

556.53

И43

Р. А. Нежиховский

Вопросы гидрологии
реки Невы
и Невской губы



стр. 146 Q.

**ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока**

Тип. им. Котлякова. 4 -- 7 500 000 1985 г. ЛГ 087-01-589.
Изд. 1-е 51 к за 1983 г.

556.53

H43

Государственный комитет СССР
по гидрометеорологии и контролю природной среды

Государственный ордена Трудового Красного Знамени
Гидрологический институт

Р. А. Нежиховский

Вопросы гидрологии
реки Невы
и Невской губы

145813



Ленинград Гидрометеоиздат 1988

УДК 556.53 (471.23)

В предлагаемой вниманию читателя книге излагаются сведения о водном, ледовом и отчасти химическом режиме р. Невы и Невской губы. Основой для написания книги послужили материалы научных исследований ГГИ по гидрологическому обоснованию ряда проектов; широко использованы также литературные источники. Повсеместно указывается на ожидаемые изменения режима при реализации упомянутых проектов.

Книга рассчитана на специалистов различных профилей (проектировщиков, строителей, эксплуатационников), деятельность которых так или иначе связана с р. Невой и Невской губой.

Н $\frac{1903030200-006}{069(02)-88}$ 10-87(1)

© Государственный
гидрологический
институт (ГГИ),
1988 г.

Предисловие

Своеобразие режима, важное народнохозяйственное значение, близость к Петербургу-Ленинграду — все это предопределило большой интерес многих поколений русских и советских ученых к водной системе Ладожское озеро — р. Нева — Невская губа. Ныне Нева — одна из наиболее изученных рек страны: ей посвящено почти 250 публикаций; еще около 100 публикаций имеется по Ладожскому озеру и Невской губе. Тем не менее фронт научных исследований продолжает расширяться, и это лишний раз свидетельствует о безграничности процесса познания окружающей природы.

В предлагаемой вниманию читателей книге в сжатом виде изложены многие важные сведения, которые за последние два столетия накопила гидрологическая наука о водном, ледовом, термическом и отчасти химическом режиме р. Невы и Невской губы.

При подготовке книги, помимо литературных источников, широко использованы материалы научных исследований, выполненных ГГИ в течение 1966 — 1981 гг. по гидрологическому обоснованию ряда проектов в Ленинграде и ближайших пригородах.

При изложении материала повсеместно подчеркивается различие между естественными (современными) и проектными (будущими) условиями. Такое расположение материала наилучшим образом отвечает потребностям сегодняшнего дня. Современные условия (до 1980 — 1982 гг.) отождествляются с естественными на том основании, что если не считать качества воды и отчасти ледового режима мелких рукавов невской дельты, то в остальном хозяйственная деятельность человека мало отразилась на режиме р. Невы и Невской губы. Термин "проектные условия" применяется к ситуации, которая сложится в будущем при окончании работ по возведению комплекса сооружений для защиты Ленинграда от наводнений, завершении строительства централизованных очистных сооружений и возможных отъемах части речного стока.

Водные ресурсы невиско-ладожского бассейна намного превосходят потребности народного хозяйства на самую дальнюю перспективу. В то же время в южных засушливых районах страны ощущается острый дефицит воды. Это обстоятельство послужило принципиальной основой для рассмотрения в научном плане возможности начальных этапов отъемов речного стока.

В книге обобщены материалы гидрологических наблюдений по 1980 г. включительно. При наличии, например, 284-летнего периода наблюдений по максимальным уровням (с 1703 г.) или 128-летнего периода по стоку воды (с 1859 г.) добавление последних семи лет (1981 — 1986 гг.) практически ничего не может изменить, тем более, что эти годы не были экстремальными. Положение с гидрохимическими

характеристиками несколько иное. Здесь рассматриваются лишь данные за 1968 — 1980 гг., когда антропогенное влияние на водную систему было максимальным. Гидрохимические характеристики за этот период отличались от тех, что имели место в прошлом.

Научные исследования по невиско-ладожской водной системе продолжают сейчас многими организациями. Они, как правило, уже не касаются тех вопросов, которые изложены в настоящей монографии. Основное внимание уделяется антропогенным изменениям качества воды и вообще экологическим условиям.

Приводимые в книге разнообразные характеристики р. Невы и Невской губы по гидрографии и морфометрии, водному и ледовому режиму, химизму и волнению могут быть использованы при проектировании мостов, набережных, водозаборов, причалов и других сооружений, при планировании работы речного и морского флота, проведении спортивных, туристических и других оздоровительных мероприятий.

В решении отдельных вопросов автору помогли: Р. Я. Алексеенко (раздел 3), Г. В. Ардашева (разделы 3 и 4), В. А. Бузин (раздел 7), М. А. Жукова (раздел 6), Н. П. Саковская (раздел 2).

Общие сведения

В настоящем разделе приводятся лишь те общие сведения, которые нужны для правильного понимания особенностей водного, ледового, термического и химического режима р. Невы и Невской губы. Сведения эти представляют также интерес для специалистов водного транспорта, рыбного хозяйства, промышленного и коммунального водоснабжения и других отраслей народного хозяйства.

1.1. Бассейн р. Невы

Бассейн р. Невы расположен в северо-западной части Европейской территории СССР и юго-восточной части Финляндии. В пределах СССР находится 4/5 бассейна, в пределах Финляндии — 1/5. Большая часть бассейна расположена к северу от самой Невы (рис. 1.1). По характеру рельефа весь бассейн Невы примерно по линии Выборг—Приозерск—Петрозаводск—Усть-Видлица делится на две большие области. К югу от этой линии простирается слабопересеченная равнина с мягким холмистым рельефом, к северу местность сильно пересечена.

В бассейне Невы насчитывается около 50 000 разнообразных озер и среди них величайшие озера Европы — Ладожское и Онежское с площадью водного зеркала соответственно 17 680 и 9630 км². К другим крупным озерам относятся оз. Сайма на территории Финляндии (площадь зеркала 4400 км²) и оз. Ильмень (площадь 1160 км²). В бассейне насчитывается также 60 000 рек общей протяженностью 160 000 км, т. е. в среднем 0,7 км на 1 км² суши. Основными составляющими неевского бассейна являются водосборы трех самых крупных притоков Ладожского озера — реки Свирь, вытекающей из оз. Онежского, и рек Волхов и Вуокса, берущих начало первая из оз. Ильмень, вторая — из оз. Сайма. На долю указанных трех рек приходится 83,1 % площади всего неевского бассейна (табл. 1.1).

Бассейн р. Невы обладает рядом примечательных особенностей, благодаря которым Нева в отличие от других равнинных рек получает не только обильное, но главное довольно равномерное питание в течение всего года. К числу этих особенностей относятся:

- 1) большая озерность бассейна. Суммарная площадь всех



Рис. 1.1. Бассейн р. Невы.

I — Онежско-Свирский бассейн, II — Сайма-Вуоксинский бассейн, III — Ильмень-Волховский бассейн, IV — бассейн средних и малых притоков Ладожского озера, V — Ладожское озеро, VI — частный бассейн р. Невы между истоком и устьем.

Таблица 1.1

Составные части бассейна р. Невы

Номер части (по рис. 1.1)	Наименование части бассейна	Площадь бассейна	
		км ²	% от всего бассейна
I	Бассейн р. Свири (Онежско-Свирский бассейн)	84 000	30,1
II	Бассейн р. Вуоксы (Сайма-Вуоксинский бассейн)	68 700	24,4
III	Бассейн р. Волхова (Ильмень-Волховский бассейн)	80 200	28,6
IV	Бассейн средних и малых притоков Ладожского озера	24 670	8,7
V	Ладожское озеро (вместе с островами)	18 130	6,4
VI	Частный бассейн р. Невы между истоком и устьем	5 000	1,8
	Весь бассейн	281 000	100,0

озер 48 000 км², или 17 % площади бассейна, общий объем воды в них 1 350 км³ (в 17 раз больше годового стока Невы);

2) значительная протяженность бассейна с севера на юг (около 1100 км). Весной таяние снега в северных районах бассейна начинается на две-три недели позже, чем в южных. Само снеготаяние на севере, где лесистость обычно составляет 80—90 %, протекает медленнее, чем на юге (лесистость 15—20 %);

3) влажность климата, короткое прохладное лето, длинная зима с довольно частыми оттепелями.

В силу отмеченных особенностей климата и гидрографии бассейна Нева является очень полноводной рекой с высокой

степенью зарегулированности не только водного, но также термического и химического режимов.

1.2. Ладожское озеро

Ладожское озеро — самое большое в Европе и второе по величине (после Байкала) пресноводное озеро СССР. Площадь его водного зеркала без островов $17\,680\text{ км}^2$, вместе с островами $18\,130\text{ км}^2$. Длина 219 км, средняя ширина 83 км. В плане озеро имеет форму, близкую к эллипсу. В южной половине озера находятся три широких, вдающихся в сушу залива, называемых губами — Свирская, Волховская, Шлиссельбургская (бухта Петрокрепость).

В котловине озера заключен громадный объем воды — 908 км^3 , что почти в 12 раз превосходит годовой сток р. Невы ($78,9\text{ км}^3$). Объем призмы выше порога разлива (0,0 м БС) около 83 км^3 , или 9 % всего объема (при среднем уровне 4,84 м БС). Котловина озера делится на две части — северную, глубоководную (до 230 м), и южную, мелководную (до 40 м). В западных и восточных частях озера изобата 3 м отходит от берега на 1—2 км, в южной — на 5—10 км.

В Ладожском озере насчитывается около 650 островов. Расположены они, как правило, отдельными группами. Самые большие группы — Валаамская (50 островов) и Мантсинсаринская (40 островов). Площадь некоторых островов достигает 140 км^2 (Риеккалансари, Мантсинсари).

В северной части берега озера имеют шхерный характер: они высокие и обрывистые, сильно изрезаны; здесь много фиордов, бухт, заливов. В южной части берега низкие, большей частью заболоченные.

В озеро впадают три крупные реки — Свирь, Вуокса и Волхов, несколько десятков средних рек и более сотни малых. Реки Свирь, Вуокса и Волхов дают 84 % воды, притекающей в озеро. Вытекает из озера только р. Нева.

Свое начало Нева берет в юго-западном углу Шлиссельбургской губы (бухта Петрокрепость) — самой большой на озере (рис.1.2). Граница между губой и озером проходит по линии мыс Морьян Нос — мыс Пайгач. Длина губы с севера на юг 24 км, ширина с запада на восток 28 км, площадь водного зеркала 600 км^2 .

Исток р. Невы отделен от Шлиссельбургской губы широкой отмелью, представляющей собой сложную систему песчаных мелей и банок с рассеянными повсюду камнями и валунами, образующих местами сплошные гряды. В плане



Рис. 1.2. Шлиссельбургская губа Ладожского озера (бухта Петрокрепость).

отмель имеет вид сужающейся воронки с островом Орешек в вершине. Отмель перегораживает Шлиссельбургскую губу с севера на юг, ширина ее около 8 км, глубина на отмели 1,8–3,0 м. В 1902–1908 гг. для улучшения судоходных условий через отмель была сделана искусственная прорезь, называемая Кошкинским фарватером; длина прорези 6,8 км, ширина по дну 80–90 м, отметки дна 0,0 м БС и ниже.

Берега Шлиссельбургской губы малоизрезанные, низкие, отмельные. В губе имеются три небольшие группы островов — Зеленцы, Кареджи, Кировядь. Острова кареджинской группы соединены с берегом песчаной косой, которая то заливается водой, то обнажается.

