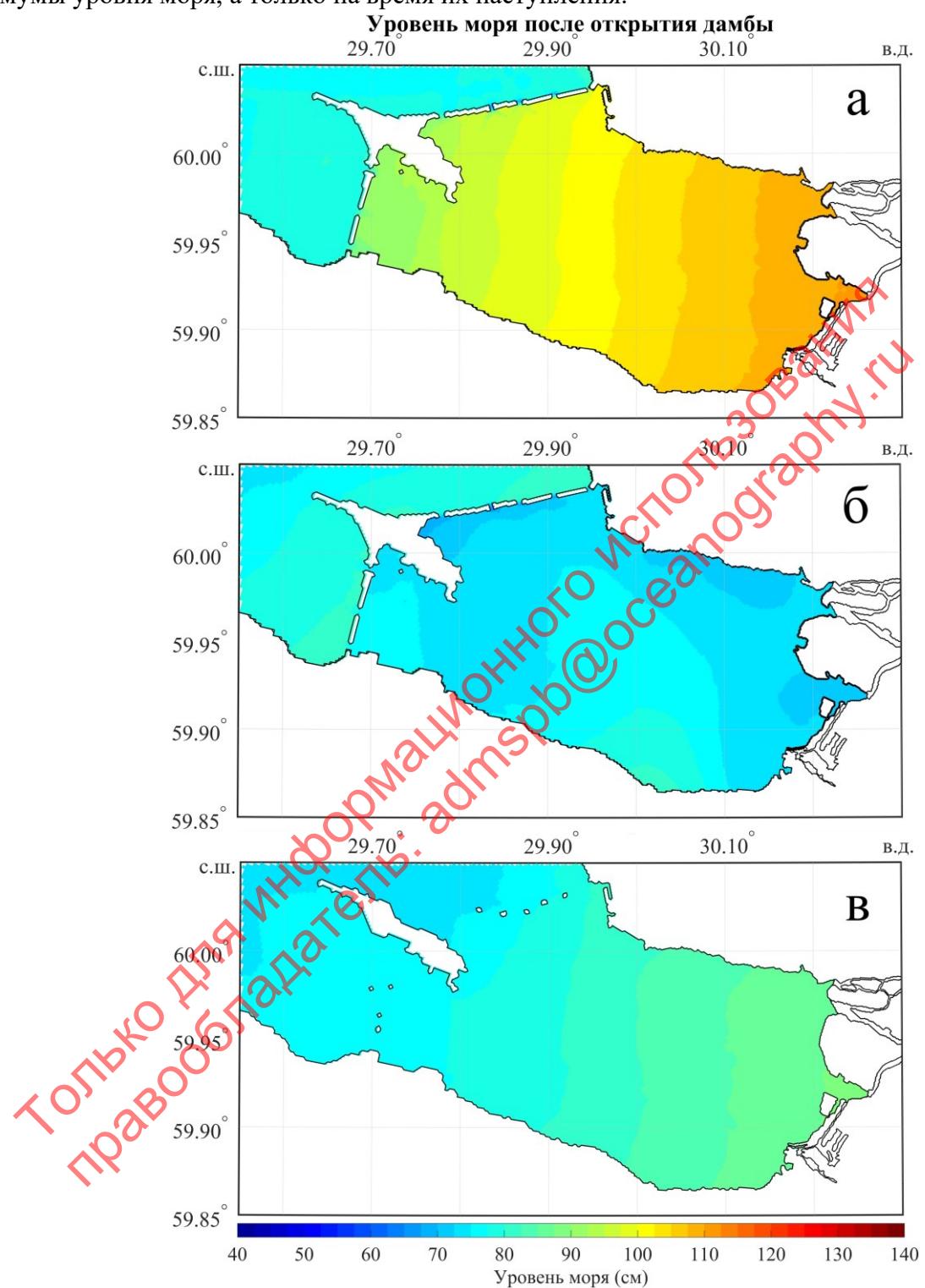


Рисунок 128. Уровень моря на момент открытия дамбы, по модели с современной маской и открытой дамбой (а), современной маской и закрытой дамбой (б), старой маской на 1980г (в).

3.4. Оценка влияния намывных территорий на уровень моря в акватории Невы при закрытой дамбе

Целью данной части работы является оценка влияния намывных территорий на уровень моря в невской акватории на примере наводнения в декабре 2015 года при различном старте закрытия ворот дамбы. 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 $2000 \text{ м}^3/\text{с}$ или $4080 \text{ м}^3/\text{с}$. Данные эксперименты проводились с учетом намывных территорий и без них.

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

1. Береговая линия без намыва, средний расход Невы ($2000 \text{ м}^3/\text{с}$) за 2015 г.
2. Береговая линия с намывом, средний расход Невы ($2000 \text{ м}^3/\text{с}$) за 2015 г.
3. Береговая линия без намыва, максимальный расход Невы ($4080 \text{ м}^3/\text{с}$) в осенне-зимний период
4. Береговая линия с намывом, максимальный расход Невы ($4080 \text{ м}^3/\text{с}$) в осенне-зимний период

На рисунке (Рисунок 129) представлены результаты шести экспериментов со средним расходом Невы $2000 \text{ м}^3/\text{с}$. 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 100 см.

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 129в), 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 129б) – через 39 -41 час, и при 80 см (Рисунок 129а) -44-46 часов (Таблица 34).

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 перекоса уровня моря или при открытии дамбы и пришедшей второй волны наводнения.

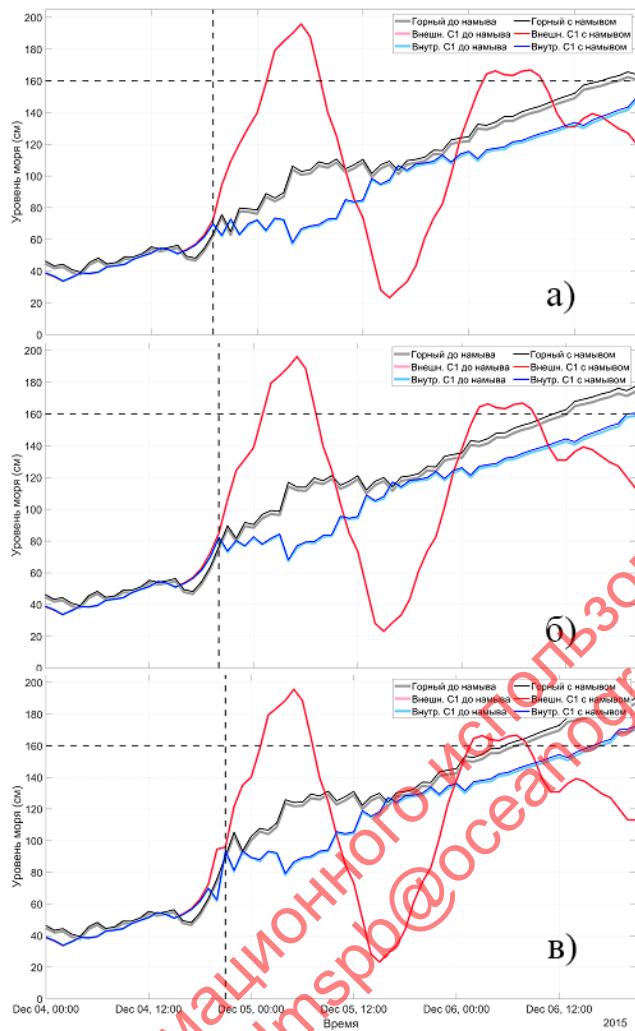


Рисунок 129 - Уровень моря (см) при закрытии дамбы с уровнем моря с внешней стороны: а)80см, б)90 см, в)100 см. Вертикальная штриховая линия – закрытие дамбы. Горизонтальной штриховой линией показан уровень моря 160 см.

Таблица 34 - 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 и закрытии дамбы при 80 см с внешней стороны, (Рисунок 130) 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.

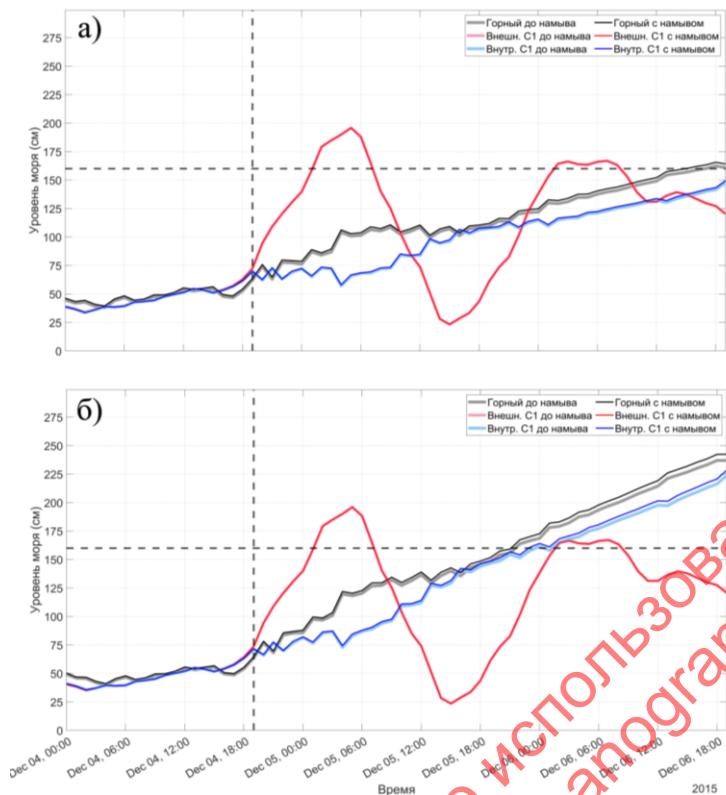
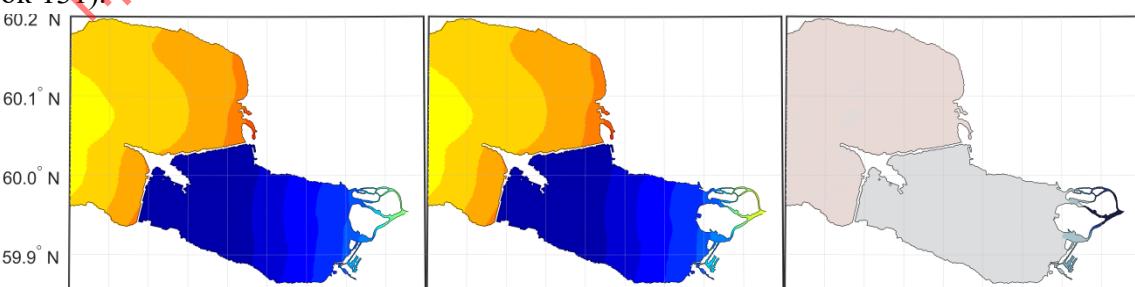


Рисунок 130 - Уровень моря (см) а) при среднем стоке Невы; б) при максимальном за осенне-зимний период расходе в р. Нева. Вертикальной штриховой линией показано время закрытия дамбы – 19:00 4 декабря 2015 г.; горизонтальной штриховой линией показан уровень моря 160 см.

На рисунке (Рисунок 131) 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 131).

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 131).

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 131).



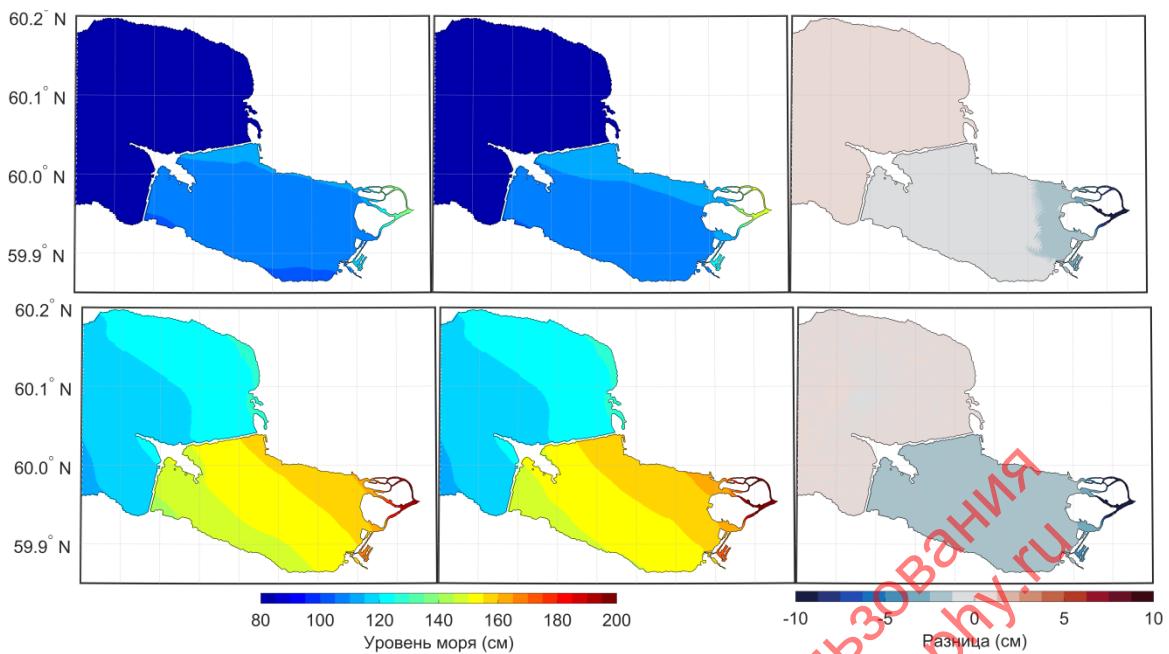


Рисунок 131 - Положение уровенной поверхности в Невской губе и дельте Невы для стока Невы 2000 м³/с, при отсутствии намывов (левая колонка), с намывами (центральная колонка) и разность между ними (правая колонка), через 12 (вверху), 24 (в центре) и 48 (внизу) часов после закрытия затворов КЗС.

На рисунке (Рисунок 132) 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 территории 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 территории в Невской губе составляет 4 – 5 см.

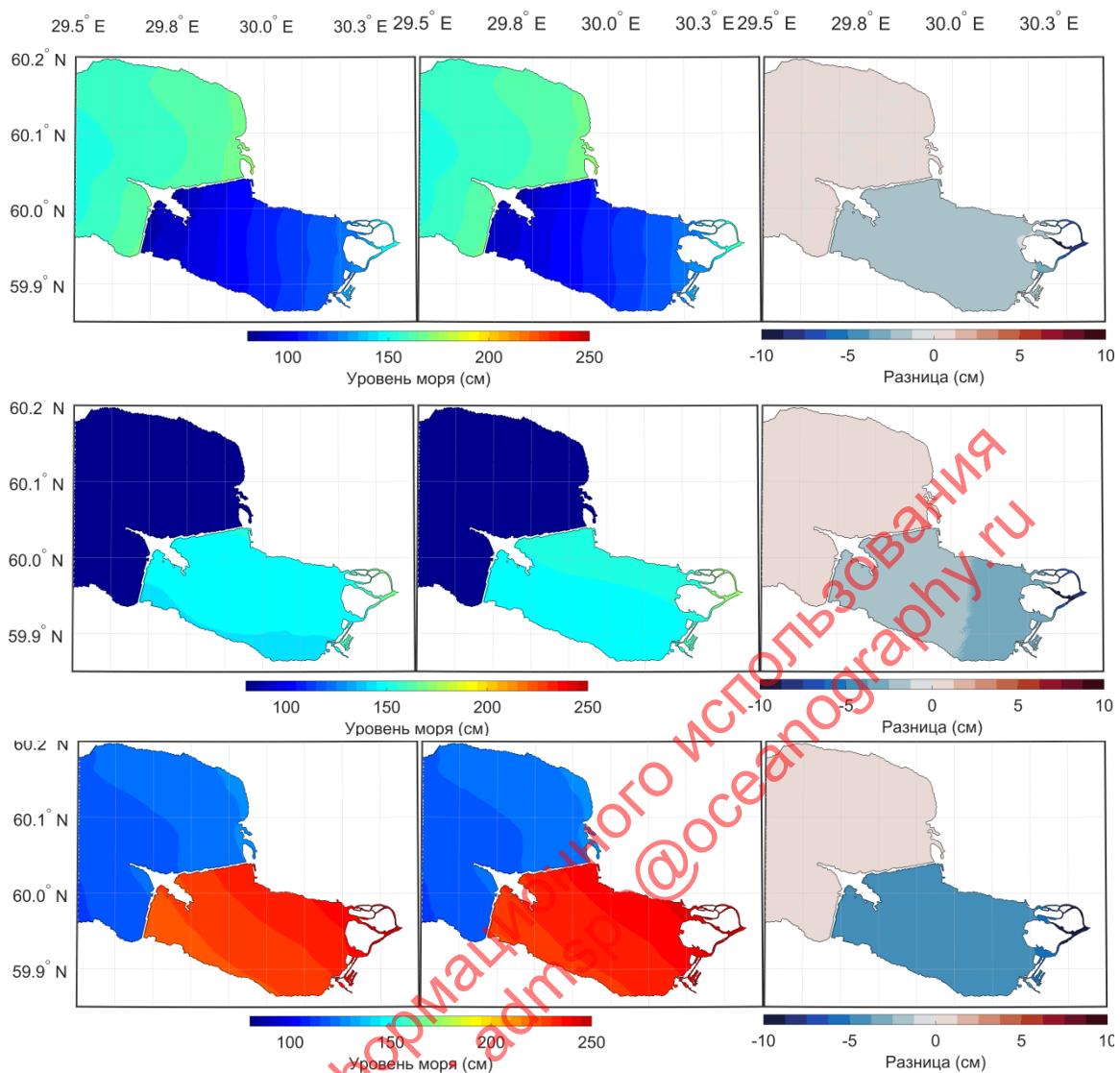


Рисунок 132 - Положение уровенной поверхности в Невской губе и дельте Невы для максимального стока Невы $4080 \text{ м}^3/\text{с}$, при отсутствии намывов (левая колонка), с намывами (центральная колонка) и разность между ними (правая колонка), через 12 (вверху), 24 (в центре) и 48 (внизу) часов после закрытия затворов КЗС.

На рисунках (верхний ряд Рисунок 131 и Рисунок 132), 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 125 см, в то время как при среднем расходе Невы – только 100 см.

На рисунке (нижний ряд Рисунок 131 и Рисунок 132) 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 240 см, в то время как при среднем расходе Невы – только 165 см.

На рисунке (Рисунок 133) 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.

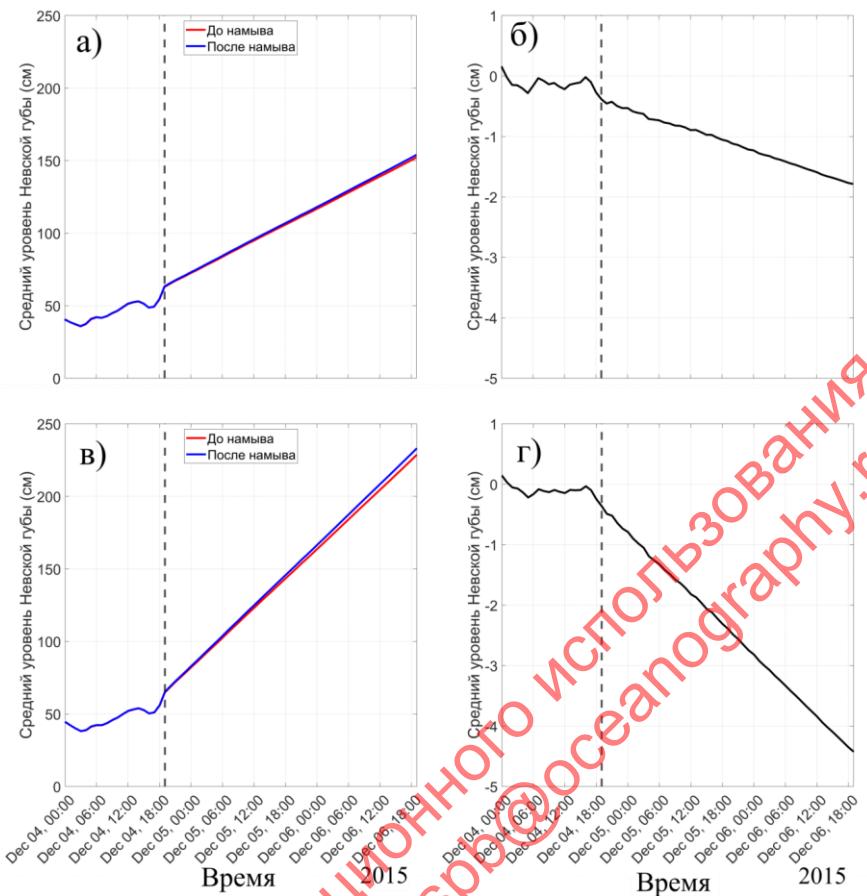


Рисунок 133 - а-в) средний уровень по внутренней акватории Невской губы ограниченной закрытой дамбой: б- г) разница уровней между намывом и без. Верхний ряд, расход Невы 2000м³/с, нижний ряд – 4080 м³/с. Штрихом обозначено время закрытия дамбы;

Произведённые в последние полвека намывы территорий не оказывают заметных изменений в положении уровенной 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 объёме стока Невы в 4080 м³/с, через 27 часов после закрытия затворов КЗС, в Невской губе у пункта Горный институт фиксируется опасный подъём уровня в 161 см, а через 48 часов – особо опасный подъём уровня в 240 см.

3.5. Гидрологические условия в Невской губе при разных скоростях проходящего циклона в период наводнений

В этой главе описана серия экспериментов с современной береговой линией, и сгенерированным циклоном с различной скоростью перемещения.

Серия экспериментов проводилась следующим образом: в качестве форсинга задается сгенерированный циклон. Параметры циклона – глубина циклона соответствует тому, что максимальный рассчитанный ветер в циклоне равен 22 м/с, скорость перемещения циклона 2, 5, 11, 15, 20, 26 м/с. Ранее проводились аналогичные эксперименты с меньшими скоростями ветра, но они не вызывали наводненческих ситуаций, поэтому в рамках данной работы, рассматриваться не будут.

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 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.

При заданной скорости циклона 2 м/с, и максимальной скорости ветра 22 м/с, угрозы наводнения не возникает (Рисунок 134, Рисунок 135), максимальное значение уровня у Горного достигает 119 см, при этом период волны составляет около 140 часов. Дамба при таком штормовом нагоне не закрывается.

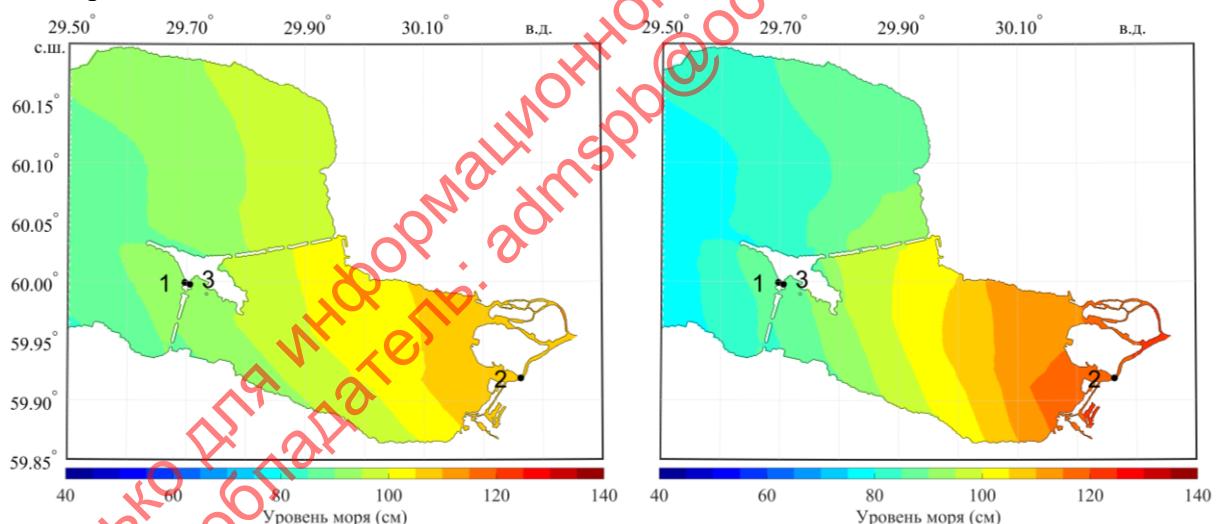


Рисунок 134-Уровень моря (см). Слева – в момент максимума у дамбы (246 час), справа – в момент максимального уровня у Горного (257 час).

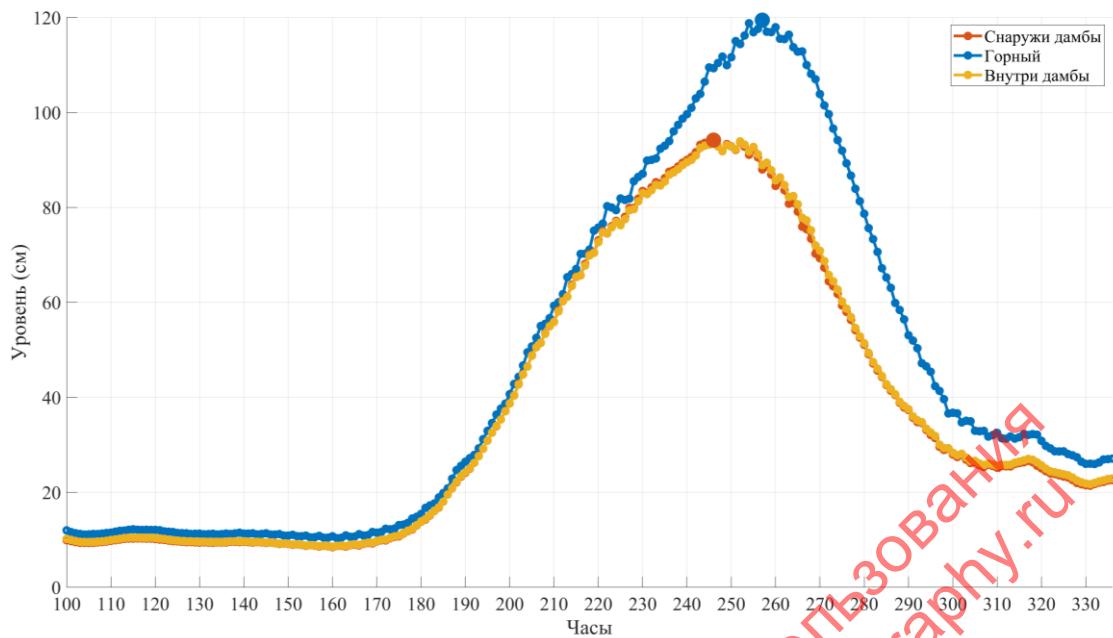


Рисунок 135- Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Большими точками отмечены максимумы у дамбы и Горного (246 и 257 час, соответственно).

При описанных выше условиях и скорости циклона 5 м/с, возникает угроза наводнения в Санкт-Петербурге (Рисунок 136, Рисунок 137). Уровень моря в п. Горный поднимается до отметки 197 см и начинает плавно понижаться, период волны, которую сгенерировал циклон, составляет около 55 часов.