1.3. Река Нева

Река Нева вытекает из мелководной Шлиссельбургской губы (бухты Петрокрепости) Ладожского озера и впадает



Рис. 1.3. Река Нева от истока до устья.

в Невскую губу Финского залива (рис.1.3). Начинается река двумя рукавами, отекая небольшой продолговатый остров Орешек, или Ореховый. Истоком реки принято считать створ против бывших пороховых заводов в г. Петрокрепости, устьем — створ против Невских ворот Морского торгового порта у входа из Большой Невы в Гутуевский ковш. Длина реки 74 км, площадь водосбора в истоке 276 000 км², в устье — 281 000 км². Собственный водосбор р. Невы (5 000 км²) составляет менее 2 % всей площади бассейна.

В Неву впадает 26 небольших рек, наиболее значительные из них — Мга, Тосна, Ижора, Славянка, Охта.

Река Нева протекает по дну широкой (30–50 км) долины глубиной 40–100 м, называемой Приневской низменностью. Берега реки крутые, местами обрывистые. Средняя высота берегов 6–9 м, в начале дельты 2–3 м, в самом устье 1,5–2,5 м. Русло устойчивое. Преобладающая ширина 400–600 м, наибольшая 1,250 м. Глубина на фарватере 8–11 м наибольшая глубина (24 м) наблюдается против Арсенальной улицы в Ленинграде, наименьшая (4,0–4,5 м) — на Ивановских порогах. Общее падение (от истока до устья) колеблется от 3,4 до 6,6 м. Поверхностная скорость течения на стрежне 1,0–1,3 м/с, на Ивановских порогах — 2,5–3,0 м/с.

В отличие от других равнинных рек Нева не имеет поймы. Дно реки преимущественно песчаное и песчано-илистое,

на строжне глинистое с примесью гальки и валунов.

На берегах Невы расположены четыре города: Петрокрепость, Кировск, Отрадное, Ленинград и около 30 других населенных пунктов. Берега реки на 70 % своей длины почти сплошь застроены.

В нижнем течении река образует дельту, которая сейчас состоит из 42 островов и 45 рек и каналов (рис. 1.4). На

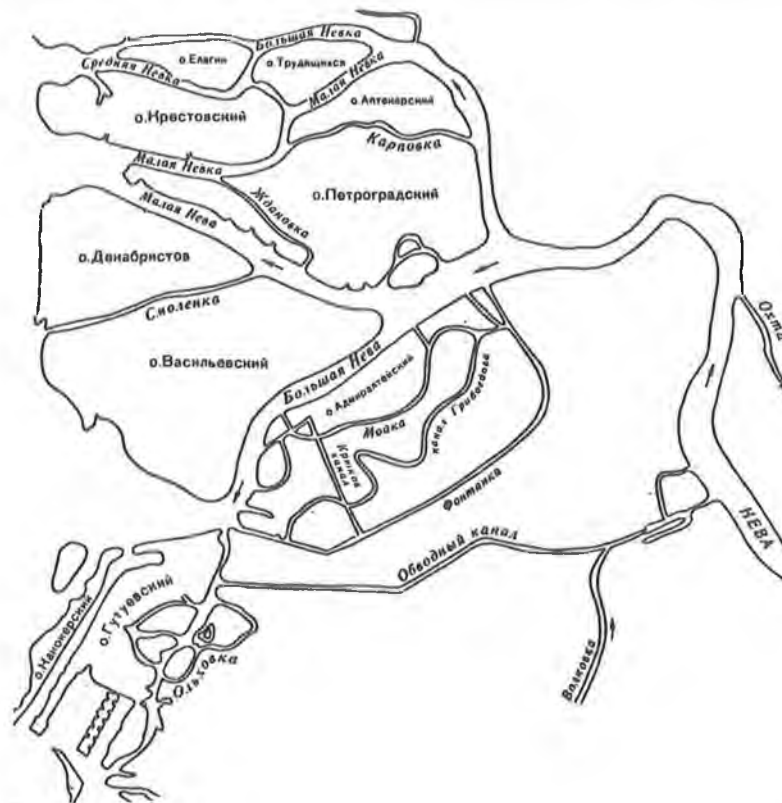
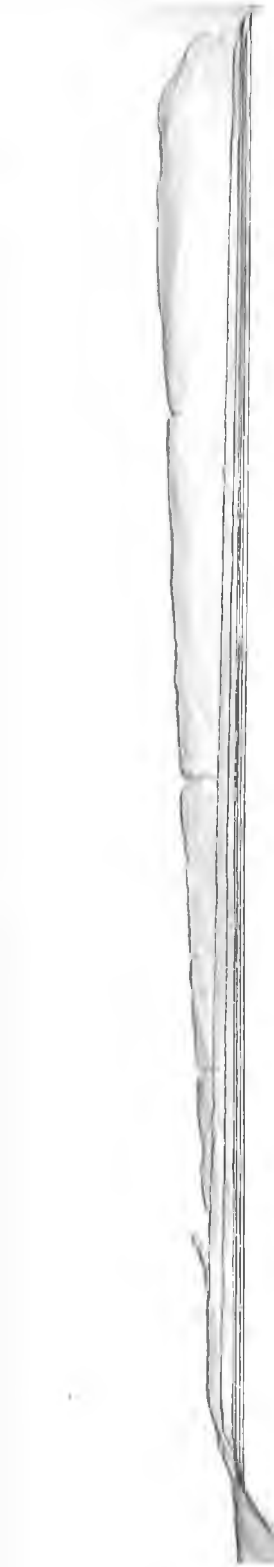


Рис. 1.4. Дельта р. Невы

островах невской дельты расположена наиболее старая и густонаселенная часть Ленинграда. В юго-восточной части дельты находится Морской торговый порт.

Границей дельты с севера служит р. Большая Невка, с юга — Обводный канал и с юго-запада — р. Екатерингофка и Угольный мол. Со стороны моря граница дельты представляет собой ломаную линию, проходящую по западной оконечности



островов дельты. Длина дельты в указанных границах 15,1 км, общая площадь 83 км², из них около 20 км² приходится на водную поверхность.

Самые крупные острова дельты — Васильевский (площадь 1 090 га), Петроградский (620 га), Декабристов (380 га), Крестовский (375 га), Аптекарский (180 га), Петровский (120 га), самые большие рукава — Большая Нева, Малая Нева, Большая Невка, Средняя Невка, Малая Невка, Фонтанка, Обводный канал, Екатерингофка, Морской канал.

Многочисленные рукава и каналы невской дельты принято делить на пять водных систем, а именно: 1) система р. Невы и Обводного канала (7 водотоков); 2) система Большой Невы и Малой Невы (5 водотоков); 3) система Большой Невки (11 водотоков); 4) система р. Фонтанки (12 водотоков); 5) система р. Екатерингофки и Морского канала (10 водотоков).

Острова невской дельты низкие, плоские и при значительных подъемах воды нередко затопляются. Большая часть их поверхности находится на отметках 2,0—3,0 м БС. Самая высокая точка Васильевского острова имеет отметку 3,8 м БС, Петроградского — 3,4 м БС. Высшие точки прочих островов не достигают отметки 3,0 м БС (исключая небольшие искусственные возвышенности).

Воды р. Невы вливаются в Невскую губу пятью мощными потоками: 1) Большая Невка и Средняя Невка; их продолжением служит Елагинский фарватер; 2) Малая Невка и Малая Нева переходят в Петровский фарватер; 3) Большая Нева, затем она разветвляется на Галерный, Корабельный и Гребной фарватеры; 4) Морской канал и р. Екатерингофка омывают акваторию Морского торгового порта и перед Золотыми воротами объединяются в один поток — собственно Морской канал.

График изменения основных морфометрических характеристик по длине р. Невы представлен на рис. 5.1. Координаты кривых площадей поперечных сечений реки указаны в Приложении 1.

1.4. Невская губа

Невская губа, куда впадает р. Нева, является крайней северо-восточной частью Финского залива. Западная граница губы проходит по линии Лисий Нос—Кронштадт—Ломоносов. С востока границей губы служит бар р. Невы (рис. 1.5 и 1.6). Длина губы в указанных границах 21 км, наибольшая



Рис. 1.5. Бар р. Невы (Невское взморье).

ширина 15 км, площадь водного зеркала 329 км², объем водной массы 1,0 км³. Наибольшая глубина вне Морского канала 6,4 м. Распределение площади губы по глубинам следующее:

Глубина, м	0—1	1—3	3—4	4—5	> 5
Доля площади, %	10	29	20	22	19

С остальной частью Финского залива губа сообщается через два пролива у о. Котли, именуемых Северными и Южными воротами. Ширина Северных ворот 9—10 км, Южных — 5—7 км. В обоих воротах и на подходах к ним имеются многочисленные естественные и искусственные преграды; они затрудняют водообмен между пресными водами губы и соло-

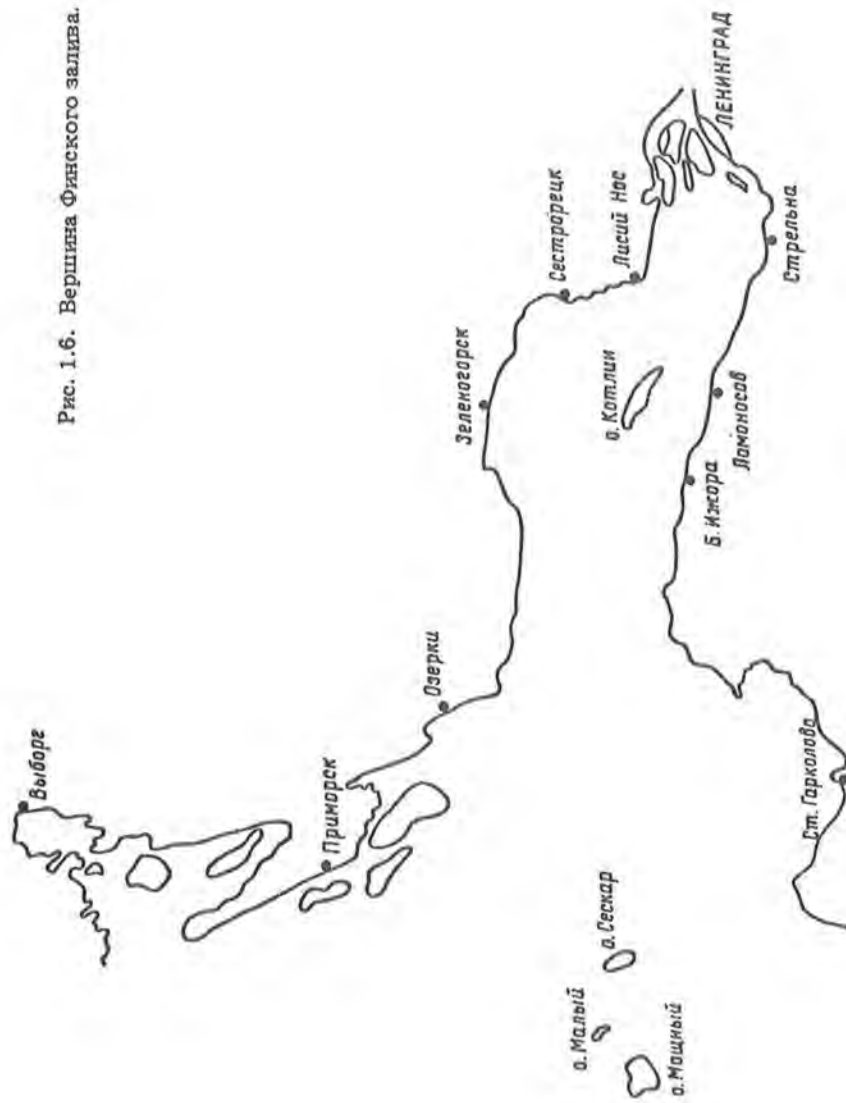


Рис. 1.6. Вершина Финского залива.