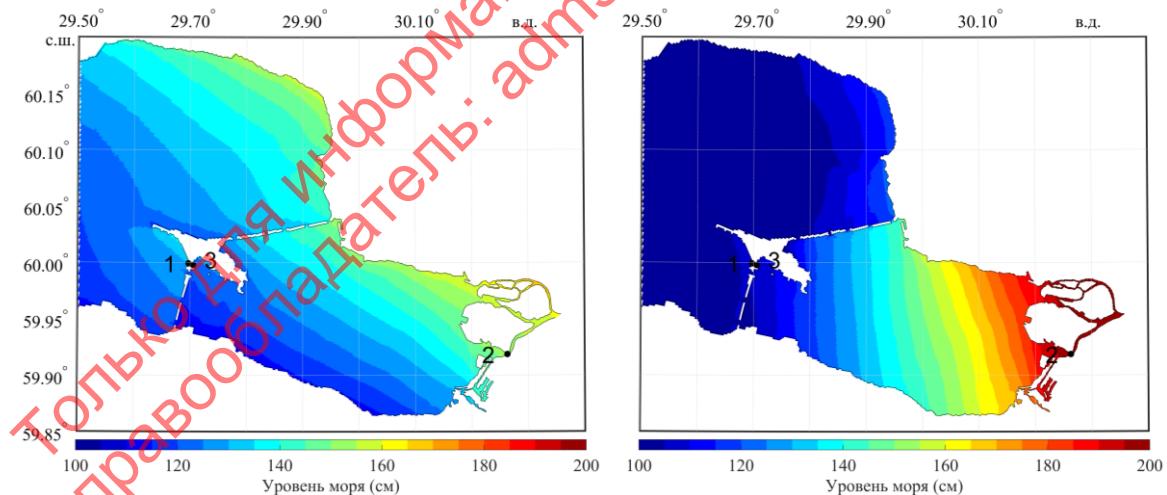


Рисунок 136 - Уровень моря (см). Слева – в момент максимума у дамбы (84 час), справа – в момент максимального уровня у Горного (89 час).

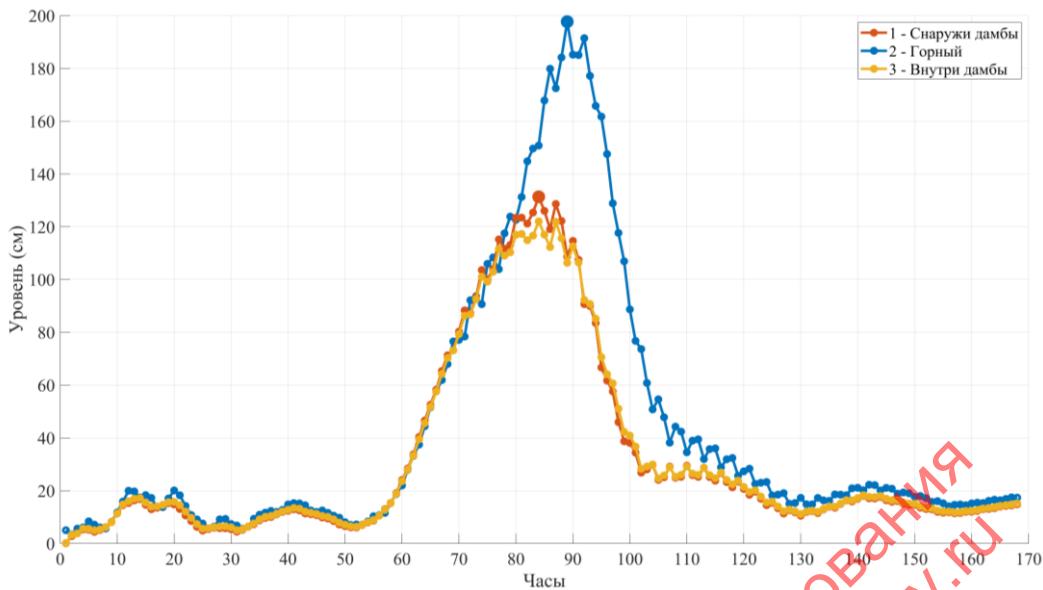


Рисунок 137 - Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Большими точками отмечены максимумы у дамбы и Горного (84 и 89 час, соответственно).

Последующие проведенные тесты по закрытию и открытию дамбы показали (Рисунок 138, Рисунок 139) 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.

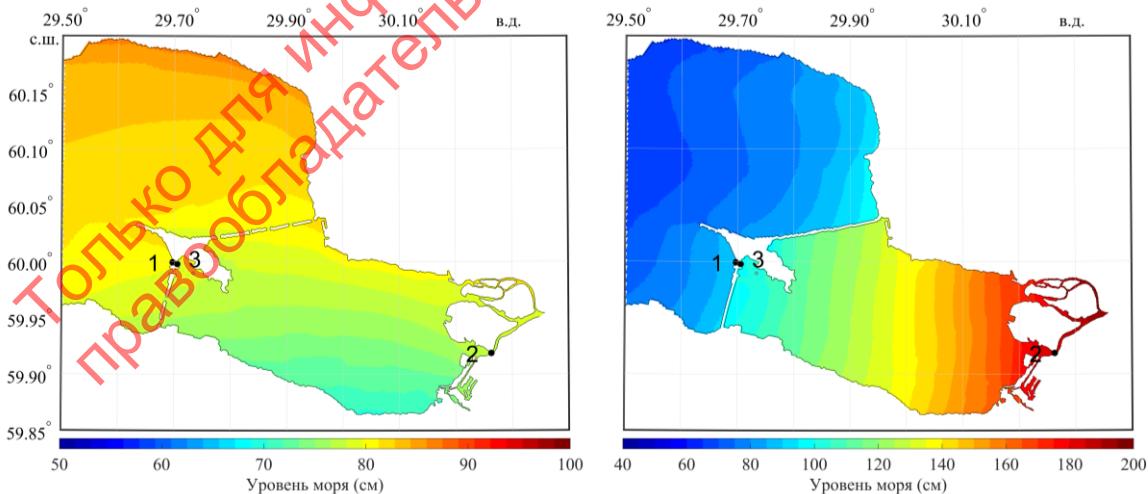


Рисунок 138 - Уровень моря (см). Слева – в момент закрытия дамбы (70 час), справа – в момент открытия дамбы и максимального уровня у Горного (92 час).

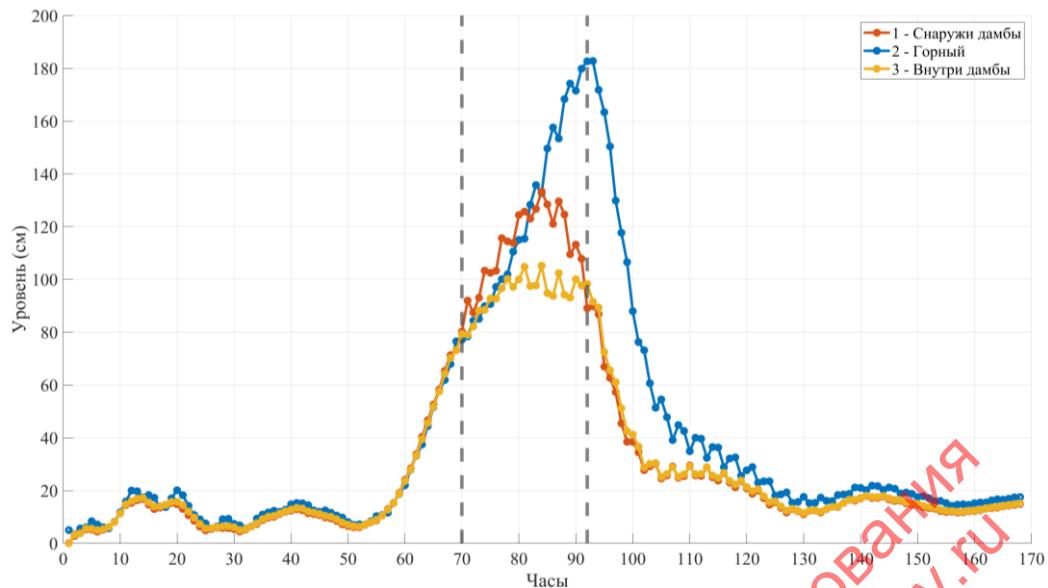


Рисунок 139 - Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Пунктиром отмечено время закрытия и открытия дамбы (70 и 92 час, соответственно).

При описанных выше условиях и скорости циклона 11 м/с, (Рисунок 140, Рисунок 141). уровень моря в п. Горный поднимается до отметки 236 см и начинает резко понижаться, период волны, которую сгенерировал циклон, составляет около 20 часов.

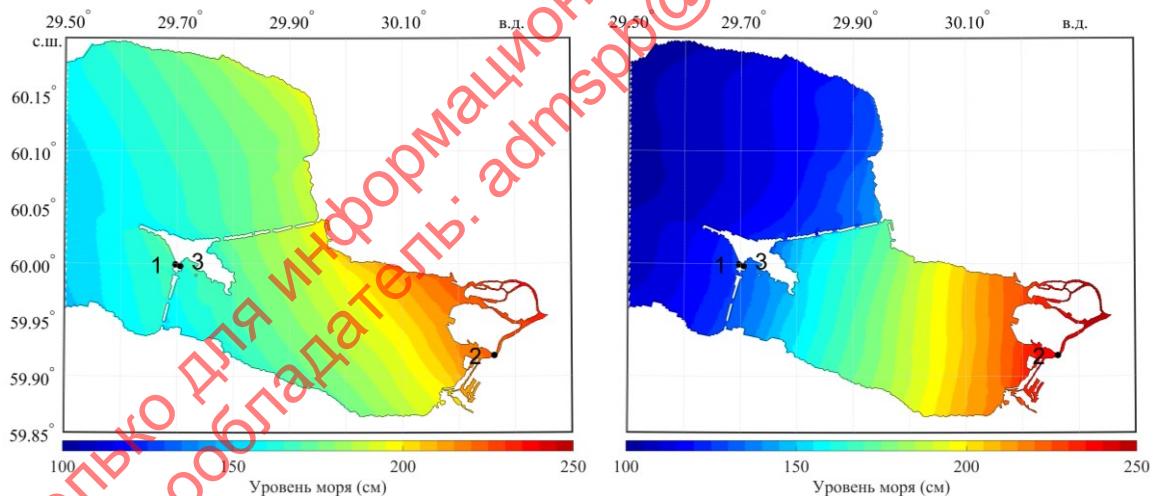


Рисунок 140 - Уровень моря (см). Слева – в момент максимума у дамбы (105 час), справа – в момент максимального уровня у Горного (107 час).

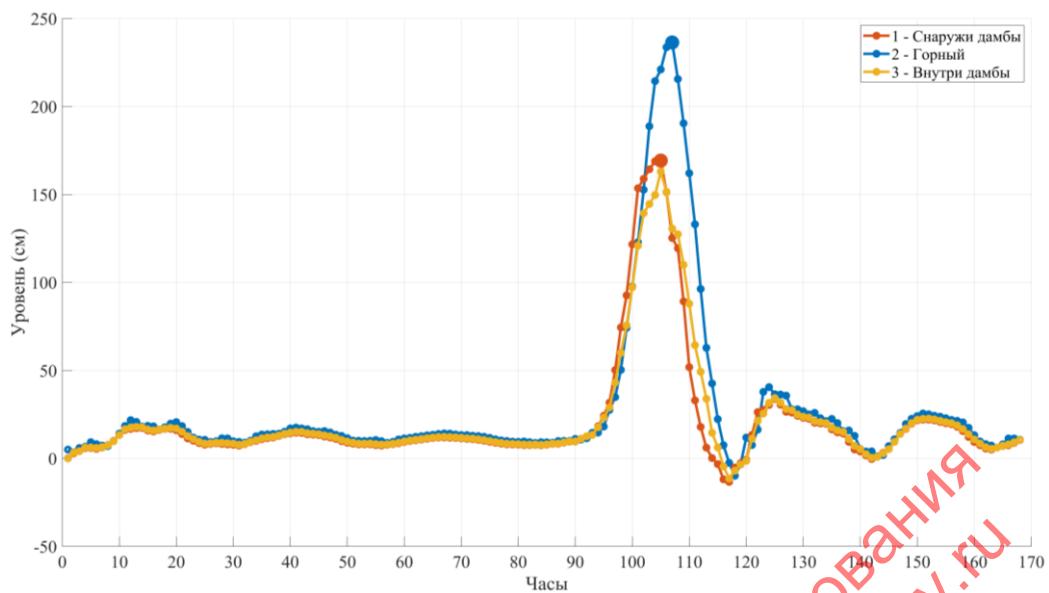


Рисунок 141 - Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Большими точками отмечены максимумы у дамбы и Горного (105 и 107 час, соответственно).

Последующие проведенные тесты по закрытию и открытию дамбы показали (Рисунок 142, Рисунок 143) 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 уровня 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.

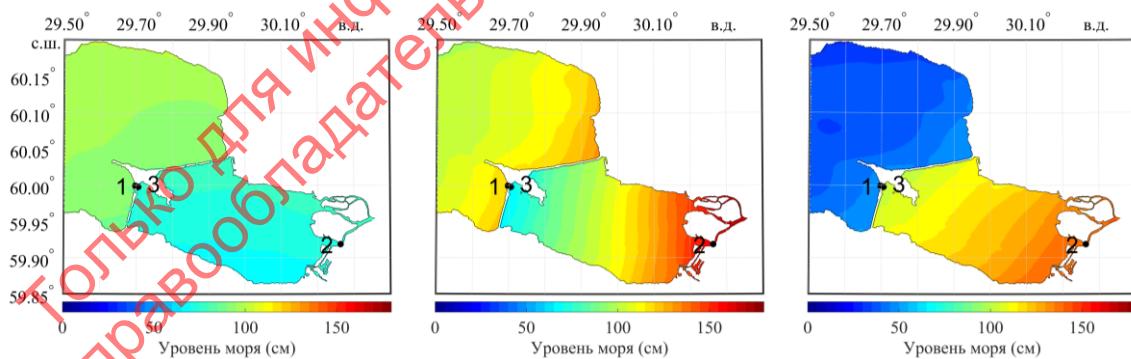


Рисунок 142 - Уровень моря (см). Слева – в момент закрытия дамбы (99 час), в центре – в момент максимального уровня у Горного (107 ч) справа – в открытия дамбы (110 час).