новатыми водами залива, препятствуют вхождению ветровых волн из залива в губу и пр. Так, в Северных воротах расположена отмель, идущая от северо-восточной оконечности о. Котлин к мысу Лисий Нос. К западу от отмели по линии Горская—о. Котлин тянется искусственная подводная каменная преграда с глубинами 1,2—1,8 м и далее еще одна линия ряжевых преград с глубинами 2,0—2,6 м. Примерно посредине Северные ворота пересекает судоходный фарватер, называемый Северным фарватером. Южные же ворота перегорожены обширной (2—4 км) Ломоносовской отмелью с глубинами 1—2 м. В воротах остается сравнительно узкая (0,5—1,0 км) ложбина глубиной до 10—12 м, по которой и следуют морские суда в Ленинград. Западнее Ломоносовской отмели также расположена цепь искусственных подводных преград.

Перечисленные преграды входили в состав бывшей Кронштадтской военно-морской крепости. К ним также относится цепь из 15 фортов — насыпных островов, опоясывающих полукольцом губу.

С востока на запад Невскую губу пересекает Морской канал. Это широкая (80—100 м) и глубокая (12 м) искусственная прорезь создана для прохода глубокоосидающих морских судов в порт. Начинается канал в устье Большой Невы и оканчивается на Малом Кронштадтском рейде у о. Котлин, его длина 30 км; на протяжении первых 6 км канал защищен дамбами во избежание заиления, еще 4 км канала проходят между островами дельты. Помимо Морского канала и Северного фарватера, в губе имеются еще три судоходные трассы — Ломоносовский фарватер (между Ломоносовым и Кронштадтом), Петродворцовый фарватер (от Петродворца до Морского канала), подходной канал от Корабельного фарватера на невском баре до Морского пассажирского вокзала на Васильевском острове.

Северное побережье Невской губы представляет собой низменную террасу, шириной 2—4 км, заросшую кустарником и мелким лесом. Южный берег губы от устья р. Невы до Стрельны низкий, к западу от Стрельны — более высокий; почти на всем его протяжении чередуются леса и парки. Повсюду в прибойной зоне по берегам губы много камней и валунов.

Поперек Финского залива по линии Горская—Кронштадт—Ломоносов возводится трасса защитных сооружений. В Северных воротах большей частью глубина на трассе 1—5 м; в двух местах трасса пересечет подводные каменные преграды с глубинами 0,6—1,8 м. В Южных воротах трасса пройдет в

3—4 км к западу от гребня Ломоносовской отмели на глубинах 1—4 м (вне Морского канала) и до 10—12 м (вблизи канала). Остров Котлин (длина 10,5, ширина 1,0—1,5 км) трасса пересечет примерно посредине; к западу останется низкая, нередко затапливаемая часть острова. Если линию защитных сооружений принять за западную границу губы, то площадь водного зеркала губы при уровне, близком к ординару, составит 380 км², а объем водной массы 1,2 км³.

Самая восточная часть Невской губы, примыкающая к островам невиской дельты, называется баром р. Невы, или Невским взморьем. Представляет систему отмелей, разделенных между собой ложбинами—фарватерами (рис. 1.5). Бар Невы — это продолжение дельты, ее подводная, или морская, часть. Баровые же отмели отчасти являются продолжением островов и отчасти самостоятельным образованием, возникшим благодаря оседанию морского и речного ила. Бар состоит из ряда отмелей и шести фарватеров между ними: Елагинский, Петровский, Галерный, Корабельный, Гребной, Морской канал. Наиболее доступны для судоходства Морской канал и Корабельный фарватер.

Длина бара с запада на восток 3—5 км, ширина 13—15 км, глубина на отмелях до 1,5—2,5 м, на фарватерах до 1,5—3,5 м, в Морском канале около 12 м. Поверхностные скорости течения изменяются от 40—45 см/с в начале фарватеров до 10—20 см/с в их конце; в Морском канале (к западу от Золотых ворот) — от 20—30 до 15—25 см/с.

1.5. Финский залив и Балтийское море

Финский залив, будучи частью Балтийского моря, простирается от линии Пысаспеа—п-ов Ханко в направлении на восток-северо-восток до устья р. Невы (см. рис. 2.4). Представляет собой узкий водоем, глубоко вдающийся в сушу. Крайнюю западную часть залива называют горлом, а крайнюю восточную — вершиной. На севере расположен Выборгский залив, в южный берег врезаются Копорский и Нарвский заливы, а между ними Лужская губа.

Длина Финского залива от п-ова Ханко до устья р. Невы 398 км. Ширина залива изменяется от 70—75 км в горле до 120—130 км в самой расширенной части (на меридиане о-ва Мощный); в вершине она уменьшается до 18—22 км, а в Невской губе — до 12—15 км. Площадь водного зеркала залива 29 500 км², объем водной массы 1090 км³. По направлению от горла к вершине залива глубина уменьшается. Осо-

бенно резкое уменьшение глубины и площади поперечного сечения залива происходит между створами устье р. Нарвы—о. Мощный—о. Мустама на западе и створом мыс Шепелевский—пос. Озерки на востоке. Эту часть залива иногда называют Нарвской стенкой. Средняя глубина залива 37 м; в отдельных впадинах глубина достигает 100 м.

Финский залив, в отличие от Ботнического и Рижского заливов, свободно сообщается с Балтийским морем. В залив впадают реки Нева, Луга, Нарва и другие, суммарная площадь водосбора которых 420 000 км². Более 2/3 всей поступающей воды дает р. Нева. Большие массы невской воды опресняют морскую воду и создают сравнительно устойчивое поверхностное течение, которое является как бы продолжением самой Невы. В свою очередь Финский залив оказывает сильное воздействие на Невскую губу и устьевую часть р. Невы.

Балтийское море представляет собой внутриматериковый почти замкнутый мелководный бассейн, вытянутый на 1300 км с юго-запада на северо-восток.

Сообщение Балтийского моря с Северным морем осуществляется через систему Датских проливов (Зунд, Малый и Большой Бельты), переходящих западнее в Каттегат и Скагеррак, а также через Кильский судоходный канал. Границей между Балтийским и Северным морями принято считать так называемый Датский порог с наибольшей глубиной 18 м. Площадь водного зеркала моря 397 000 км², объем водной массы 23 000 км³, средняя глубина 58 м, максимальная — 459 м. Наибольшая ширина 430 км (на параллели Клайпеды).

Глубоко вдаваясь в материк, Балтийское море образует множество заливов и бухт. К числу наиболее крупных относятся Ботнический, Финский, Рижский, Гданьский, Куршский и Вислянский заливы, Поморская и Мекленбургская бухты.

В Балтийское море впадают десятки больших рек (Нева, Нарва, Даугава, Неман, Висла, Одер) и множество средних и малых рек. Годовой речной приток воды в море около 500 км³.

1.6. Климат

Здесь мы укажем на некоторые особенности климата Невской губы и дельты р. Невы, которые имеют прямое отношение к термическому и ледовому режиму названных водных объектов.

145813

Климат района холодный, избыточно увлажненный. Весна большей частью затяжная; теплая погода чередуется с холодной. Лето короткое, относительно прохладное, Осенью погода облачная с затяжными дождями: в течение довольно длительного предзимнего периода отмечается частая смена тепла и холода, неоднократное установление и сход снежного покрова. Зима умеренно холодная, первая ее половина сравнительно мягкая и неустойчивая, вторая — более холодная.

Основные количественные характеристики климата таковы:

— средняя за многолетний период температура воздуха в целом за год составляет $3,8-4,8^{\circ}\text{C}$, в самый холодный месяц года (январь) $-8,0...-8,5^{\circ}\text{C}$, в самый теплый месяц (июль) $17,4...18,0^{\circ}\text{C}$;

— абсолютный максимум температуры воздуха $32...33^{\circ}\text{C}$, абсолютный минимум $-35...-37^{\circ}\text{C}$;

— средняя за многолетний период дата перехода средней суточной температуры воздуха через 0°C : весной 4—9/IV; осенью 12—14/XI;

— среднее за многолетний период число дней со средней суточной температурой воздуха выше 0°C — 216—224, выше 20°C — 11—15, ниже -20°C — 3—4 дня;

— наибольшая за зиму высота снежного покрова на открытых участках 55—57 см, на защищенных — 61—63 см;

— глубина промерзания грунта в зиму со средними погодными условиями на песках 120—125 см, на суглинках 145—150 см, в холодную зиму — соответственно 180 и 220 см;

— средний за многолетний период годовой слой атмосферных осадков 637—673 мм;

— суточный максимум атмосферных осадков 58—80 мм;

— средняя годовая скорость ветра $4,0-5,1$ м/с; число дней со скоростью ветра более 15 м/с — 10—22. Максимальная наблюдаемая скорость ветра 21—34 м/с;

— в году бывает в среднем 13—18 дней с грозой, 21—39 с туманом, 20—26 с метелью, 5—7 с гололедом, 18—20 с изморозью;

— наибольшая интенсивность выпадения жидких осадков за 5-минутный интервал времени 2,5—2,8 мм/мин, а за 1-минутный — 4,5—5,0 мм/мин.

2. Уровни воды

Уровенный режим р. Невы и Невской губы представляет интерес со многих точек зрения. Так, с учетом максимальных и минимальных годовых уровней воды той или иной повторяемости в Ленинграде проектируются мосты, набережные, причалы, водозаборы и другие сооружения. Именно максимальным уровнем Невской губы у Кронштадта очень малой обеспеченности во многом определяются габариты и конструкция комплекса сооружений по защите Ленинграда от наводнений. Наконец, сведения о максимальном годовом уровне в устье р. Невы у Горного института используются для отбивки границ затопления и оценки материального ущерба при наводнениях и т. д.

2.1. Общие сведения о режиме уровней воды р. Невы и Невской губы

Река Нева и Невская губа обладают сходным уровнем режимом, тем не менее поначалу удобно рассматривать их отдельно.

Режим уровней р. Невы весьма своеобразный и сложный. Расход воды, нагоны и сгоны в Шлиссельбургской губе, заторы и зажоры льда, стеснение русла ледяным покровом, наконец, нагоны и сгоны, приливы и отливы, сейши и длинные волны в Финском заливе — все эти факторы уровня режима по-разному сочетаются во времени и по длине реки.

Расход воды и уровень р. Невы. В истоке реки в период, свободный ото льда, расход воды в реке следует за уровнем Ладожского озера. С повышением уровня озера увеличивается расход, и наоборот. Иными словами, в верховье реки влияние озера является преобладающим. По мере продвижения вниз по реке влияние Ладоги постепенно ослабевает. В пределах дельты, где поперечное сечение в 7—10 раз больше, чем на остальной реке, а уклоны водной поверхности невелики, уровень уже практически не зависит от расхода. Наглядное представление о том, как уменьшается размах колебания уровня за счет расхода дает рис. 2.1. Если в верхней части реки преобладает влияние Ладожского озера, то в нижней части доминирует влияние Финского залива, в первую очередь нагонов и сгонов, сейш и длинных волн в пределах восточной части залива.