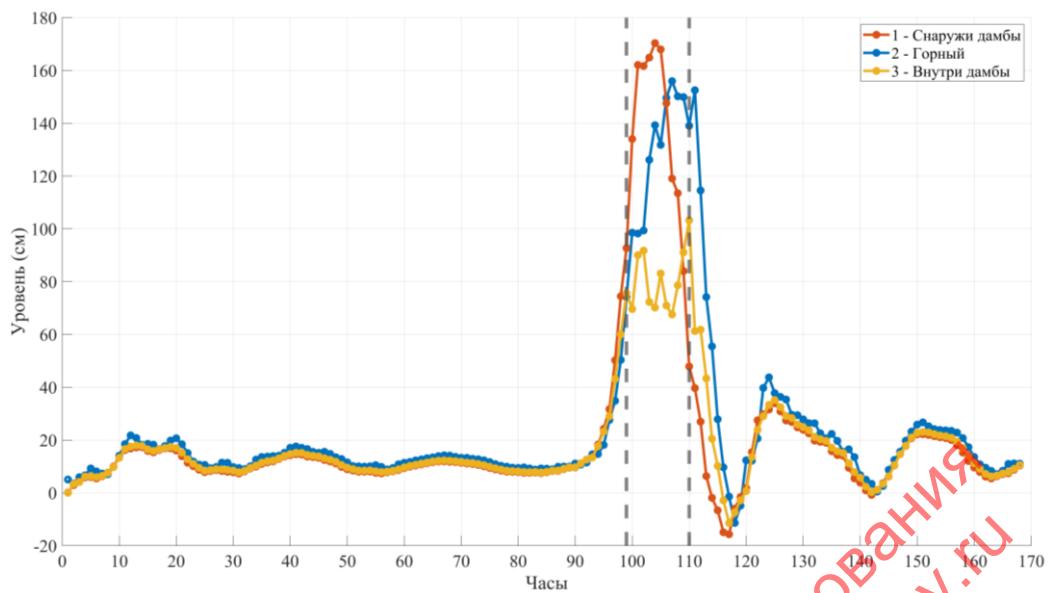


Рисунок 143 - Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Пунктиром отмечено время закрытия и открытия дамбы (99 и 110 час, соответственно).

При описанных выше условиях и скорости циклона 15 м/с, (Рисунок 144, Рисунок 145). уровень моря в п. Горный поднимается до отметки 255 см и начинает резко понижаться, период волны, которую сгенерировал циклон, составляет около 20 часов.

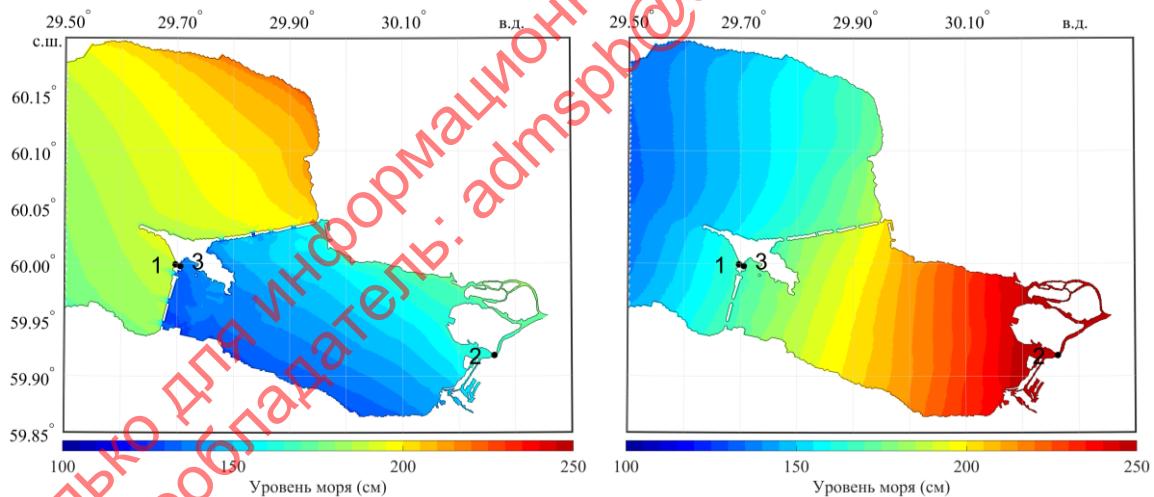


Рисунок 144 - Уровень моря (см). Слева – в момент максимума у дамбы (108 час), справа – в момент максимального уровня у Горного (111 час).

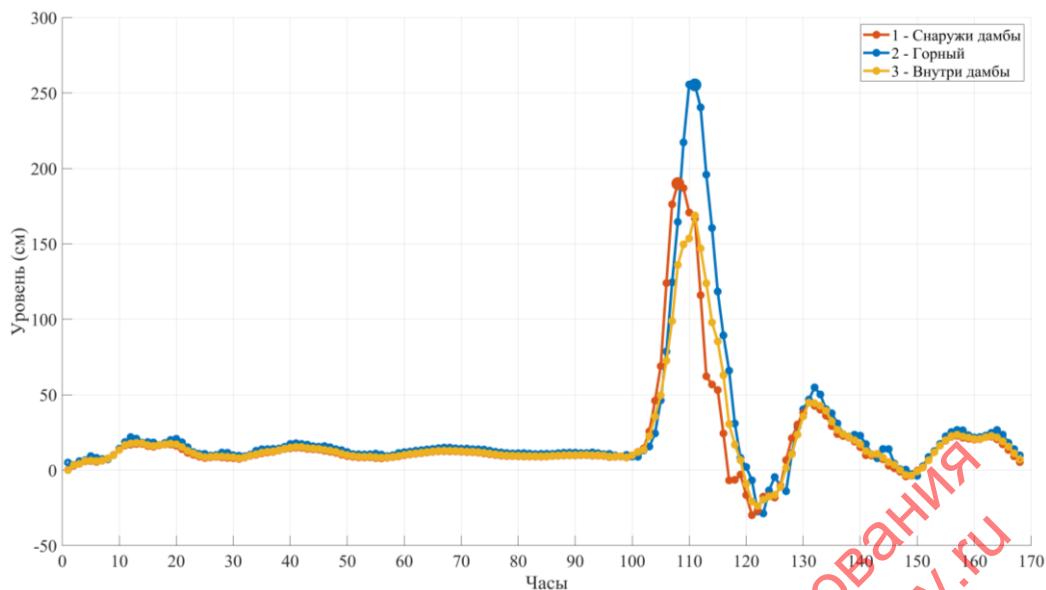


Рисунок 145 - Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Большими точками отмечены максимумы у дамбы и Горного (108 и 111 час, соответственно).

Последующие проведенные тесты по закрытию и открытию дамбы показали (Рисунок 146, Рисунок 147) 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.

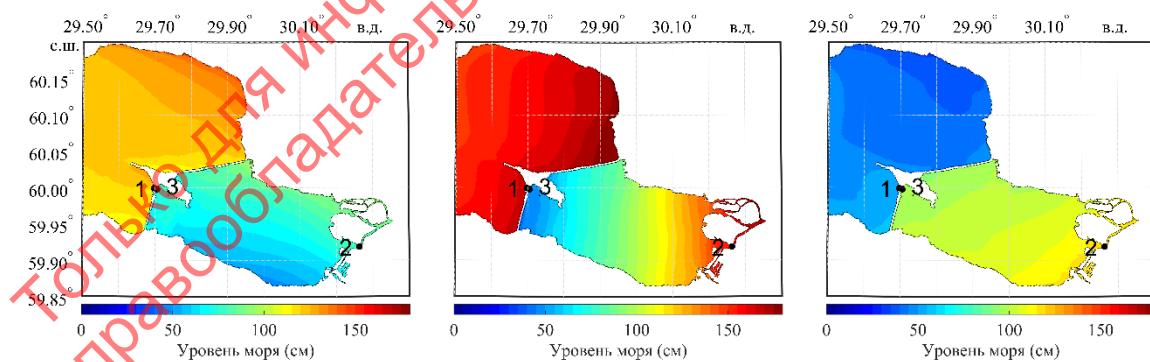


Рисунок 146 - Уровень моря (см). Слева – в момент закрытия дамбы (106 час), в центре – в момент максимального уровня у Горного (108 ч) справа – в открытия дамбы (113 час).

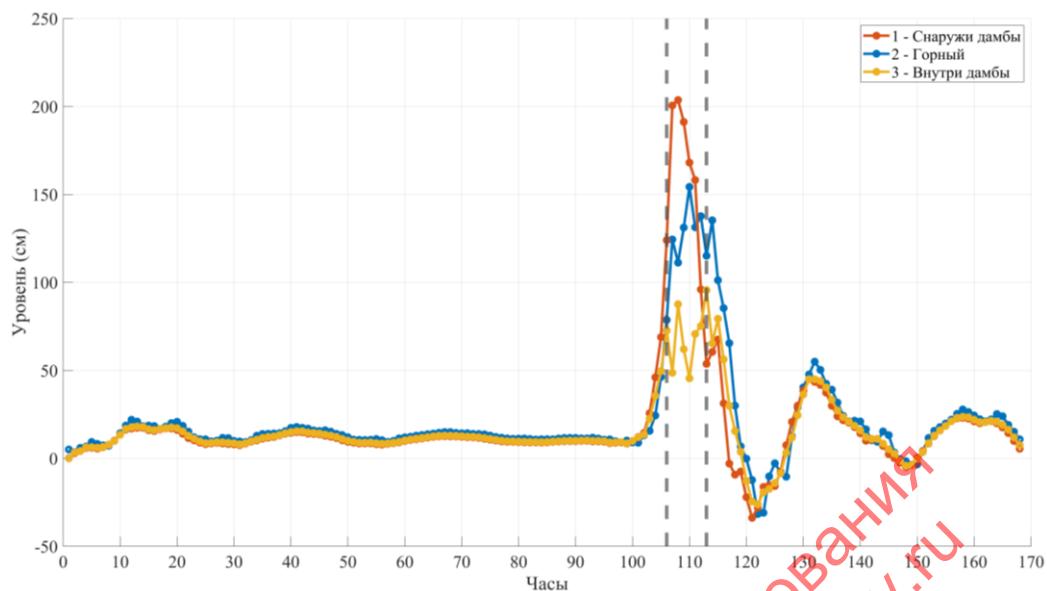


Рисунок 147 - Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Пунктиром отмечено время закрытия и открытия дамбы (106 и 113 час, соответственно).

При описанных выше условиях и скорости циклона 20 м/с, (Рисунок 148, Рисунок 149). уровень моря в п. Горный поднимается до отметки 170 см и начинает резко понижаться, период волны, которую сгенерировал циклон, составляет около 18 часов.

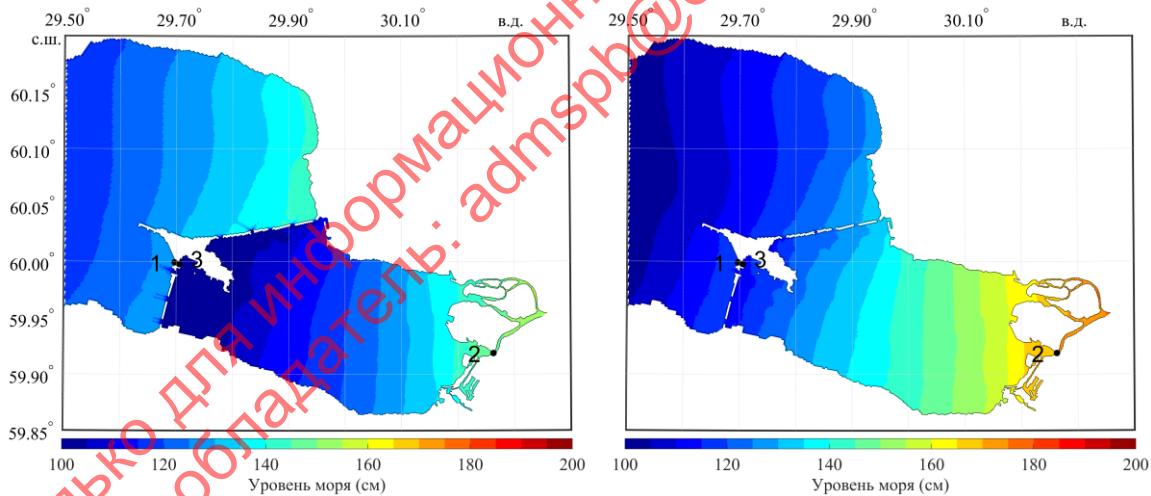


Рисунок 148- Уровень моря (см). Слева – в момент максимума у дамбы (65 час), справа – в момент максимального уровня у Горного (66 час).

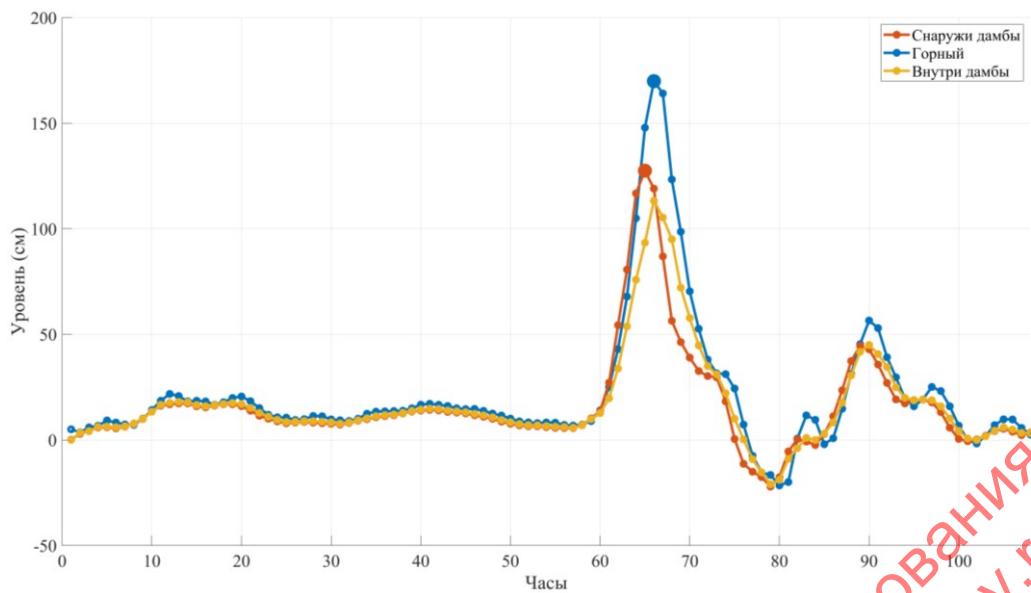


Рисунок 149- Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Большими точками отмечены максимумы у дамбы и Горного (65 и 66 час, соответственно).

Последующие проведенные тесты по закрытию и открытию дамбы показали (Рисунок 150, Рисунок 151) 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 107 см и отмечается на 2 часу закрытой дамбы, открытие дамбы производится через 4 часа 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 67 см.

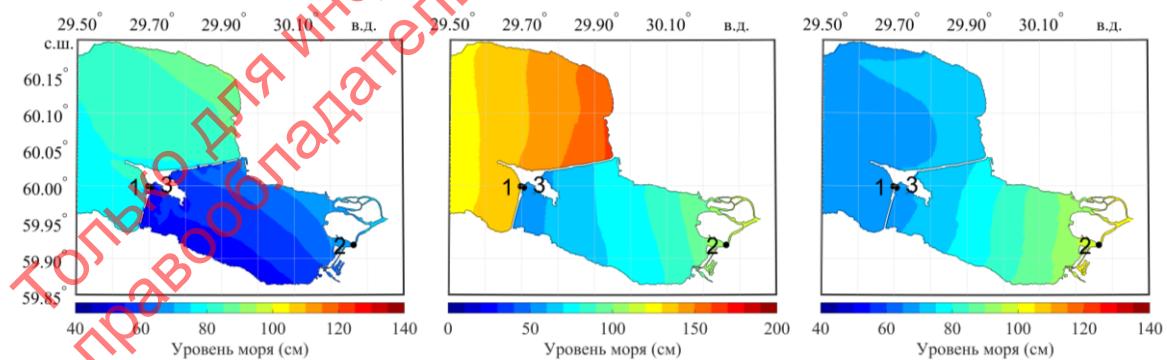


Рисунок 150- Уровень моря (см). Слева – в момент закрытия дамбы (63 час), в центре – при максимуме у Горного (65 час), справа – в момент открытия дамбы (67 час).

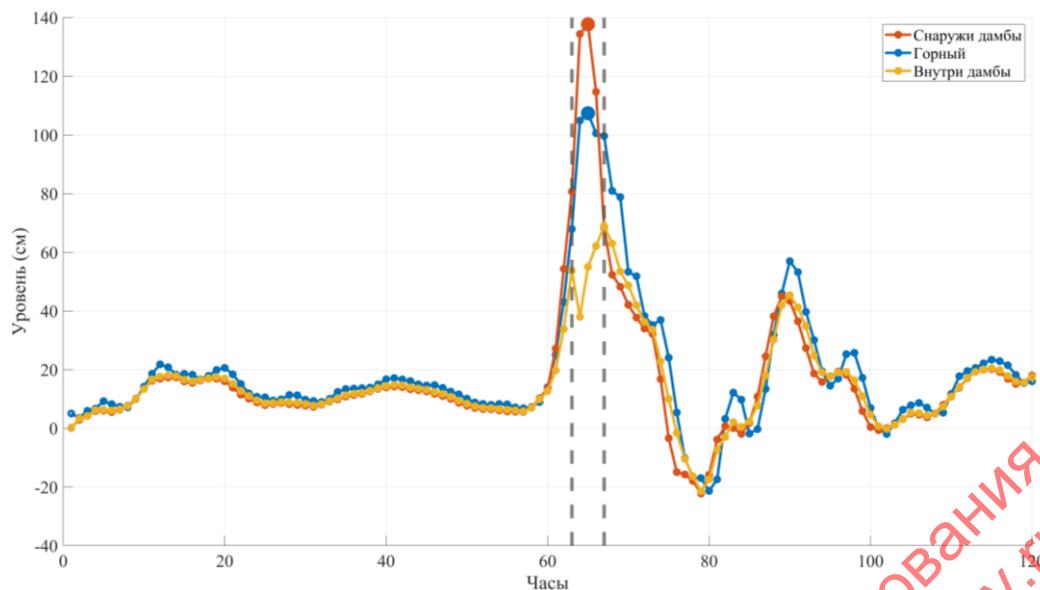


Рисунок 151- Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Большими точками отмечены максимумы у дамбы и Горного (65 час, соответственно). Пунктиром отмечено время закрытия и открытия дамбы (63 и 67 час, соответственно).

При скорости движения циклона 26 м/с, и скорости ветра в циклоне 22м/с, возникает угроза наводнения в Санкт-Петербурге. Уровень моря в Горном (Рисунок 152, Рисунок 153) достигает 175 см, а период нагонной волны 18 часов.

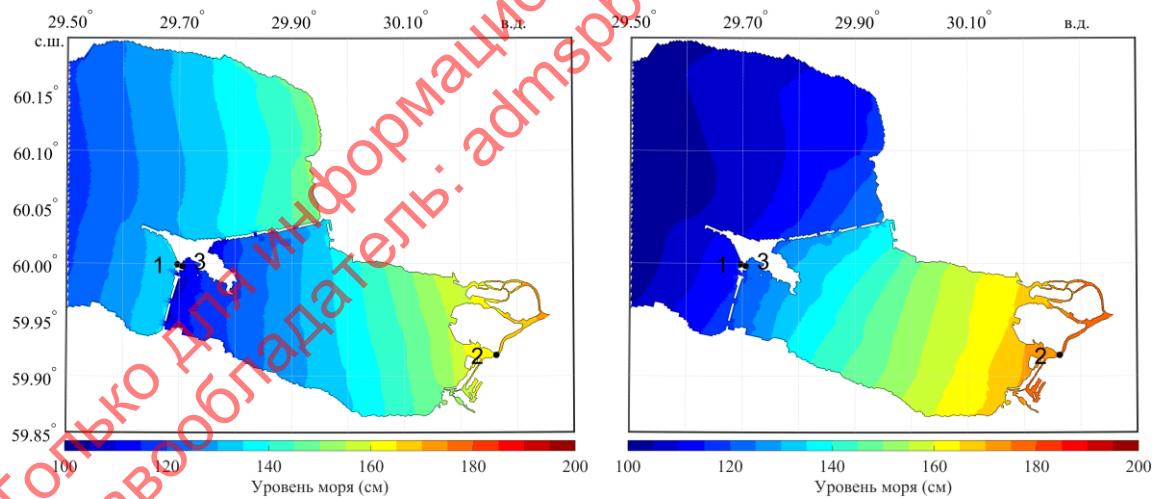


Рисунок 152- Уровень моря (см). Слева – в момент максимума у дамбы (99 час), справа – в момент максимального уровня у Горного (100 час).

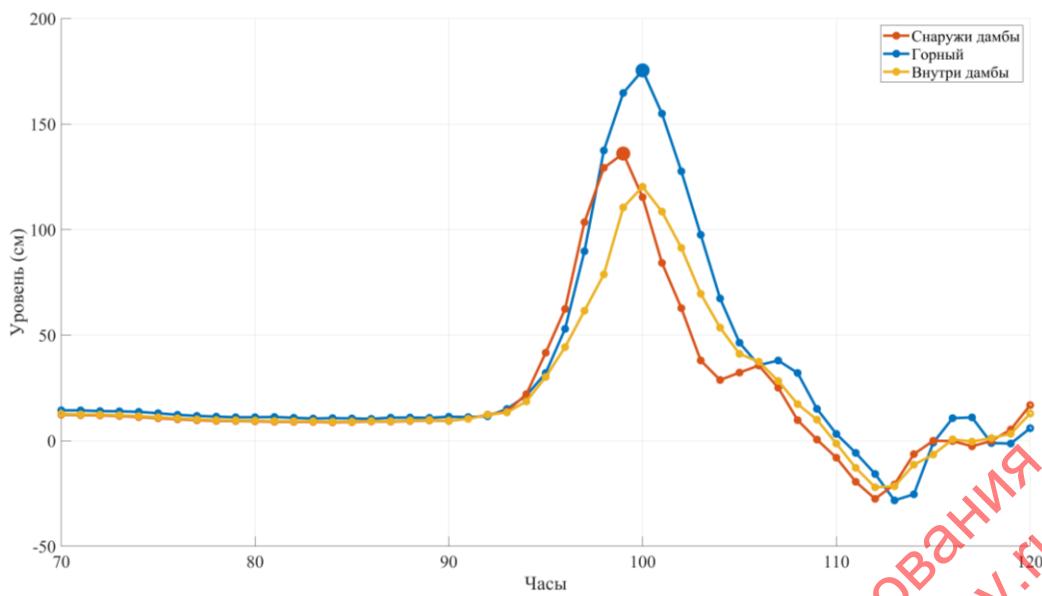


Рисунок 153- Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Большими точками отмечены максимумы у дамбы и Горного (99 и 100 час, соответственно).

Последующие проведенные тесты по закрытию и открытию дамбы показали (Рисунок 154, Рисунок 155) 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 126 см и отмечается на 1.5 часу закрытой дамбы, открытие дамбы производится через 4 часа 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 104 см.

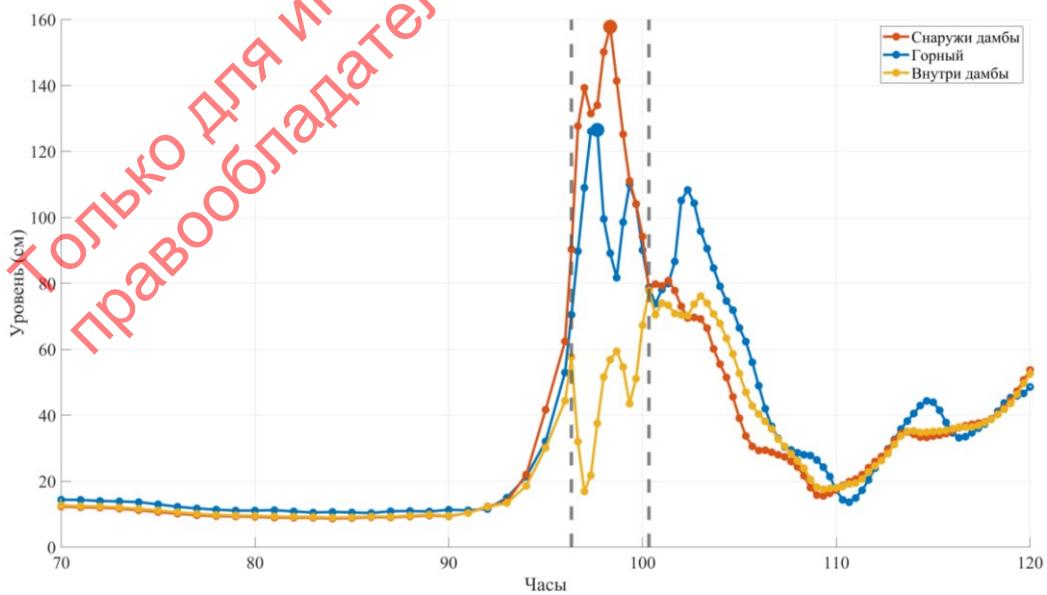


Рисунок 154- Временной ход уровня моря (см). Красным цветом – точка снаружи дамбы, синим – Горный, желтым – точка внутри дамбы. Большими точками отмечены максимумы у дамбы и

Горного (98.33 и 97.66 час, соответственно). Пунктиром отмечено время закрытия и открытия дамбы (96.33 и 100.33 час, соответственно).

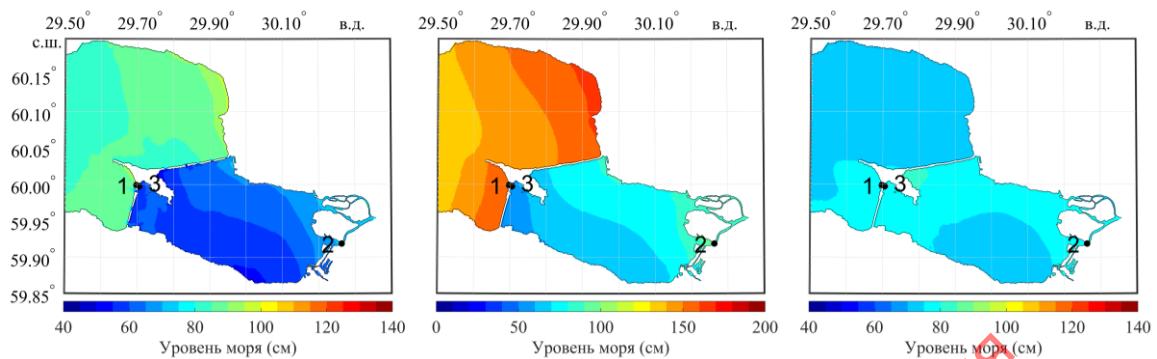


Рисунок 155- Уровень моря (см). Слева – в момент закрытия дамбы (96.33 час), в центре – при максимуме у Горного (97.66 час), справа – в момент открытия дамбы (100.33 час).

Далее представлены графики зависимости максимального значения уровня моря в Горном и других прибрежных станциях в зависимости от скорости циклона (Рисунок 156 Рисунок 157) при открытой и закрытой дамбе. Хорошо видно, что при скорости циклона 15 м/с, отмечаются самые высокие уровни моря в момент наводнения. Для этого эксперимента в момент максимального поднятия уровня моря, на Рисунок 158, представлены значения уровня в сценариях наводнения с открытой дамбой и закрытой. Интерес представляет внешняя сторона дамбы, где за счет закрытия ворот защитного сооружения, уровень моря становится выше, в основном у северного берега, а максимум этой разницы отмечается у начала дамбы с северного берега, достигая 23 см.