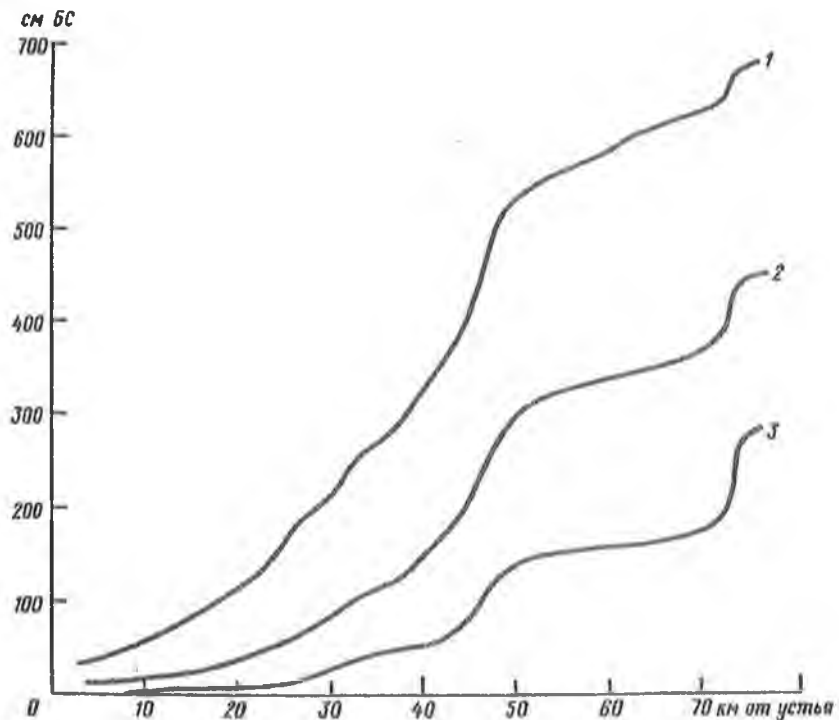


Рис. 2.1. Продольные профили водной поверхности р. Невы в период, свободный ото льда.

1 — при наибольшем наблюдаемом расходе воды ($4750 \text{ м}^3/\text{с}$), 2 — при среднем многолетнем расходе ($2500 \text{ м}^3/\text{с}$), 3 — при наименьшем наблюдаемом расходе ($1250 \text{ м}^3/\text{с}$).

По рис. 2.1, в частности, видно, что $2/5$ всего падения между Ладогой и Финским заливом приходится на два небольшие участка реки (исток, Ивановские пороги), суммарной протяженностью 12 км.

Заторы и зажоры льда и уровни воды р. Невы. Этот вопрос будет рассматриваться ниже (см. раздел 5.1). Здесь лишь отметим, что нижняя половина реки (от устья до Ивановских порогов) замерзает путем последовательного перемещения кромки ледяного покрова снизу вверх по течению. Это сопровождается образованием зажоров льда (в особенности в многоводные годы) с подъемом уровня до 3,0–3,3 м, скачками уровня при подвижках и пр. Весной при вскрытии иногда возникают заторы льда. Причем

заторы, которые образуются вблизи истока, приводят к резкому уменьшению расхода воды и падению уровней по всей реке. Напротив, заторы в нижней половине реки создают подъем уровня почти по всей реке выше места затора.

Ледяной покров и уровни воды р. Невы. Своеобразие зимнего режима р. Невы состоит в том, что, с одной стороны, при появлении ледяного покрова в Шлиссельбургской губе сокращается расход воды и понижаются уровни по всей реке. С другой стороны, благодаря стеснению самого русла Невы ледяным покровом уровни несколько повышаются. В конечном счете, продольный профиль водной поверхности реки в продолжении большей части зимнего периода оказывается более выравненным, чем в летний период. Кроме того, ледяной покров гасит резкие сгонно-нагонные колебания уровня, проникающие в реку из Финского залива.

Переходя далее к общей характеристике уровенного режима Невской губы, укажем, что роль таких факторов, как расход воды, заторы и зажоры льда, ледяной покров здесь пренебрежимо мала. На первом плане влияние различных форм денивиляции водной поверхности Финского залива (приливы и отливы, нагоны и сгоны, длинные волны, сейши).

Поскольку Невская губа находится в глубине материка, вдали от океана, то приливы и отливы здесь невелики. Средняя их высота 6—10 см, наибольшая 20—25 см. Они отчетливо обнаруживаются лишь в безветренную погоду при отсутствии ледяного покрова.

Самое большое воздействие на поверхность Финского залива оказывает ветер. В зависимости от скорости, направления и продолжительности ветра, пути перемещения циклона и пр. в Финском заливе и вообще в Балтике формируется или длинная волна, или нагон—сгон, или сейша, или наконец, все вместе взятое. Длинная волна — своего рода водяной холм, или вал небольшой высоты и чрезвычайно большой длины, который перемещается в направлении движения породившего его циклона. Нагон и сгон создаются влекущим усилием ветрового потока на плоскости раздела вода—воздух, причем у наветренного берега уровень повышается, а у подветренного — падает. После прекращения действия ветра водные массы Финского залива, стремясь прийти в равновесное положение, совершают постепенные затухающие сейшеобразные колебательные движения около одного или нескольких центров (узлов).

Водная поверхность Финского залива никогда не бывает горизонтальной, чаще всего из-за ветровых нагонов и сгонов.

Вот почему всякий подъем воды в Невской губе и в дельте р. Невы, вызванный ветром (независимо от формы денивиляции), принято сокращенно называть нагоном, а всякий спад — сгоном. В особую группу следует выделить случаи очень больших нагонов и сгонов, на которых здесь остановимся специально.

Очень большой нагон вызывает наводнение в Ленинграде и ближайших населенных пунктах (Петродворце, Ломоносове, Кронштадте, Лисьем Носу и др.). В настоящее время подтопление в Ленинграде происходит местами уже при уровне 180—190 см БС у Горного института. Заторение пустырей, парков, садов и других малонаселенных районов начинается при уровне 190—200 см БС, а некоторых жилых кварталов — при 210—220 см БС.

По современным представлениям процесс возникновения очень большого нагона воды в устье р. Невы рисуется следующим образом. Пересекающие Балтийское море циклоны выводят из равновесия его водные массы. В частности, они формируют длинную волну. Высота такой волны невелика (в центральных районах моря не более 30—40 см), но ее длина сравнима с длиной всего моря. Созданию длинной волны способствует как статический эффект (пониженное атмосферное давление в центре циклона), так и динамический эффект (дующие к центру циклона ветры). Особое значение в формировании наводнения имеют те циклоны, которые пересекают Балтику с юго-запада на северо-восток, т. е. в том направлении, в котором вытянуто само море. В подобном случае циклон увлекает длинную волну к горлу Финского залива. Самая благоприятная ситуация, — когда имеется система из основного, или выводящего, циклона и движущегося по его южной периферии углубляющегося частного циклона. При этом в горле залива возникает четко выраженная впадина за счет воды, согнанной сюда из открытых районов Балтики, и отчасти за счет воды из центральных районов Финского залива (поскольку над заливом в это время дуют восточные ветры).

Первоначально высота длинной волны в горле Финского залива обычно 30—50 см, скорость распространения ее гребня 40—60 км/ч. При продвижении по широкой и глубокой части залива высота и скорость волны мало меняются. С подходом же к вершине залива высота волны возрастает, так как залив делается уже и мельче, а форма волны усложняется из-за неровностей берегов и дна. Обычно на участке Таллин—Ленинград высота свободной длинной волны без ветра возрастает в 2,5 раза, на участке Усть-Нарва—Ленинград в

1,5 раза и т. д. Длинная волна пробегает залив за 7—9 ч. Если в течение этого времени нет ветра или ветер очень слабый, то волна распространяется только лишь под действием силы тяжести, т. е. в виде свободной длинной волны, за счет которой в устье Невы возможен подъем до 200—250 см.

Свободная длинная волна бывает крайне редко, ее продвижению почти всегда сопутствует ветер. Северный и южный ветер не влияет на высоту волны; встречный восточный ветер уменьшает высоту волны. Западный попутный ветер — а он является преобладающим — способствует увеличению высоты волны. В последнем случае возрастание высоты волны бывает особенно значительным, если атмосферный фронт в циклоне совпадает с гребнем волны и перемещается вместе с волной примерно с одинаковой скоростью (40—60 км/ч). При этом атмосферный фронт как бы подхлестывает волну, возникает эффект резонанса. Подобная ситуация бывает тогда, когда углубляющийся циклон, дойдя до горла Финского залива, поворачивает на восток, а центр его перемещается вдоль залива, находясь все время несколько севернее залива. Эффект подхлестывания, помимо прочего, создается за счет ветрового раздела в полосе холодного фронта, а точнее, — из-за смены ветров южных румбов впереди фронта на западные в тылу фронта, а также перехода от пониженного давления перед фронтом к повышенному позади фронта.

Довольно значительный подъем воды в устье Невы (до 130—150 см) может иметь место и без длинной волны, а только лишь за счет нагона, создаваемого устойчивым западным ветром на Финском заливе. Однако случаев, когда бы сильный западный ветер наблюдался длительное время и охватывал весь залив, почти не бывает. Сравнительно неширокая полоса штормовых западных ветров в перемещающемся циклоне одновременно охватывает лишь часть залива.

Ветровая и волновая формы деинвизации водной поверхности моря после прекращения действия вынуждающей силы трансформируется в постепенно затухающее сейшеобразное колебание водных масс около одного или нескольких центров (узлов). В Финском заливе известны два основных вида сейш, а именно:

— одноузловая сейша в направлении юг Балтийского моря — Финский залив с периодом колебания 24 ч, средней высотой 20—30 см и максимальной — 140—150 см;

— двухузловая сейша в направлении о. Гогланд — Аландские острова с периодом колебания 8 ч, средней высотой 30—50 см и максимальной — 80—100 см.

Роль сейш в формировании больших подъемов воды в

устье р. Невы особенно велика, когда циклоны движутся над Балтийским морем серией с интервалом 24–28 ч. При этом водные массы раскачиваются, и на предыдущие колебания накладываются последующие.

В конечном счете длинная волна, ветровой нагон и сейша имеют одну и ту же причину — изменение во времени и в пространстве атмосферного давления. Поэтому ни одна из названных форм деформации водной поверхности редко бывает в чистом виде. Можно лишь говорить о преобладании той или иной формы в данном конкретном случае. Тем не менее выделение составляющих важно для познания процесса, поиска методов его предсказания и т. д.

Для полноты картины укажем, что в формировании больших наводнений в устье р. Невы участвуют громадные массы воды. Подсчитано, например, что при очень больших наводнениях примерно за 6-часовой интервал времени через створ Таллин—Хельсинки с запада на восток перемещается 27–30 км³ воды. Максимальный же расход в упомянутом створе достигает 700 000–1 000 000 м³/с, а в створе Кронштадта — 100 000–120 000 м³/с.

Нетрудно заключить, что очень большое наводнение бывает в тех случаях, когда основные причины, вызывающие подъем воды (длинная волна, ветровой нагон, сейша), действуют одновременно, причем каждая составляющая достаточно велика.

Изложенная теория дает ответ на многие вопросы, ранее казавшиеся непонятными. Как возникают наводнения зимой? Отчего при штормовых ветрах западных румбов не всегда бывают наводнения? Чем объяснить спад воды перед наводнением и т. д.?