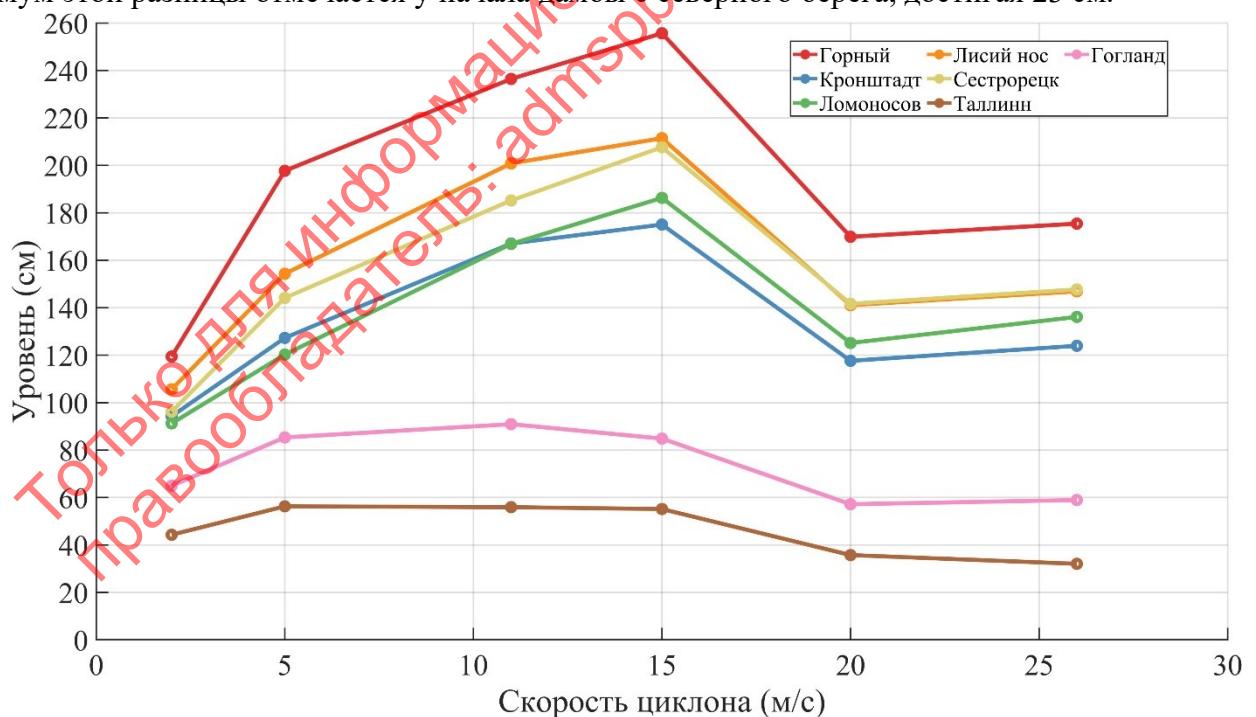


Рисунок 156.- Зависимость скорости циклона и максимального значения уровня моря в различных пунктах Финского залива при открытой дамбе.

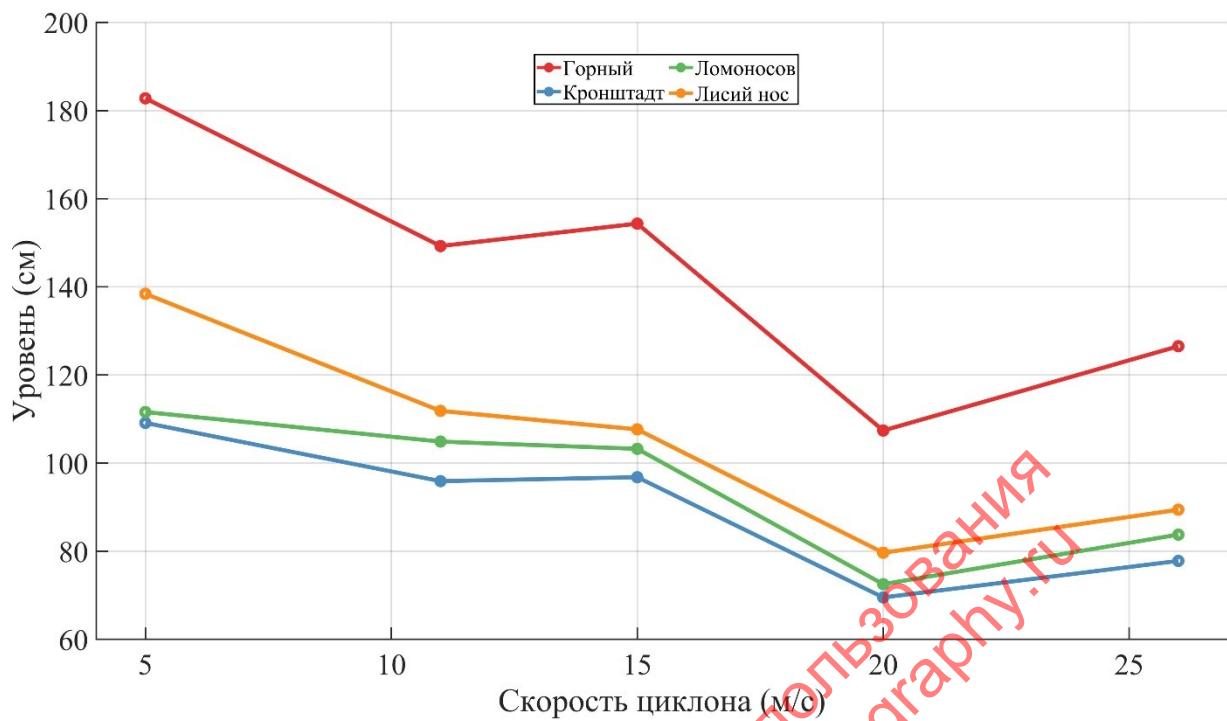


Рисунок 157. - Зависимость скорости циклона и максимального значения уровня моря в различных пунктах Финского залива в условиях работающей дамбы.

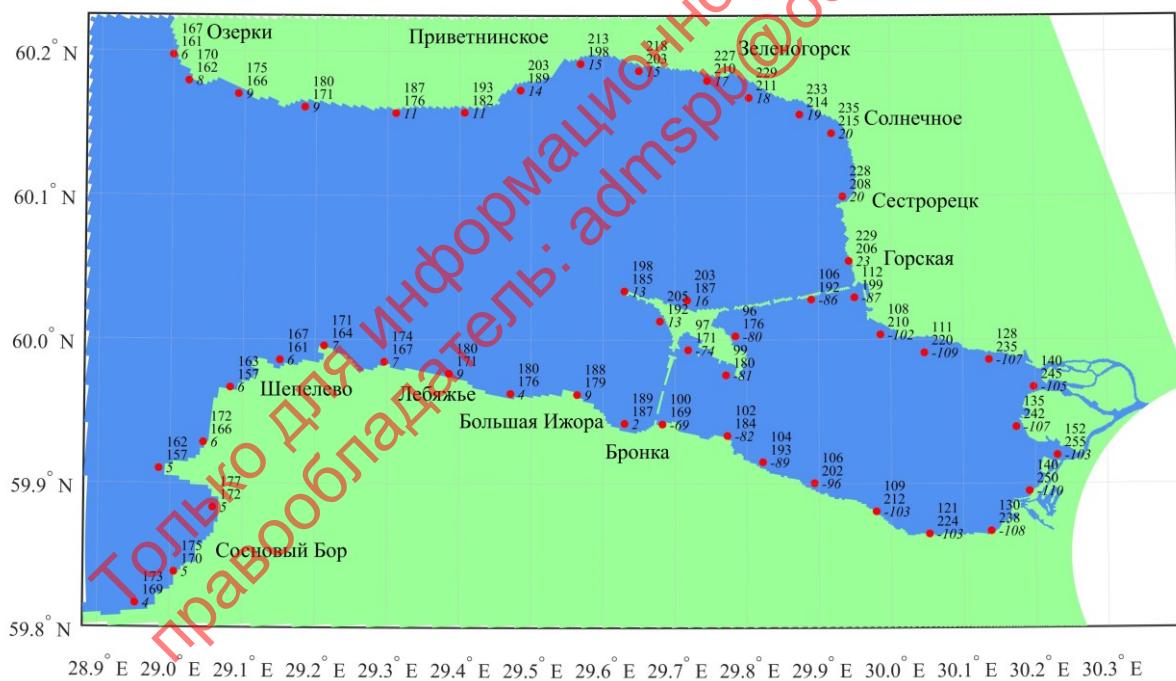


Рисунок 158. - Уровень моря в прибрежных районах в момент максимального подъема уровня в Горном в эксперименте с закрытой дамбой (верхние цифры), открытой дамбой (средние), и разность между ними (нижние).

Возникновение угрозы наводнения происходит при скорости прохождения циклона, выше 2м/с, и 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 большее вероятность возникновения наводнения при закрытой дамбе. Максимальный подъем уровня наблюдается при скорости циклона 15м/с.

Речной сток влияет на уровень воды в акватории только при закрытии дамбы. При этом увеличенный сток Невы ($3000 \text{ м}^3/\text{с}$) относительно среднего, при закрытой дамбе, сокращает время наступления максимума уровня внутри акватории Невы и соответственно длительность периода закрытия дамбы. При этом дамбу не всегда можно открыть при достижении критических значений уровня моря внутри акватории, т.к. с внешней стороны дамбы может наблюдаться еще более высокий уровень моря.

Только для информационного использования
 правообладатель: admspp@oceanography.ru

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Введение в эксплуатацию Комплекса защитных сооружений (КЗС) Санкт-Петербурга 12 августа 2011 года ознаменовало новую эру в истории города, полностью устранив угрозу невских наводнений, которые на протяжении трёх веков наносили колоссальный ущерб инфраструктуре, экономике и жителям города. С момента запуска КЗС в городе не было зафиксировано ни одного значимого наводнения: к 2024 году комплекс предотвратил 37 наводнений (на 30 декабря 2024 г. [1] подъёмы воды, включая особо опасные события 28 ноября 2011 года (2,2 м), три наводнения в 2013 году (2–2,5 м), экстремальный нагон 27 декабря 2015 года (2,8 м), а также нагоны 2017 года (2,1 м) и 2020 года (2,3 м). Общий предотвращённый ущерб, по оценкам, превысил 126 млрд руб. (на август 2022 г.), что подчёркивает экономическую эффективность КЗС и его роль в обеспечении безопасности жителей города и ключевых объектов, включая Большой порт Санкт-Петербурга с грузооборотом 49,6 млн т в год [1,43].

Одним из ключевых элементов КЗС стала Система предупреждения угрозы наводнений (СПУН), разработанная совместно РГГМУ и Университетом ИТМО. СПУН интегрирует данные метеорологических и океанологических моделей высокого разрешения, а также данные с 50 датчиков уровня воды в Невской губе и Финском заливе, обновляемые каждые 10 минут. Это позволяет прогнозировать нагоны за 72 часа с точностью 95%, обеспечивая автоматизированное закрытие затворов за 40 минут. СПУН оснащена резервными генераторами и спутниковой связью, что гарантирует работу при штормах с ветром до 35 м/с. Система также уведомляет порт за 6 часов и прекращает судоходство за 2 часа до закрытия, минимизируя сбои. Первое предотвращённое наводнение 28 ноября 2011 года продемонстрировало возможности СПУН: прогноз зафиксировал нагон 2,2 м из-за западного ветра 25 м/с, угрожавший Васильевскому острову и порту. Закрытие затворов снизило уровень до 1,3 м, защитив 500 тыс. жителей и предотвратив ущерб в 2 млрд рублей. В 2011 году СПУН также предотвратила два нагона: 15 декабря (2,1 м) и 29 декабря (2,0 м), оба вызванные атлантическими циклонами [1,126].

В 2012–2020 годах КЗС ежегодно предотвращал наводнения: в 2012 году — 2 (2,1 м и 2,3 м), 2013 — 3 (2–2,5 м), 2014 — 1 (2,2 м), 2015 — 1 (2,8 м, спасено 5 млрд рублей), 2016 — 3 (2–2,4 м), 2017 — 2 (2,1 м и 2,3 м), 2018 — 1 (2,2 м), 2019 — 2 (2,1 м и 2,4 м), 2020 — 2 (2,3 м и 2,5 м). В 2023 году предотвращено 2 нагона (2,12 м и 2,22 м), а в 2024 — 2 (2,0 м и 1,67 м). Всего на данный момент КЗС остановил 345 нагонов [1,126]. Включая мелкие подъёмы (1,6–2 м), которые могли вызвать локальные подтопления, обеспечивая стабильность для порта и жилых районов. Водный баланс и циркуляция в Невской губе остались практически ненарушенными благодаря водопропускным сооружениям В1–В6, суммарной шириной 1846 м (в 1,5 раза больше устья Невы), которые поддерживают естественные течения. Риск заиливания (15%) нейтрализуется регулярным дноуглублением, а гидрологический режим сохраняет свободное перемещение воды и гидробионтов. Экологический ущерб от КЗС и намывных территорий оказался минимальным, что подтверждается экспертизами и мониторингом [1,54,126].

Намывы, площадью от нескольких десятков гектар в XVIII–XIX веках до 3000 га в XX веке и более 500 га в XXI веке [88], обеспечили прирост территории и пространство для жизни горожан: жильё для сотен тысяч жителей, школы, сады и другие социальные объекты. [127,128]. Следует отметить, что реализация строительства намывных территорий тесно связана с защитой, которую обеспечивает КЗС.

Комплекс Защитных сооружений и намывные территории очерчивают контуры развития Санкт-Петербурга в XXI веке, продолжая традицию Петра I по освоению дельты Невы и развитию Северной столицы России.

В результате исследования были получены сведения о современном гидрологическом режиме Невской губы. Описана многолетняя изменчивость речного стока Невы за период 1945-2022 гг. Колебания среднего расхода характеризуются 2-мя крупными максимумами (1958, 1982 гг.) и минимумами (1973, 2003 гг.), положительным значимым трендом (+1.73 м³/с в год), наличием долгопериодных колебаний на периодах 3-4, 5-6, 13 и 26 лет (амплитуды 125- 225 м³/с). Сезонный сток Невы имеет слабо выраженный максимум с декабря по март; имеется положительная тенденция к росту расхода воды в зимний и весенний сезон. Минимальные годовые отметки демонстрируют последовательный рост на +5.79 м³/с.