Приведем некоторые статистические данные о больших подъемах уровня воды в устье р. Невы. По имеющимся неполным сведениям за 278 лет существования Петербурга—Ленинграда (1703–1980 гг.) всего наблюдалось 246 подъема уровня 150 см и более над ординаром у Горного института или более 160 см БС. Распределение их таково:

— по сезонам года									
Сезоны	весна (IV–V)		лето (VI–VIII)		осень и предзимье (IX–XII)			зима (I–III)	
Число случаев	6		20		197			23	
— по числу подъемов в году									
Число подъемов	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Число лет	142	73	37	15	6	3	0	1	1

по значению максимального уровня					
Максимальный					
уровень, см БС . . .	161—200	201—250	251—300	301—350	> 350
Число подъемов . . .	168	62	13	1	2

Сгон воды по сравнению с нагоном -- более простое явление, в особенности если иметь в виду значительные сгоны.

Ежегодно в устье р. Невы и в Невской губе бывает около 50 случаев сгонов с минимальным уровнем на 30 см ниже ординара и 2—3 сгона на 70 см ниже ординара. За 101 год наблюдений (1878—1978 гг.) самые минимальные уровни во время сгона были зафиксированы 2/XI 1910 г. у Горного института (—124 см БС) и 22/IX 1883 г. у Кронштадта (—172 см БС).

Падение уровня при сгоне происходит медленнее, чем его восстановление. Очень большие сгоны всегда кратковременны (1—2 сут). Небольшие же сгоны могут быть и кратковременными, и весьма продолжительными. Так, в 1959 г. у г. Кронштадта уровень ниже —50 см БС держался 11 сут подряд, а в марте 1960 г. ниже —35 см БС в течение 25 сут. За столетний период самая большая продолжительность стояния весьма низких уровней составила (ч) :

	Горный институт	Кронштадт
Ниже — 75 см БС	23	80
Ниже — 100 см БС	18	57

Большой сгон вызывается сильным и устойчивым восточным ветром, причем подобный ветер может быть как при антициклональной, так и циклональной погоде. Циклон вызывает сгон, если его центр находится южнее Балтийского моря, при этом Финский залив накрывается северной периферией циклона, где дуют восточные ветры. Антициклон приводит к сгону, если его центр располагается над Скандинавией или севером европейской части СССР. В этом случае Финский залив попадает в южную периферию антициклона, где господствуют ветры восточных направлений. Однако ни циклон, ни антициклон сами по себе не могут вызвать очень большого сгона. Чтобы это произошло, циклон и антициклон должны располагаться парой, а стык их приходится на Финский залив. Ветровые потоки на стыке циклона и антициклона, дополняя друг друга, достигают особой силы и устойчивости.

Какими бы разнообразными ни были причины колебания уровня, каким бы сложным ни казался сам уровенный режим, для практических целей используется ограниченное

число обобщенных характеристик в том или ином пункте, а именно: средний многолетний уровень, максимальный и минимальный годовой и зимний уровни редкой повторяемости, продолжительность стояния уровня.

Сводка средних многолетних уровней по многим пунктам помещена в табл. 2.1. В дельте р. Невы и в Невской губе

Таблица 2.1

Средний многолетний уровень воды (ординар)

Водный объект	Пункт	Расстояние от устья р. Невы, км	Уровень, см БС
Ладожское озеро	Осиновец, Кобона	82,5	484
р. Нева	Петрокрепость	73,0	429
"	Черная Речка	69,1	395
"	Красные сосны	61,0	344
"	Лобаново	55,0	330
"	Островки	50,2	319
"	Ивановское	44,9	244
"	Усть-Ижора	34,0	158
"	Невский лесопарк	29,5	112
"	Усть-Славянка	28,6	106
"	Новосаратовка	27,0	94
"	Уткина заводь	23,0	72
"	ф-ка им. Ногина	17,5	47
"	устье р. Охты	12,5	30
"	Литейный мост	7,8	18
"	Горный институт	2,8	11
"	Невская устьевая станция (НУС)	0,0	3
Невская губа	Стрельна, Ольгино	-7,0	2
"	Кронштадт	-27,0	-1

средний многолетний уровень, как отмечалось, именуется еще ординаром. Ординар — важная характеристика: по отношению к нему в Ленинграде принято оценивать подъем

уровня при нагонах (в частности, при наводнениях), спад уровня при сгонах и пр.

Данные о повторяемости ежекасных и средних суточных уровней воды приведены в табл. 2.2 /11/, из которой видно,

Таблица 2.2

Повторяемость (%) ежекасных (Горный институт) и средних суточных (НУС, Кронштадт) уровней воды

Интервал уровня, см БС	Горный институт, 1904—1963 гг.		НУС, 1951—1960 гг.	Кронштадт, 1951—1960 гг.
	Год	VI—XII	Год	Год
≥ 140	0,1	0,1	0,00	0,0
139—120	0,2	0,2	0,03	0,0
119—100	0,4	0,5	0,2	0,1
99—80	1,2	1,2	0,5	0,3
79—60	3,5	3,4	2,3	1,4
59—40	9,8	9,8	5,5	5,1
39—20	21,1	22,5	16,1	13,8
19—0	29,9	31,7	27,3	25,9
-1, -20	23,0	22,4	30,1	30,3
-21, -40	8,3	6,5	13,2	16,5
-41, -60	2,0	1,3	3,9	5,4
-61, -80	0,4	0,3	0,7	0,9
-80	0,1	0,1	0,17	0,3
Сумма	100	100	100	100

что чем больше отклонение уровня от ординара, тем реже он наблюдается. Повторяемость (%) отклонений суточных экстремумов уровня от среднего за сутки характеризуется такими цифрами (Горный институт, 1957—1961 гг.):

Отклонение, см...	Число положительных отклонений, % ...	Число отрицательных отклонений, % ...
0—9	29,4	31,9
10—19	40,7	45,8
20—39	17,2	13,7
40	12,7	8,6

При этом повторяемость суточных амплитуд уровня (1949—1962 гг.) следующая:

Амплитуда, см . . .	0—10	11—20	21—30	31—40	41—50	51—60	> 60
Повторяемость, % . . .	2,6	22,7	27,4	18,7	10,9	3,5	8,0

Иными словами, только 10 сут в году уровень можно считать практически неизменным (суточная амплитуда менее 10 см). Половина всех дней в году суточная амплитуда колебания уровня составляет от 10 до 30 см.

В заключение приведем здесь сведения о наблюдаемой максимальной часовой интенсивности изменения уровня Невской губы у Кронштадта (табл. 2.3), а также о рассчитанной максимальной интенсивности (Δz_{\max} Крон.) за случаи наводнений в устье Невы с уровнем $z_{\max} \text{ Гор. ин-т} > 160$ см БС:

Обеспеченность, %	1	5	20	50
Δz_{\max} Крон. на фазе подъема, см/ч.	98	55	33	22
Δz_{\max} Крон. на фазе спада, см/ч.	70	45	29	15

По данным об интенсивности Δz_{\max} Крон. на основании уравнения водного баланса губы можно оценить максимальные расходы воды в створе защитных сооружений.

2.2. Максимальные годовые уровни воды Финского залива и устья р. Невы

Исходными данными для расчета максимальных годовых уровней воды различной повторяемости в естественных условиях послужили материалы непрерывных многолетних наблюдений за уровнями воды по самописцам на двух гидрологических постах — Невская губа—г. Кронштадт (1898—1978 гг.) и р. Нева—Горный институт (1888—1978 гг.). Несмотря на перерывы в наблюдениях, по посту Горный институт с 1878 г. имеются такие сведения о ежегодных максимумах. Почти непрерывные срочные наблюдения (4—8 раз в сутки) с 1836 г. имеются также и по посту Кронштадт, а отрывочные наблюдения по этому посту (2—3 раза в сутки) ведутся с 1806 г.

Для оценки повторяемости очень больших нагонов в устье р. Невы, помимо учащенных наблюдений за уровнем по водомерному посту Горный институт (1878—1978 гг.), может быть также использован каталог ленинградских наводнений, в составлении которого приняли участие многие авторы

Таблица 2.3

Сведения о часовой интенсивности изменения уровня воды
Невской губы у г. Кронштадта (1967—1975 гг.)

Характеристика	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Максимальная часовая интенсивность подъема уровня воды, см/ч												
Наибольшая	56	46	23	36	23	23	13	23	46	36	53	96
Средняя	18	12	16	18	19	13	13	19	18	23	26	11
Наименьшая	10	10	13	10	10	10	8	10	8	13	13	10
Максимальная часовая интенсивность спада уровня воды, см/ч												
Наибольшая	56	18	18	18	23	23	36	36	36	28	66	23
Средняя	18	8	14	8	16	13	13	18	16	18	26	13
Наименьшая	11	8	10	8	13	8	8	10	10	13	13	8

(Крафт, Святский, Каратыгин, Рыкачев, Мордухай-Болтовской и др.) /23, 29/. В каталоге содержатся сведения о наводнениях, случившихся в Петербурге—Ленинграде со дня основания города (1703 г.), точнее, о подъемах уровня воды более 150 см над ординаром р. Невы у Горного института.* Упомянутые данные частично получены путем непосредственных наблюдений по фугштокам у Адмиралтейства, Петропавловской крепости и Горного института, но большей частью выбраны из различных исторических документов, а также из газет, мемуаров, частных писем и пр. Помещенные в каталоге сведения представляют большую ценность, тем не менее их нельзя считать полными. Возможно, что часть сравнительно небольших наводнений (150—200 см над ординаром) осталась незафиксированной. В основном это относится ко второй половине XVIII в., когда действовал царский указ, запрещающий публиковать сведения о наводнениях ("... чтобы не портить репутацию столицы" (!!!)). Сведения о максимальных годовых уровнях воды р. Невы у Горного института из упомянутого каталога, а также из таблиц ежечасных уровней помещены в Приложении 2, а распределение всех подъемов по величине и времени года — в табл. 2. 4.

Все данные еще раз тщательно выверены по сохранившимся подлинным материалам и на сегодняшний день могут считаться наиболее достоверными.

К данным за 1703—1978 гг. присовокуплен выдающийся максимум 1691 г. По имеющимся сведениям /12/, в наводнение 1691 г. затопливалась шведская крепость Ниеншанц, которая находилась на левом берегу р. Большой Охты у впадения ее в р. Неву, на территории, где сейчас расположен "Петрозавод". По данным Архитектурно-планировочного управления Ленгорисполкома (1963 г.), наивысшие отметки на территории завода составляют 340—350 см БС. Если учесть наличие культурного слоя почвы толщиной 100—120 см (по материалам Академии художеств), то в прошлом отметки местности здесь были ниже приблизительно наполовину толщины культурного слоя (судя по другим районам города). В то же время очевидно, что пол крепости возвышался над окружающей болотистой местностью. Предположив, что возвышение пола крепости над местностью примерно равно половине толщины культурного слоя (50—60 см), получим максимальный уровень 340 см БС, или 329 см над ордина-

* Ординар, или средний многолетний уровень воды р. Невы у Горного института (2,8 км от устья), равен 11 см БС (Балтийская система отметок) — см. табл. 2.1.

Таблица 2.4

Распределение подъемов воды
в устье р. Невы у Горного института
по величине и времени года,
1703—1980 гг.

Максимальный уровень, см над ординаром	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Всего
150 — 200	10	8	4	1	4	5	1	10	22	48	47	30	185
201 — 250	5	1		1				4	6	11	15	6	49
251 — 300									3	2	4		9
> 300								2			1		3
Итого	15	4	4	1	5	5	1	14	33	61	67	36	246

ром. Следовательно, наводнение 1691 г. занимает третье место в ряду пяти известных катастрофических наводнений (1824, 1924, 1691, 1777 и 1955 гг.). Конечно, точность установленной таким образом отметки максимума 1691 г. невысокая, однако она мало чем отличается от точности оценки максимальных уровней при большинстве наводнений, имевших место в XVIII в. и в первой половине XIX в.