Проведён статистический анализ уровня моря Невской губы за период 1971-2022 гг. Временной ход среднего уровня моря имеет несколько явных максимумов (1983, 1989, 2007, 2020 гг.) и один абсолютный минимум (1996 г.), положительный тренд (3,50-3,83 мм/год), усиливающийся к вершине залива. В его многолетнем спектре прослеживаются пики на периодах 1.6, 2.5, 7.4 и 26 лет с амплитудами от 3.5 до 7 см. Сезонный ход уровня дописывается минимумом в июне и максимумом в октябре месяце, причём наибольшее отклонение от средней сезонной величины отмечается зимой (20-29 см), а наименьшее - летом (11 -13 см). Минимальные годовые отметки показывают значительный рост около 4,27-5,63 мм/год. Штормовые нагоны в Невской губе примерно в 90-95% случаев формируются в осенне-зимний период: их повторяемость варьируется от 1 до 36-44 случаев в год, высота достигает 100-270 см, а продолжительность находится в пределах от 1 до 40 часов. С введением в эксплуатацию КЗС (2012 г.) было отмечено общее снижение характеристик штормовых нагонов внутри акватории Невской губы. Приливные колебания уровня в заливе имеют неправильный полусуточный характер: суточные волны амплитудой 2.8-3.0 см незначительно преобладают над полусуточными составляющими 0.7-2.0 см. Максимально возможная высота прилива в Невской губе составляет 10-22 см без учёта долгопериодных гармоник до 30-60 см с включение этих волн в расчёт. Сезонный ход волны M2 характеризуется увеличением амплитуды на 10% в июле-августе и фазы в мае-июне, в то время как соответствующие им минимальные отметки приходятся на декабрь, октябрь-ноябрь, что может быть обусловлено не только гидрологическими, но и атмосферными процессами. В распределении ежечасных данных уровня моря имеется положительная асимметрия, а также отмечен постоянный уклон порядка 10 см, направленный в сторону вершины залива. В последнее десятилетие происходит уменьшение повторяемости высоких отметок уровня >100 см. Внутрисуточный размах колебаний уровня в 65% случаев составляет от 10 до 35 см. Максимальные показания (>100 см) размаха отмечаются, преимущественно, осенью и зимой (около 70-80%), а минимальные (<10 см) – в весенне-летний период (около 70%). В последнее время вследствие работы КЗС происходит сокращение доли высоких (>65 см) и катастрофических (>120 см) значений размаха, соответственно, на 1,6-2,7 % и 0.6-0.8. Проведён статистический анализ уровня воды в различных районах русла Невы за период 1948-2022 гг. В колебаниях среднего уровня воды фиксируется несколько выраженных минимумов (2003, 2014-2015 гг.) и максимумов (1982-1983, 2018 г.). Отмечается последовательное снижение интенсивности колебаний вниз по течению (СКО с 40 до 8-9 см, размах с 140-200 до 30-40 см). В его многолетнем спектре прослеживаются колебания с периодами 4, 6 и 7-8 лет с амплитудой, снижающейся от истока (около 20 см) к устьевой зоне (менее 5 см). Выделено 3 типа сезонного хода среднего уровня: с максимумом в мае-июне и минимумом в ноябре-декабре (верховье Невы), с максимумом в ноябре-феврале и слабым минимумом летом (центральная часть Невы), с однородным в течение года ходом уровня воды (устьевая часть Невы). В последнее десятилетие внутри года повсеместно регистрируется общее понижение верхней границы максимумов уровня воды и одновременное увеличение нижней границы минимумов уровня в зимне-осенний период.

Анализ данных численного моделирования позволил оценить трансформацию гидрологического режима Невской губы под воздействием антропогенной деятельности и естественных факторов. Адекватность применённой модели INMOM, воспроизводящей более 90% дисперсии уровня и течений, обеспечила достоверность оценок влияния Комплекса защитных сооружений, намывных территорий, а также вариаций речного стока и атмосферных условий.

Влияние Комплекса защитных сооружений (КЗС) проявляется следующим образом. Даже при открытых воротах дамба замедляет поступление нагонных вод в Невскую губу, снижая максимальные уровни в Санкт-Петербурге по сравнению со сценарием без дамбы. При закрытии дамбы уровни внутри губы существенно ниже, чем снаружи и чем в сценарии без дамбы. КЗС эффективно защищает город от наводнений, но замедляет спад уровня после пика нагона. Дамба практически не влияет на максимумы уровня с внешней стороны, лишь сдвигает время их наступления. После строительства КЗС изменчивость течений в центральной и восточной части Невской губы снизилась, особенно в осенне-зимний период.

Влияние намывных территорий заключается в том, что при открытой дамбе намывы практически не влияют на уровень моря. Однако при закрытой дамбе они вызывают дополнительный подъём уровня внутри Невской губы: от 1 до 3 см при расходе Невы около 2000 м³/с и от 2 до 5 см при максимальном осенне-зимнем расходе около 4080 м³/с в течение 12–48 часов закрытия. Кроме того, намывы ускоряют достижение наводненческого уровня (161 см у Горного института) на 1–2 часа и увеличивают перекос уровня внутри закрытой акватории. Что касается влияния скорости прохождения циклона, то наиболее опасны циклоны со скоростью перемещения около 11–15 м/с, так как они генерируют максимальные подъёмы уровня в Невской губе (до 255 см при открытой дамбе). Медленные циклоны (2–5 м/с) создают длительный нагон и повышают риск наводнения при закрытой дамбе из-за накопления речного стока. Быстрые циклоны (20–26 м/с) дают короткую, но резкую нагонную волну, при этом перекос уровня внутри закрытой губы может достигать 67–109 см.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. dambaspb.ru [Электронный ресурс] // Дирекция комплекса защитных сооружений г. Санкт-Петербурга. URL: <https://dambaspb.ru/stroitelstvo-kzs> (дата обращения: 06.05.2025).
2. Munthe H. Studies in the Late-Quaternary history of Southern Sweden // Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar. Taylor & Francis Group, 1910.
3. Uścinowicz S. Relative sea level changes, glacio-isostatic rebound and shoreline displacement in the Southern Baltic // Polish Geological Institute Special Papers. 2003. T. Vol. 10. C. 5–79.
4. Vassiljev J., Saarse L. Timing of the Baltic Ice Lake in the eastern Baltic // Bull Geol Soc Finland. 2013. T. 85, № 1. C. 9–18.
5. Mörner N.-A. The Baltic Ice Lake-Yoldia Sea transition // Quaternary International. 1995. T. 27. C. 95–98.
6. Andrén T., Lindeberg G. Evidence of the final drainage of the Baltic Ice Lake and the brackish phase of the Yoldia Sea in glacial varves from the Baltic Sea // Boreas. Wiley, 2002. T. 31. C. 226–238.
7. Andrén T. и др. New insights on the Yoldia Sea low stand in the Blekinge archipelago, southern Baltic Sea // GFF. 2007. T. 129, № 4. C. 277–285.
8. Fredén C. A Historical Review of the Ancylus Lake and the Svea River // Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar. Taylor & Francis, 1967. T. 89, № 3. C. 239–267.
9. Raukas A. Late Quaternary Coastal Records of Rapid Changes in the Eastern Baltic // Journal of Coastal Research. Coastal Education & Research Foundation, Inc., 1996. T. 12, № 4. C. 811–816.
10. Jensen J. B. и др. Early Holocene history of the southwestern Baltic Sea: the Ancylus Lake stage. 1999.
11. Björck S. A review of the history of the Baltic Sea, 13.0-8.0 ka BP // Quaternary International. 1995. T. 27. C. 19–40.
12. Emeis K.-C. и др. The Post-Glacial Evolution of the Baltic Sea // Climate Development and History of the North Atlantic Realm / под ред. Wefer G. и др. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002. C. 205–221.
13. Bitinas A., Damušyte A. The Littorina Sea at the Lithuanian Maritime Region // Polish Geological Institute Special Papers. 2004. T. Vol. 11. C. 37–45.
14. Rößler D. Reconstruction of the Littorina transgression in the Western Baltic Sea. Warnemhunde: Institut für Meereskunde, 2006.
15. Tikkanen M. Glacial and postglacial history of the Baltic Sea and Finland // Finland - land of mires. Helsinki: Finnish Environment Institute, 2006. C. 59–67.
16. Björck S. The late Quaternary development of the Baltic Sea basin // Assessment of climate change for the Baltic Sea Basin / под ред. von Storch H. Springer, 2008. C. 398–407.
17. Ojaveer E. Evolution of the Baltic Sea // Ecosystems and Living Resources of the Baltic Sea: Their assessment and management / под ред. Ojaveer E. Cham: Springer International Publishing, 2017. C. 1–10.
18. Проект «Моря СССР». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР / под ред. Терзиев Ф. С. Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1992. T. 2. 450 с.
19. Rosentau A. и др. The Baltic Sea Basin // Submerged Landscapes of the European Continental Shelf. 1-е изд. / под ред. Flemming N. С. и др. Wiley, 2017. C. 103–133.
20. Ailio J. Die geographische Entwicklung des Ladogasees in postglazialer Zeit und ihre Beziehung zur steinzeitlichen Besiedelung // Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar. 1915. T. 37 (6). C. 655–658.
21. Яковлев С. А. Наносы и рельеф г. Ленинграда и его окрестностей // Известия научно-мелиорационного института. 1926. № 8–9.
22. Субетто Д. А. История формирования Ладожского озера и его соединения с Балтийским морем: 1 // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). Россия, Санкт-Петербург: Общество с ограниченной ответственностью «Центр научно-информационных технологий «Астерион», 2007. № 1. C. 111–120.
23. Szaniawska A. Crustaceans in the History of the Baltic Sea // Baltic Crustaceans / под ред. Szaniawska A. Cham: Springer International Publishing, 2018. C. 1–4.
24. Virtasalo J. J. Late-Weichselian - Flandrian depositional history of the Archipelago Sea, northern Baltic Sea. Turku: Turun Yliopisto, 2006.
25. Зенкевич Л. А. Моря СССР. Их флора и фауна. 2-е изд. Москва: Учпедгиз, 1956.
26. сост. Кружком учащихся в начальных народных училищах г. С.-Петербурга (географич. материал ред. И. Н. Михайловым). Путеводитель по окрестностям С. Петербурга. Образовательные детские прогулки. СПб: Изд. Городской комиссии по народному образованию, 1902.
27. Даринский А. В. География Ленинграда. Ленинград: Лениздат, 1982. C. 34–45.
28. Соколов А. А. Гидрография СССР. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1964.

29. Скриптунов Н. А. и др. Гидрология устьевой области Невы. Москва: Гидрометеоиздат. Моск. отд-ние, 1965.
30. Угренинов Г. Н., Кондратьев А. Н. Генезис Русла Реки Невы // Ученые Записки Российского Государственного Гидрометеорологического Университета. 2011. № 19. С. 46–52.
31. Колесников В. Лоция Невской губы. 3-е изд. Санкт-Петербург: BOAT.UCOZ.ru, 2018.
32. Нежиховский Р. А. Вопросы гидрологии реки Невы и Невской губы. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1988. 224 с.
33. Колесников В. Лоция Невской губы. 3-е изд. Санкт-Петербург: BOAT.UCOZ.ru, 2018.
34. Гиршов М. Л. Яхтенная лоция Невской губы и Восточной части Финского залива. Санкт-Петербург: Лань, 2004.
35. С.-Петербургский морской канал // Всемирная иллюстрация. 1888. Т. 26. С. 297–298.
36. Нежиховский Р. А. Река Нева и Невская губа. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1981. 112 с.
37. Далин О. История Шведского Государства (Перевод с нем. Р. Цебрикова). Ч. I. Кн. 1. 6], II, XXII, 472 с.; Ч. I. Кн. 2. 957 с.; Ч. II. Кн. 1. [8], XXXVI, 626 с. Санкт-Петербург: Императорская типография, 1805. Т. [В 3 ч., в 8 кн.], ч. 2, кн. 1. 626 с.
38. Киприянов. Критический обзор проектов для предохранения С.-Петербурга от наводнения // Журнал Главного управления путей сообщения и публичных зданий. 1858. С. 1–104.
39. Богданов В. И. О репрезентативном каталоге наводнений Невы как фундаментальной научной и практической проблеме (к 300-летию Санкт-Петербурга и Кронштадта) // Известия Русского географического общества. Санкт-Петербург, 2002. Т. 134 (6).
40. Беспятых Ю. Н. Наводнения в Петербурге Петра I. Санкт-Петербург: «Историческая иллюстрация», 2013. 408 с.
41. Рыкачев. О наводнениях в С. Петербурге и о возможности их предсказывать на основании метеорологических наблюдений // Записки по гидрографии. 1898.
42. Малова Т. И. Реставрация данных об исторических наводнениях Невы: принципы построения репрезентативного каталога. Санкт-Петербург: Институт океанологии им. П. П. Ширгова РАН (Санкт-Петербургский филиал), 2021. 408 с.
43. Бухановский А. В. и др. Наводнения в Санкт-Петербурге: история и современность. СПб: Центр распределенных издательских систем Университета ИТМО, 2017. 88 с.
44. Померанец К. С. Несчастья невских берегов: из истории петербургских наводнений. Центрполиграф, 2009. 440 с.
45. Полозов А. В. Морские ворота Петербурга. СПб: Русская коллекция, 2011. 208 с.
46. Лопатухин Л. И., Рубченя А. В. Введение в океанологию. Часть 2. Динамика моря (учебное пособие). СПб: Изд-во ВВМ, 2014. 228 с.
47. Калиужная А. В. Методы и технологии управления неопределенностью прогностических моделей для обеспечения защиты Санкт-Петербурга от наводнений. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2014. 133 с.
48. Сенин В. Т. Ленинград без наводнений. Л33 / под ред. Хрящев Ю. К. Ленинград: Лениздат, 1984. 127 с.
49. Луппов С. П. История строительства Петербурга в первой четверти XVIII века. Москва; Ленинград: Изд-во Академии наук СССР, 1957. 190 с.
50. Bra'zdil R. и др. Historical Floods in Europe in the Past Millennium // Changes in Flood Risk in Europe. IAHS Special Publication 10. 2012. С. 21–166.
51. Лоскутова М. В. «С Божией стихией царям не совладеть»: наводнение 1824 г. и проекты защитных сооружений в Петербурге XIX в. // Социология науки и технологий. Россия, Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова Российской академии наук», 2025. Т. 16, № 2. С. 61–79.
52. Wiebeking K. F. Mémoire sur les moyens de mettre St. Pétersbourg a l'abri des inondations, et d'établir deux grands ports devant cette cité. George Jaquet. Munich, 1833. 54 с.
53. Щекачихин В. И., Полозов А. В. Защита Петербурга от наводнений. История создания: фотографии, события, факты, люди. Vilnius: Standartų spaustuvė, 2014a. Т. 1.
54. Моносов Л. М. и др. Схватка с волной. Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Среда», 2022.
55. Солнцев А. Постановление ЦК КПСС и Совета министров СССР от 02.08.1979 «О строительстве сооружений защиты г. Ленинграда от наводнений» [Электронный ресурс] // Электронная библиотека исторических документов. 2024. URL: <https://www.newspapers.historyrussia.org/>.