Правильность расчета максимального годового уровня воды редкой повторяемости р. Невы у Горного института во многом зависит от достоверности отметки самого большого за всю историю Петербурга—Ленинграда наводнение 7 (19) /XI 1824 г. Долгое время, свыше ста лет, подъем уровня в 1824 г. принимался равным 400—415 см БС над ординаром, или 411—426 см БС (по нивелировке А. Колодкина летом 1825 г.). Указанные отметки очень близки к средней отметке (421 см БС) из 17 памятных знаков (досок) в центральной части города. Эта последняя отметка была установлена нивелировкой четвертого класса в 1928 г. рядом ленинградских организаций под методическим руководством ГГИ в лице В. А. Берга /6/. Несколько позднее, в 1930—1932 гг., по заданию Научно-исследовательского института коммунального и жилищного хозяйства А. И. Мордухай-Болтовской /29/, занимаясь упорядочением реперов и марок вдоль берегов Невы и уточнением каталога ленинградских наводнений, усомнился в правильности максимального уровня 400—415 см над ординаром для наводнения 1824 г. Главным поводом послужило то, что все 23 сохранившиеся от наводнения 1824 г. памятные доски довольно однотипны. Отсюда возникло предположение, что доски установлены кем-то в организованном порядке в неизвестное время. Избрав две самые надежные метки (на Невских воротах Петропавловской крепости и на здании Адмиралтейства), после введения нескольких поправок Мордухай-Болтовской пришел к выводу, что в наводнение 1824 г. максимальный уровень достигал 375 см над ординаром (т. е. всего на 6 см выше, чем в наводнение 23/IX 1924 г.). С тех пор уровень 375 см над ординаром, как самый высокий наблюдаемый максимум, в продолжение более сорока лет (до 1968 г.) фигурировал в большинстве официальных документов, научных публикаций и пр.

По совокупности всех данных максимум 375 см над ординаром для самого катастрофического наводнения 7 (19) /XI 1824 г. представляется явно заниженным. Он установлен Мордухай-Болтовским на основании библиографических и архивных изысканий всего по двум памятным доскам. Это, конечно, менее надежно, чем прямая нивелировка сохранившихся

меток. Сам А. И. Мордухай-Болтовской /29/ писал, что использованный им прием есть лишь "возможная гипотеза" и что "предлагаемое решение не может считаться единственно возможным". Что касается однотипности памятных досок, введенной в заблуждение Мордухай-Болтовского, то это, по-видимому, объясняется довольно просто. Судя по тому, что ссылки на памятные доски — в том виде, в каком они сохранились поныне — встречаются в различных публикациях лишь после 1840 г. можно думать, что они установлены экспедицией генерал-лейтенанта Шуберта (1820—1864 гг.), выполнившей большие геодезические работы в городе в связи с сооружением Обводного и Веденского каналов, устройством набережных и пр.

В настоящей работе принято, что максимальный уровень воды р. Невы у Горного института в самое катастрофическое наводнение 7 (19) /XI 1824 г. составлял 410 см над ординаром, или 421 см БС. Выше указывалось, что эта отметка установлена по материалам нивелировки В. А. Берга /6/ как средняя отметка из 17 марок в центральной (островной) части Ленинграда. О тщательности нивелировки свидетельствует такой факт. Средняя отметка максимума второго по величине наводнения 23 /IX 1924 г. по 19 маркам в центральной части города оказалась равной 379 см БС, а по записи лимниграфа Горного института 380 см БС. Существенно, что принятая отметка (421 см БС) близка к той, что получена Е. А. Гейнцом /9/ в 1890—1891 гг. путем нивелировки памятных досок наводнения 1824 г. на островах Васильевском и Каменном. По семи маркам средняя отметка у Гейнца оказалась равной 421 см выше нуля футштока Николаевского моста (ныне моста Лейтенанта Шмидта). По сведениям же Гейнца нуль футштока на 6 см выше среднего многолетнего уровня (ординара) у моста. По последним данным (табл. 1.1), ординар р. Невы у моста Лейтенанта Шмидта составляет 13 см БС. Следовательно, отметка максимума 1824 г., по Е. А. Гейнцу, $421 - 6 + 11 = 426$ см БС. Наконец, судя по подлинным материалам наблюдений за уровнем воды, обнаруженных в архивах морского ведомства /11/, максимальный уровень Невской губы у г. Кронштадта в 1824 г. достигал 367 см БС. Этому уровню по средней линии графика связи годовых максимумов Кронштадт—Горный институт (рис. 2.2) соответствует уровень у Горного института 432 см БС.

Таким образом, достоверность принятой отметки максимального уровня воды (421 см БС) для самого катастрофического за всю историю Петербурга—Ленинграда наводнения

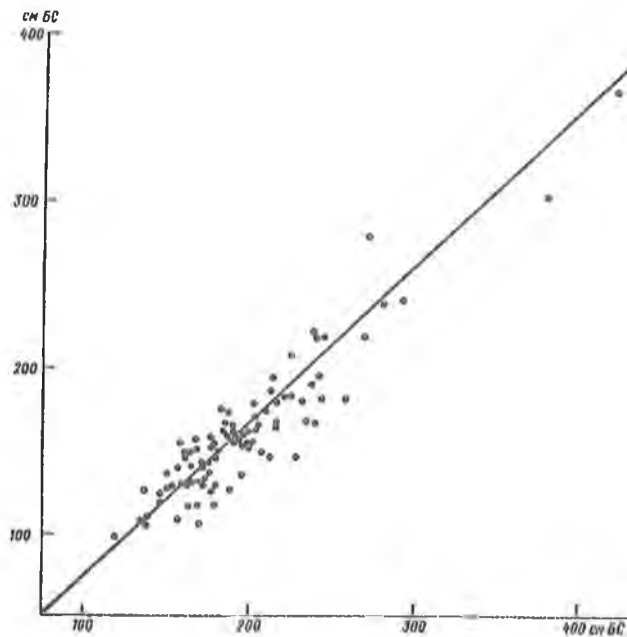


Рис. 2.2. График связи соответственных максимальных нагонных уровней воды Горный институт (ось абсцисс) — г. Кронштадт (ось ординат); 1824, 1878—1979 гг.

7 (19) /XI 1824 г. можно считать полностью доказанной.

Расчет максимальных годовых уровней воды р. Невы у Горного института и Невской губы у г. Кронштадта различной повторяемости выполнен, как это обычно принято для уровней /43/, путем построения эмпирических кривых обеспеченности, т. е. кривых вероятности превышения $P(Z_{\max})$. Особенность примененного метода расчета состоит в том, что помимо фактических наблюдений за уровнем, широко использованы исторические материалы. Кроме того, при экстраполяции кривых обеспеченности в область редкой повторяемости приняты во внимание некоторые физические соображения, а также использован метод композиции законов распределения.

Рассмотрим вначале вопрос о расчете максимального годового уровня воды р. Невы у Горного института.

Построение эмпирической кривой обеспеченности максимального годового уровня воды у Горного института может быть осуществлено: а) на основании сравнительно короткого

101-летнего ряда наблюдений по самописцу (1878—1978 гг.); б) по довольно длинному 276-летнему ряду наблюдений (1703—1978 гг.).

Для целей расчета всегда предпочтительно использовать как можно более длинный ряд наблюдений. Как отмечалось, за период 1703—1877 гг. имеются лишь сведения о нагонных наводнениях с подъемом уровня воды 150 см и более над ординаром (т. е. с уровнем $Z_{\max} \geq 161$ см БС), причем некоторые довольно значительные подъемы (150—200 см над ординаром) остались, по-видимому, незафиксированными. О неполноте данных убедительно свидетельствует такой факт. За период 1703—1877 гг. (175 лет) зафиксировано 128 случаев с подъемом воды более 150 см над ординаром (т. е. в среднем, 0,73 случая в год), а за период 1878—1978 гг. (101 год), когда велась почти непрерывная запись уровня по самописцу, — 116 случаев (в среднем 1,15 случая в год). Кроме того, в отношении 1/4 части всех больших подъемов воды, зафиксированных в период с 1703 по 1877 г., известно лишь, что максимум был "выше 150 см над ординаром" или же "выше 200 см над ординаром". Вследствие неточности и неполноты исходных данных, эмпирические кривые обеспеченности $P(Z_{\max})$ за периоды 1703—1877 и 1878—1978 гг. заметно отличаются друг от друга, в особенности в диапазоне 150—200 см над ординаром.

В связи с отмеченным построение кривой обеспеченности максимального годового уровня воды р. Невы у Горного института $P(Z_{\max})$ (рис. 2.3) осуществлено путем соединения различных двух кривых $P(Z_{\max})$, а именно кривой за 1878—1978 гг. и кривой за 1691—1978 гг. Дадим на этот счет более подробные пояснения.

Можно считать, что кривая обеспеченности $P(Z_{\max})$, построенная по данным самописца уровня за 101-летний период наблюдений (1878—1978 гг.), вполне надежна в диапазоне повторяемости 1 раз в 35 лет и чаще (или обеспеченности $P \geq 3\%$), чему соответствует диапазон уровня Z_{\max} от 270 см БС до самого низкого наблюдаемого. Участок же кривой $P(Z_{\max})$, где обеспеченность $P < 3\%$, при такой длительности ряда и значительной асимметрии самой кривой уже не может считаться достоверным. Поэтому верхний участок кривой обеспеченности $P(Z_{\max})$ с уровнем $Z \geq 270$ см БС построен отдельно по данным за 1703—1978 гг., к которым добавлен случай катастрофического наводнения 1691 г. Такой подход основывается также на уверенности, что с 1703 по 1877 г., несмотря на отсутствие систематических наблюдений за уровнем, были зафиксированы все без

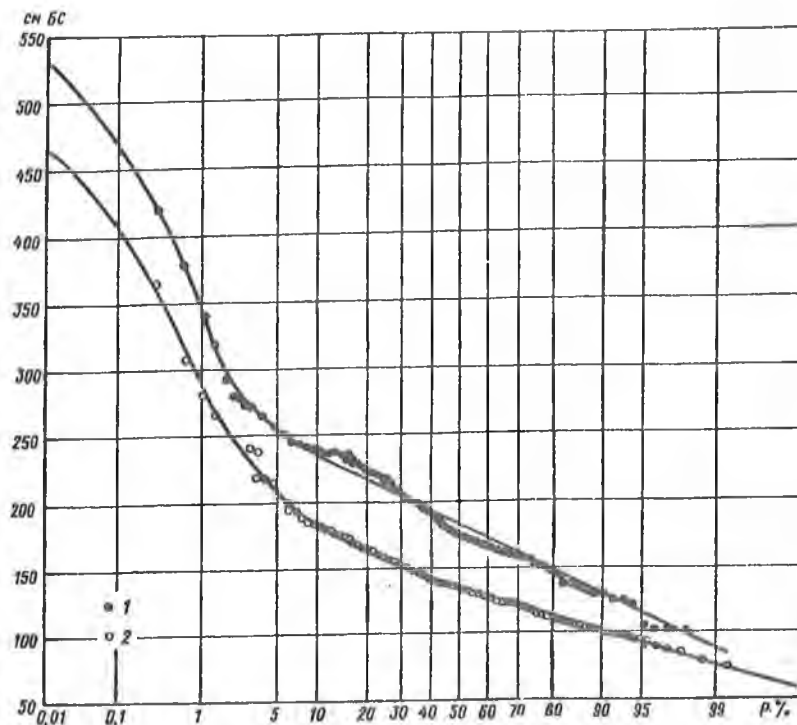


Рис. 2.3. Кривые обеспеченности максимальных годовых уровней воды в естественных условиях (1691–1978 гг. с перерывами).

1 — р. Нева—Горный институт, 2 — Невская губа—г. Кронштадт. По Горному институту участок кривой с $Z_{\max} < 270$ см БС построен по данным за 1878–1978 гг., то же по Кронштадту с $Z_{\max} < 220$ см БС по данным за 1836–1978 гг.

исключения подъема воды с уровнем $Z_{\max} \geq 270$ см БС. И, действительно, в прошлом подъем воды в устье р. Невы до 270 см БС и выше сопровождался чрезвычайно большим наводнением (в особенности в XVIII в.) с затоплением более 80 % территории тогдашнего города. Это должно было отразиться в анналах Петербурга—Ленинграда.

Укажем, что эмпирические точки верхнего участка кривой обеспеченности ($Z_{\max} \geq 270$ см БС) нанесены на клетчатку вероятностей (рис. 2.3) с учетом общей длительности ряда $n = 288$ лет (с 1691 по 1978 г.). Приведем здесь перечень всех случаев наводнений с максимальным уровнем у Горного института $Z_{\max} \geq 270$ см БС и соответствующие им значения эмпирической обеспеченности

$$P = [m/(n + 1)] \cdot 100 \%, \quad (2.1)$$

где m — порядковый номер года в убывающем ряду:

Годы	1824	1924	1691	1777	1955	1975	1752	1723	1726
Z_{\max} см БС . .	421	380	340	321	293	281	280	272	270
P %	0,35	0,69	1,04	1,38	1,73	2,08	2,42	2,77	3,11

Очевидно, что подобное действие с включением в ряд точки 1691 г. правомерно, если в период с 1692 по 1702 г. не было наводнений с уровнем $Z_{\max} \geq 270$ см БС. В этой связи отметим, что в первые годы существования Петербурга придавалось серьезное внимание выбору отметок фундаментов при закладке различных зданий, и, конечно же, если бы в период 1692—1702 гг. наблюдалось большое наводнение, то оно было бы известно местным жителям и первым строителям города.

Представленная на рис. 2.3 кривая обеспеченности максимального годового уровня воды $P(Z_{\max})$ р. Невы у Горного института обоснована эмпирическими точками до уровня $Z_{\max} \leq 421$ см БС, или обеспеченности $P \geq 0,35$ %. Возникает далее задача: как экстраполировать кривую $P(Z_{\max})$ за пределы наблюдаемых значений уровня в область очень редкой повторяемости ($0,01\% \leq P < 0,35\%$). При расчетах максимальных расходов воды и других характеристик водного режима рек задача эта решается в нормативном порядке. Основываясь на многолетнем опыте проектирования и эксплуатации различных сооружений, принимается априори, что биномиальная кривая распределения, параметры которой установлены по имеющемуся сравнительно короткому ряду наблюдений, верна и для области редкой повторяемости, за пределами наблюдений /45/. В рассматриваемом случае подобную нормативную рекомендацию нельзя считать приемлемой. Речь идет о максимальном уровне воды (а не о расходе); его значение в определенной мере зависит от морфометрических и гидравлических особенностей ряда водных объектов (Финского залива, Невской губы, р. Невы).

Тем не менее при статистических параметрах ряда максимальных годовых уровней за 101-летний (1878—1978 гг.) период непрерывных наблюдений* ($Z_{\max} = 181$ см БС; $C_v = 0,26$; $C_s = 3,2$ $C_v = 0,85$) испытывались многие известные функции распределения — биномиальная, Крицкого—Менкеля, Гумбеля, Шарлье, Фреше, Вейбула, Лейвикова и др. Особо остановимся на попытках установления суммарной (средней

* С включением выдающегося максимума 1824 г. (421 см БС), относенного к периоду 1691—1978 гг., статистические параметры ряда практически не меняются.

взвешенной) кривой распределения и кривой, основанной на использовании не одного, а нескольких максимумов в году.

Как известно, предложение об установлении суммарной кривой обеспеченности для разнородной совокупности по нескольким однородным совокупностям относится к случаю непрерывного ряда. В данном же случае ряд прерывный. Так, сведения об уровне $Z_{\max} \geq 270$ см БС имеются с 1961 г., тогда как непрерывные наблюдения ведутся лишь с 1878 г. Построение суммарной кривой обеспеченности $P(Z_{\max})$ выполнено по двум рядам. В первый ряд вошли 9 лет с уровнем $Z_{\max} \geq 270$ см БС за период 1691—1978 гг. Во второй ряд включено 101 год с уровнем $Z_{\max} < 270$ см БС за период 1878—1978 гг. Для каждого ряда вычислены статистические параметры Z_{\max} , C_v и C_s , на основании которых вычерчены биномиальные кривые обеспеченности $P_1(Z_{\max})$ и $P_2(Z_{\max})$. Абсциссы суммарной кривой $P(Z_{\max})$ при различных значениях уровня ($Z_{\max} = 250, 300, 350, 400, 450$ и 500 см БС) найдены как средние взвешенные по выражению

$$P = \frac{9}{110} P_1 + \frac{101}{110} P_2. \quad (2.2)$$

Оказалось, однако, что суммарная кривая плохо согласуется с эмпирическими точками.

Другая попытка, как отмечалось, состояла в использовании нескольких случаев в году (с уровнем $Z_{\max} > 160$ см БС), — если, конечно, подобные случаи имели место. Построенная по такой выборке кривая $P(Z_{\max})$ несколько отличается от принятой кривой $P(Z_{\max})$ лишь при обеспеченности $P > 50\%$. Это объясняется тем, что по несколько очень больших подъемов в году не бывает. Так, за 276-летний период наблюдений (1703—1978 гг.) не было года, чтобы случилось два наводнения с уровнем $Z_{\max} \geq 277$ см БС.

Таким образом, никакая известная теоретическая кривая распределения вероятностей с неограниченным верхним пределом (в том числе биномиальная кривая) не согласуется с эмпирическими точками при обеспеченности $P \leq 2,5\%$. Для применения же кривых распределения с ограниченным верхним пределом не имеется достаточно оснований.

Предположим, что, в конце концов, удалось бы подобрать какое-либо аналитическое выражение функции распределения хорошо согласующееся с эмпирическими данными в пределах имеющихся наблюдений. Само по себе это не служит доказательством того, что далеко за пределами наблюдений,

в области очень редкой повторяемости (1 раз в 5 000—10 000 лет), подобранная функция также будет согласовываться с действительностью. Всегда сохранится элемент неопределенности, поскольку по короткой выборке в принципе невозможно восстановить всю генеральную совокупность.

Представляется единственно возможным осуществить экстраполяцию кривой обеспеченности $P(Z_{\max})$ в область редкой повторяемости методом композиции законов распределения, учитывая при этом некоторые физические соображения, а именно:

а) с достижением у Горного института уровня 250—300 см БС подпор распространяется вверх по Неве до самого истока, и расход воды из Ладожского озера начинает уменьшаться. При уровне 400—450 см БС излив воды из Ладоги почти прекращается. Наконец, при уровне $Z > 500$ см БС должен установиться на некоторое время обратный уклон, и вода из реки будет перетекать в озеро. (Напомним, что средний многолетний уровень Ладоги равен 484 см БС);

б) при уровне воды у Горного института $Z \geq 450$ —500 см БС произойдет затопление пойм и долин притоков р. Невы (Мги, Тосны, Ижоры, Славянки и пр.), а также Лахинского и Сестрорецкого разливов в вершине Финского залива. На это уйдет около $0,8 \text{ км}^3$ воды, что в среднем составляет 15 % объема лобовой части длинной волны при нахождении ее гребня в районе о. Гогланд;

в) эффект возрастания высоты длинной волны при ее перемещении от Таллина до Ленинграда оказывается самым большим тогда, когда атмосферный фронт в циклоне движется с той же скоростью, что и гребень длинной волны (40—60 км/ч). Поскольку скорость движения атмосферного фронта и скорость ветра вблизи фронта отчасти взаимосвязаны, то при чрезвычайно большой скорости западного ветра (более 30 м/с) атмосферный фронт будет, вероятно, перемещаться быстрее, чем длинная волна. Произойдет отрыв атмосферного фронта от гребня длинной волны.

Перетекание невской воды в Ладогу, заполнение водой больших дополнительных емкостей, несовпадение скорости движения атмосферного фронта и гребня длинной волны — все это, несомненно, должно привести к уменьшению интенсивности приращения уровня на очень высоких отметках. Этим, помимо прочего, объясняется вогнутое очертание верхних отрезков кривых обеспеченности по Горному институту, Кронштадту и другим пунктам Финского залива.

Порядок применения композиционного метода одинако-

вый для Горного института и Кронштадта, поэтому вначале дадим краткие пояснения об особенностях расчета максимального уровня у Кронштадта.

Для построения кривой обеспеченности $P(Z_{\max})$ максимального годового уровня воды Невской губы у г. Кронштадта использован 143-летний (1836—1978 гг.) почти непрерывный ряд наблюдений. Как и для Горного института, кривая обеспеченности $P(Z_{\max})$ получена путем соединения двух отрезков кривых за периоды 1836—1978 и 1691—1978 гг. При этом в самое катастрофическое наводнение 7(19)/XI 1824 г. наблюденный уровень $Z_{\max} = 367$ см БС.

Ниже указан максимальный уровень Z_{\max} и соответствующее значение эмпирической обеспеченности

$$P \frac{m}{n+1} \cdot 100 = \frac{m}{289} \cdot 100 \%$$

для девяти случаев самых больших наводнений в Кронштадте ($Z_{\max} \geq 223$ см БС), по которым построен верхний участок кривой $P(Z_{\max})$ (период 1691—1978 гг.):

Годы	1824	1924	1691	1777	1955	1975	1752	1723	1932
Z_{\max} см БС . .	367	313	(285)	(268)	241	239	(233)	(226)	223
P %	0,35	0,69	1,04	1,38	1,73	2,08	2,42	2,77	3,11

При этом за 1691, 1777, 1752 и 1723 гг. уровень Z_{\max} восстановлен по связи с Горным институтом (рис. 2.2).

В пределах наблюденных значений максимальных годовых уровней воды Z_{\max} кривые обеспеченности $P(Z_{\max})$ по Горному институту и Кронштадту (рис. 2.2) приводились как плавные осредненные кривые с последующей увязкой по связи соответственных уровней Горный институт — Кронштадт. За пределами наблюденных значений, в области очень редкой повторяемости ($0,01 \leq P < 0,35$ %), экстраполяция кривых $P(Z_{\max})$, как отмечалось, выполнена главным образом на основе расчетов методом композиции законов распределения.

Исходные физические положения метода композиции применительно к рассматриваемому явлению заключаются в следующем.

Очень большое, а тем более катастрофическое, наводнение в Ленинграде формируется серией из двух-трех глубоких циклонов. Предшествующие один-два циклона выводят из равновесия водные массы Балтийского моря, образуя, в частности, в горле Финского залива длинную волну и нагон. Завершающий циклон, перемещаясь вместе с длинной волной вдоль Финского залива, существенно увеличивает высоту волны, а также создает местный нагон воды. Если для каждо-

го случая наводнения избрать физически однородный момент времени, например, момент прохождения гребня длинной волны через створ Таллин—Хельсинки, — то результирующий эффект от предшествующих этому моменту циклонов достаточно полно отразится в том, какой объем воды находится в Финском заливе на участке Таллин—Ленинград и как эта вода распределена по длине участка. Эффект же воздействия завершающего циклона определяется прежде всего ветровым полем над Финским заливом в последующий период времени. Таким образом, в рамках поставленной задачи главными факторами наводнения являются:

а) объем и распределение воды в Финском заливе на участке Таллин—Ленинград в момент наступления максимального уровня у Таллина;

б) направление и скорость ветра над Финским заливом между Таллином и Ленинградом в течение некоторого периода времени после наступления максимума уровня у Таллина.