56. Полищук И. В., Другачук Д. А. 11 лет без наводнений. Как работает Комплекс защитных сооружений. Санкт-Петербурга. 2022. С. 31–45.
57. Терещенков И. И. Экологические Последствия Широкомасштабных Гидростроительных Преобразований В Финском Заливе // Вопросы Рыболовства. 2011. Т. 12, № 4 (48). С. 715–729.
58. Нежиховский Р. А. Река Нева и Невская губа. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1981. С. 112.
59. Щекачихин В. И., Полозов А. В. Защита Петербурга от наводнений. История создания: фотографии, события, факты, люди. Vilnius: Standartų spaustuvė, 2014c. Т. 3.
60. Административное резюме. Комплекс Защитных Сооружений Санкт-Петербурга. Анализ экологического воздействия. НЕДЕКО, 2002.
61. Щекачихин В. И., Полозов А. В. Защита Петербурга от наводнений. История создания: фотографии, события, факты, люди. Vilnius: Standartų spaustuvė, 2014b. Т. 2.
62. Васильевский А. Г. Из истории строительства комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений вклад ВНИИГ им. б. е. Веденеева в создание КЗС // Гидротехника. 2009. № 1. С. 32–33.
63. Михайленко Р. Р. Комплекс Защитных Сооружений Санкт-Петербурга От Наводнений Как Природно-Техническая Система Для Интегрированного Управления Водными Ресурсами: Социальная, Экономическая И Экологическая Значимость // Биосфера. 2015. Т. 7, № 1. С. 1–25.
64. Махотаева М. Ю. Динамика экономического роста регионов и его влияние на развитие регионов СЗФО: 3 (79) // Региональная экономика и управление: электронный научный журнал. Россия, Киров: Общество с ограниченной ответственностью «Международный центр научно-исследовательских проектов», 2024. № 3 (79). С. 11.
65. Судооборот «Большого порта Санкт-Петербург» в 2023 году составил около 32,5 тысяч судозаходов [Электронный ресурс] // Медиапалуба. 2024. URL: <https://paluba.media/news/180058> (дата обращения: 09.05.2025).
66. Грузооборот морских портов России за январь-декабрь 2023 г. | Ассоциация морских торговых портов [Электронный ресурс]. 2024. URL: <https://web.archive.org/web/20240125110446/https://www.morport.com/rus/news/gruzooborot-morskikh-portov-rossii-za-yanvar-dekabr-2023-g> (дата обращения: 09.05.2025).
67. nch-spb.com [Электронный ресурс] // nch-spb.com. URL: <https://nch-spb.com/about/value/> (дата обращения: 09.05.2025).
68. Павловский А. А., Менжулин Г. В. Изменения климата и оценка перспективы использования в петербургском градостроении искусственных намывных территорий // Труды Главной Геофизической Обсерватории Им. А.и. Войкова. 2019. № 593. С. 70–84.
69. Home - MOSE Venezia [Электронный ресурс]. URL: <https://mosevenezia.eu/> (дата обращения: 16.05.2025).
70. Ciampa F. и др. Flood Mitigation in Mediterranean Coastal Regions: Problems, Solutions, and Stakeholder Involvement: 18 // Sustainability. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021. Т. 13, № 18. С. 10474.
71. Brackel L. (PDF) Continuous Negotiation in Climate Adaptation: The Challenge of Co-Evolution for the Capability Approach to Justice // ResearchGate. 2025.
72. Алахверди А. А. Краткий очерк истории гидротехнических сооружений Нидерландов. Пространство и Время, 2016. 239–251 с.
73. GOV.UK [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gov.uk/> (дата обращения: 30.04.2025).
74. Семенцов С. В., Акулова Н. А. Формирование Санкт-Петербургской агломерации в XVIII веке: 11 // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. Россия, Белгород: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», 2018. № 11. С. 61–75.
75. Померанец К. С. Три века петербургских наводнений. (Серия «Три века Петербурга»). Санкт-Петербург: Искусство - СПб, 2005. 214 с.
76. 300 лет петербургского намыва [Электронный ресурс] // ФОНТАНКА.ру - новости Санкт-Петербурга. 2012. URL: <https://www.fontanka.ru/2012/04/20/080/> (дата обращения: 01.05.2025).
77. Лавров Л. П., Молоткова Е. Г., Перов Ф. В. Намывные земли Васильевского острова на старте урбанизации III тысячелетия // Вестник Гражданских Инженеров. 2021. № 1 (84). С. 14–26.
78. Окрестности Петербурга - Карты местности: Санкт-Петербург, Ленинградская область, Петербургская губерния, Ленинград, Петроград [Электронный ресурс]. URL: <https://www.aroundspb.ru/karty.html> (дата обращения: 01.05.2025).
79. Планы и карты Санкт-Петербурга XVIII-XIX веков [Электронный ресурс]. URL: https://panevin.ru/blog/plani_i_karti_sankt-peterburga_xviii-xix.html (дата обращения: 01.05.2025).

80. Старые карты Санкт-Петербурга и Ленинградской области - ЭтоМесто [Электронный ресурс]. URL: <http://www.etomesto.ru/peterburg/> (дата обращения: 01.05.2025).
81. Решение Ленгорисполкома о проекте Генплана развития Ленинграда на 1966 – 1980 гг. 22 апреля 1964 г.: Ф. 7384., Оп. 42., Д. 383. 1964. С. 118–120.
82. Постановление Совета министров СССР «О генеральном плане развития г. Ленинграда» 15 июля 1966 г. № 542 [Электронный ресурс] // Электронная библиотека исторических документов (ЭБИД) / пер. Тимофеев В. 1966. URL: <https://docs.historyrussia.org/ru/nodes/413799-postanovlenie-soveta-ministrov-sssr-o-generalnom-plane-razvitiya-g-leningrada-15-iyulya-1966-g-locale-nil-542#mode/inspect/page/7/zoom/4> (дата обращения: 16.05.2025).
83. Фролов А. И. Санкт-Петербург от А до Я: Реки каналы острова мосты набережные. 2-е издание изд. Санкт-Петербург: Издательство «Глагол», 2009. 222 с.
84. История и описание Парка — Парк 300-летия Санкт-Петербурга [Электронный ресурс]. URL: <http://park300spb.ru/%d0%b8%d0%bd%d1%84%d0%be%d1%80%d0%bc%d0%b0%d1%86%d0%b8%d1%8f%d0%b8%d1%81%d1%82%d0%be%d1%80%d0%b8%d1%8f%d0%b8-%d0%be%d0%bf%d0%b8%d1%81%d0%b0%d0%bd%d0%b8%d0%b5-%d0%bf%d0%b0%d1%80%d0%ba%d0%b0/> (дата обращения: 23.08.2025).
85. Пассажирский порт Санкт-Петербург [Электронный ресурс]. URL: https://www.portspb.ru/O_porte/about/stat_new (дата обращения: 15.05.2025).
86. Лавров Л. П., Перов Ф. В. Морской фасад как часть городского центра Санкт-Петербурга XXI века - неиспользованный потенциал // Academia. Архитектура И Строительство. 2019. № 2. С. 83–91.
87. Макарова С. В. Экологические последствия создания намывных территорий // rjae. Tatarstan Academy of Sciences, 2024. № 2. С. 19–27.
88. Павловский А. А., Менжулин Г. В. Изменения климата и оценка перспективы использования в петербургском градостроении искусственных намывных территорий // Труды Главной Геофизической Обсерватории Им. А.и. Войкова. 2019. № 593. С. 70–84.
89. Уварова Е. Л., Павлова В. А. Комплексная организация намывных территорий в Санкт-Петербурге // Вестник Стегит (сибирского Государственного Университета Геосистем И Технологий). 2023. Т. 28, № 3. С. 92–108.
90. Lilly J. M., Olhede S. C. Higher-Order Properties of Analytic Wavelets // IEEE Trans. Signal Process. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2009. Т. 57, № 1. С. 146–160.
91. Захарчук Е. А., Сухачев В. Н., Тихонова Н. А. Штормовые нагоны в Финском заливе Балтийского моря // Вестник Санкт-Петербургского Университета. Науки О Земле. 2021. Т. 66, № 4. С. 781–805.
92. Сухачев В. Н. Штормовые нагоны в Финском заливе Балтийского моря. Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. Санкт-Петербург: СПбГУ, 2023. 119 с.
93. Терзиев Ф. С., Рожков В. А., Смирнова А. И. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1992. Т. Т. 3. Балтийское море.
94. Медведев И. П., Рабинович А. Б., Куликов Е. А. Приливные колебания в Балтийском Море // Океанология. 2013. Т. 53, № 5. С. 596.
95. Войнов Г. Н. Новые сведения о приливах в Финском заливе Балтийского моря // Ученые Записки Российского Государственного Гидрометеорологического Университета. 2018. № 53. С. 83–96.
96. Войнов Г. Н. Общая характеристика приливов на основе новых значений гармонических постоянных в Финском заливе // Ученые Записки Российского Государственного Гидрометеорологического Университета. 2019. № 56. С. 81–97.
97. Courtier A. Classification of tides in four types // The International Hydrographic Review. 1939. С. 50–58.
98. Репинская Н. Г., Май Р. И. Характеристики приливов в Мировом океане по данным глобальных приливных моделей // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2024. Т. 69, № 4.
99. Kulikov E., Medvedev I., Koltermann K. Baltic sea level low-frequency variability // Tellus. 2015. Т. 67.
100. Войнов Г. Н. Приливные явления в Карском море. : СПб: изд-во Русского географического общества, 1999.
101. Гордеева С. М., Малинин В. Н. Изменчивость морского уровня Финского залива. СПб: Изд. РГГМУ, 2014. 179 с.
102. Karimi A. Multidecadal Sea Level Variability in the Baltic Sea and Its Impact on Acceleration Estimations // Front. Mar. Sci. Frontiers, 2021. Т. 8.
103. Lisitzin E. Sea-Level Changes. Amsterdam ; New York: Elsevier Scientific Pub. Co, 1974. 286 с.
104. Медведев И. П., Рабинович А. Б., Куликов Е. А. Полюсный Прилив В Балтийском Море // Океанология. 2014. Т. 54, № 2. С. 137.

105. Медведев И. П. и др. Чандлеровские Биения И Полосный Прилив В Северном И Балтийском Морях // Гелиогеофизические Исследования. 2018. № 18. С. 9–17.
106. Максимов И. В., Карклин В. П. Полосный прилив в Балтийском море // Доклады Академии наук СССР. 1965. Т. 161, № 3. С. 580–582.
107. Samuelsson M., Stigebrandt A. Main characteristics of the long-term sea level variability in the Baltic sea // Tellus A. 1996. Т. 48, № 5. С. 672–683.
108. Stramska M. Temporal variability of the Baltic Sea level based on satellite observations // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2013. Т. 133. С. 244–250.
109. Medvedev I., Kulikov E. Low-Frequency Baltic Sea Level Spectrum // Front. Earth Sci. Frontiers, 2019. Т. 7.
110. Pham N. T. и др. Interannual sea level variability in the North and Baltic seas and net flux through the Danish straits // Ocean Dynamics. 2024. Т. 74, № 8. С. 669–684.
111. Plag H.-P. Temporal variability of the seasonal sea-level cycle in the North Sea and Baltic Sea in relation to climate variability // Global and Planetary Change. 1999. Т. 20, № 2. С. 173–203.
112. Hünicke B., Zorita E. Trends in the amplitude of Baltic Sea level annual cycle: 1. Stockholm University Press, 2008. Т. 60, № 1. С. 154–164.
113. Медведев И. П. Сезонные колебания уровня Балтийского моря // Метеорология И Гидрология. 2014. № 12. С. 42–54.
114. Barbosa S. M. Long-term changes in the seasonality of Baltic sea level // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2016. Т. 68, № 1. С. 30540.
115. Cheng Y., Xu Q., Li X. Spatio-temporal variability of annual sea level cycle in the Baltic Sea // Remote Sensing. MDPI, 2018. Т. 10, № 4. С. 528.
116. Захарчук Е. А. и др. Стационарное и нестационарное описание сезонной изменчивости уровня Балтийского моря по данным метеографических измерений // Морской Гидрофизический Журнал. 2022. Т. 38, № 6 (228). С. 655–678.
117. Захарчук Е. А. и др. Сравнительное Влияние Гидрометеорологических Процессов На Межгодовую Изменчивость Сезонных Колебаний Уровня Балтийского Моря // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. Т. 24, № 4. С. ES4013.
118. Vestøl O. и др. NKG2016LU: a new land uplift model for Fennoscandia and the Baltic Region // J Geod. 2019. Т. 93, № 9. С. 1759–1779.
119. Häkli P. и др. NKG2020 transformation: An updated transformation between dynamic and static reference frames in the Nordic and Baltic countries // Journal of Geodetic Science. De Gruyter Open Access, 2023. Т. 13, № 1.
120. Zalesny V. B. и др. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2012. Т. 27, № 1.
121. Дианский Н. А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. Москва: Физматлит, 2013. С. 272272 с.
122. Гусев А. В. и др. Модель циркуляции океанов и морей INMOM: от истоков до наших дней. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2025. Т. 61, № 3. С. 305–323.
123. Brydon D., Sun S., Bleck R. A new approximation of the equation of state for seawater, suitable for numerical ocean models // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1999. Т. 104, № C1.
124. Аверкиев А. С., Клеванный К. А. Определение траекторий и скоростей циклонов, приводящих к максимальным подъемам воды в Финском заливе // Метеорология и гидрология. 2007. Т. 8. С. 55–63.
125. Hersbach H. и др. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Т. 146, № 730.
126. Бухановский А. В. и др. Наводнения в Санкт-Петербурге: история и современность. СПб: Центр распределенных издательских систем Университета ИТМО, 2017.
127. Суворова А. А., Веретенникова К. В. Роль намывных территорий в развитии Санкт-Петербурга: 11–4 (86) // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. Россия, Новосибирск: Общество с ограниченной ответственностью «Капитал», 2023. № 11-4 (86). С. 111–114.
128. Уварова Е. Л., Павлова В. А. Комплексная организация намывных территорий в Санкт-Петербурге: 3 // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). Россия, Новосибирск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», 2023. Т. 28, № 3. С. 92–108.