Для применения метода композиции надо знать вид функции между максимальным уровнем, например, у Горного института, с одной стороны, и указанными обуславливающими факторами, — с другой. Функцию можно было бы выявить эмпирическим путем, но нужных данных для этого недостаточно, а главное, любая эмпирическая зависимость верна лишь в тех границах, для которых она получена. Иное положение с гидродинамической моделью, основанной на численном решении систем дифференциальных уравнений мелкой воды. Система уравнений мелкой воды в теоретически строгой и математически сжатой форме выражает главные законы движения водных масс — закон сохранения материи и закон сохранения энергии. Поэтому она верна для любой области расчетов, иными словами, для любой комбинации исходных факторов, в том числе комбинации, создающей наводнения чрезвычайно редкой повторяемости.

Допустим, что на основе численных расчетов по гидродинамической модели выявлена искомая функция. Тогда, располагая эмпирическими кривыми обеспеченности исходных аргументов, представится уже возможным известными методами теории вероятностей [13] рассчитать верхний отрезок кривой обеспеченности $P(Z_{\max})$ за пределами наблюдаемых значений Z_{\max} .

Такова в общих чертах схема реализации поставленной задачи композиционным методом. При ее решении, однако, приходится учитывать ряд конкретных особенностей; а именно: полноту и точность натуральных наблюдений, форму

представления исходной информации для гидродинамической модели и пр.

Дальнейшие пояснения даются ниже по каждому виду работ в отдельности.

А. Подсчет объема воды в Финском заливе

Подсчет объема воды в Финском заливе на 320-километровом участке Таллин—Ленинград выполнен для каждого наблюденного случая годового максимума в устье р. Невы за 76-летний период (1903—1978 гг.). Объем воды подсчитывался на момент наступления пика уровня у Таллина, т. е. обычно за 5—8 ч до максимума уровня у Горного института. В некоторых случаях при пологом очертании графика хода уровня у Таллина было затруднительно определить указанный момент, и тогда объем подсчитывался на момент времени, отстоящий от пика уровня у Горного института на 6 ч.

Находился не весь объем воды в Финском заливе, а лишь объем над горизонтальной поверхностью с отметкой $Z = 0,00$ м БС, близкой к плоскости ординара. В реальных условиях почти горизонтальная водная поверхность устанавливается в Финском заливе только в длительную безветренную погоду при малом притоке речных вод. По аналогии с водохранилищем объем воды, исчисленный относительно плоскости ординара, есть рабочий объем; остальной объем — это мертвый (постоянный) объем.

Объем воды за каждый конкретный случай большого подъема уровня подсчитывался по выражению

$$W = \Omega_1 Z_1 + \Omega_2 Z_2 + \dots + \Omega_{10} Z_{10} = \Delta W_1 + \Delta W_2 \dots + \Delta W_{10}, \quad (2.3)$$

где $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_{10}$ — площадь водного зеркала по 10 подучасткам Финского залива; Z_1, Z_2, \dots, Z_{10} — соответствующие средние уровни воды на подучастках. Сведения о подучастках (табл. 2.5) получены по лоцманской карте масштаба 1:500 000 (1963 г. изд.) при шаге по длине 5 км.

Вообще говоря, площадь водного зеркала залива не остается постоянной и с повышением уровня воды несколько возрастает (примерно на 0,3%), но этим можно пренебречь.

Средние уровни на подучастках Z_1, Z_2, \dots, Z_{10} за каждый конкретный случай определялись по соответствующему мгновенному продольному профилю водной поверхности залива. Для его построения использовались наблюдаемые ежечасные и срочные уровни воды по гидрологическим постам, перечень которых помещен в табл. 2.6, а местоположение показано на

Таблица 2.5

Морфометрические характеристики отдельных
подучастков Финского залива

№ п/п	Расстояние от Таллина, км	Длина, км	Площадь водного зеркала, км ²
1	0 — 40	40	2900
2	40 — 80	40	3220
3	80 — 120	40	3700
4	120 — 160	40	4700
5	160 — 190	30	3500
6	190 — 220	30	3120
7	220 — 250	30	1640
8	250 — 270	20	460
9	270 — 295	25	625
10	295 — 320	25	325
Всего	0 — 320	320	24190

Таблица 2.6

Перечень гидрологических постов на Финском заливе,
наблюдения по которым использовались для построения
мгновенных продольных профилей водной поверхности

№ по рис. 2.4	Пункт	Расстояние от Таллина по оси залива, км	№ по рис. 2.4	Пункт	Расстояние от Таллина по оси залива, км
1	Таллин	0	9	Усть-Нарва	190
2	Хельсинки	10	10	Усть-Луга	210
3	Локса	60	11	Старое	220
4	Вайнло (Стеншер)	105	12	Гарколово	230
5	Кунда	110	13	Выборг	290
6	Гогланд	135	14	Кронштадт	293
7	Хамина	150	15	Ломоносов	320
8	Мощный	180		Горный институт	

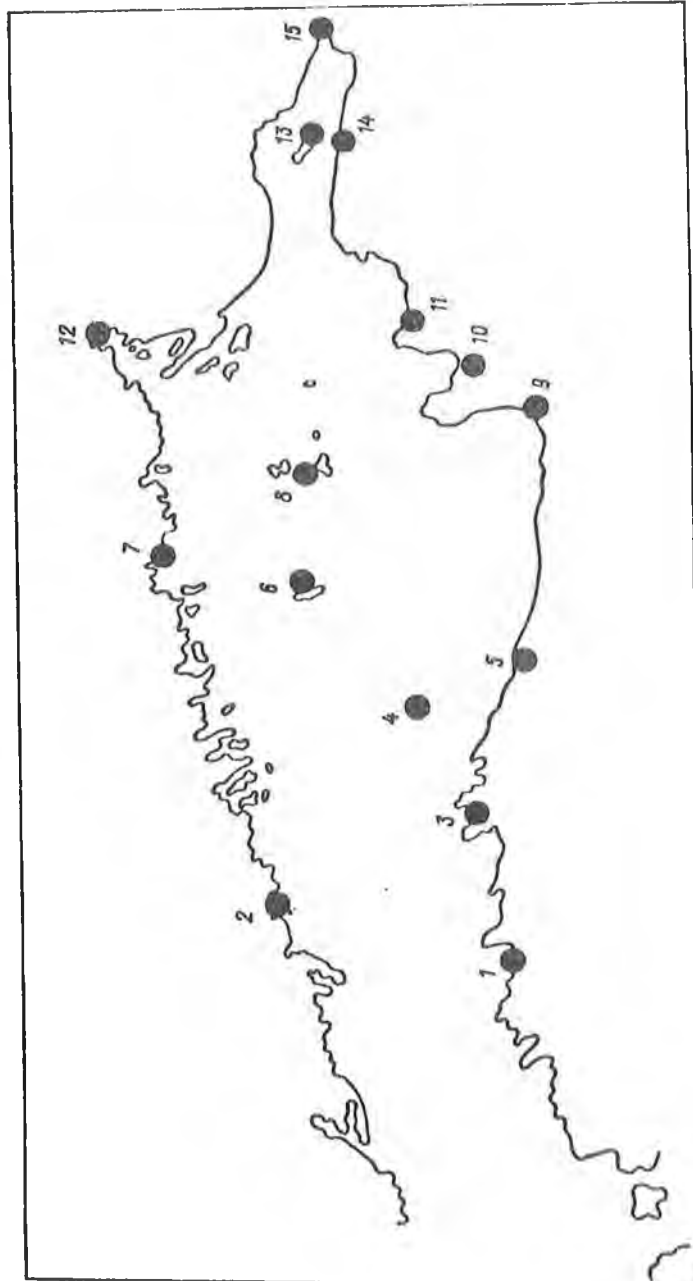


Рис. 2.4. Схема расположения гидрологических постов на Финском заливе.

рис. 2.4. Периоды действия постов различные, число сроков наблюдений непостоянное, не все материалы хранятся в должном порядке. Поэтому количество постов, наблюдения по которым использованы для построения того или иного продольного профиля, колебалось от 7 до 12. Информация по пунктам Выборг и Мощный использовалась в редких случаях при острой нехватке данных (по Выборгу — из-за нерепрезентативности наблюдений, по Мощному — из-за неупорядоченности высотной основы). Часто максимум у Таллина отмечался между стандартными сроками наблюдений, и тогда нужные уровни по постам, где не имелось самописцев, находились интерполяцией. Продольный профиль вычерчивался как осредненная плавная крива (рис. 2.5). Этим самым

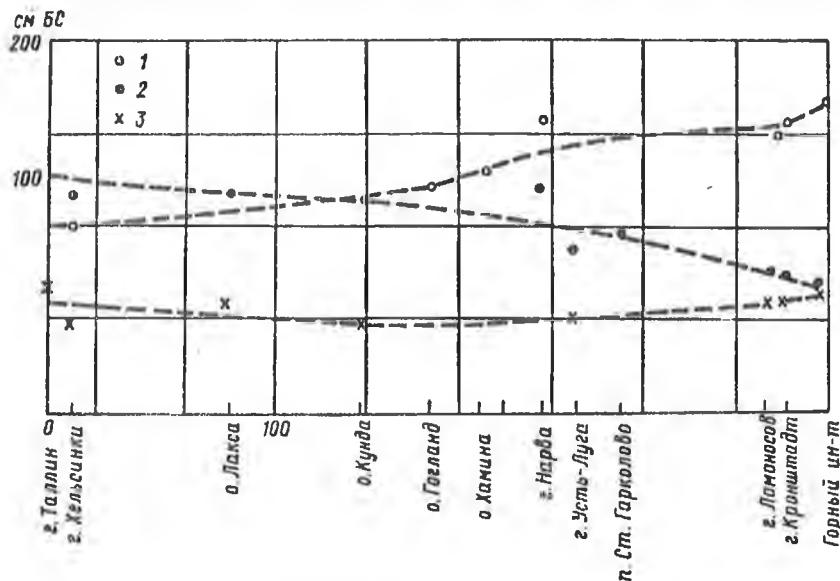


Рис. 2.5. Продольные профили водной поверхности Финского залива в момент пика нагона у Таллина.

1 — 10/X 1927 г., 9 ч 00 мин; 2 — 1/XI 1927 г., 22 ч 00 мин; 3 — 9/X 1925 г. 15 ч 00 мин.

устранялись местные нагоны и сгоны у берегов из-за сложного рельефа дна и неправильного очертания береговой линии в плане.

По подсчитанным ежегодным значениям объема воды W за периоды 1903—1978 гг. построена кривая обеспеченности $P(W)$. Координаты кривой помещены в табл. 2.9.

Б. Определение падения по длине Финского залива

Распределение воды в Финском заливе в начальный момент времени (т. е. в момент наступления пика уровня у Таллина) различное. В одних случаях основная масса воды концентрируется в наиболее расширенной части залива, и тогда плоскость водного зеркала наклонена по направлению от Таллина к Ленинграду. В других случаях довольно много воды находится в вершине залива, при этом уровни воды у Кронштадта и Горного института оказываются выше, чем у Таллина и Хельсинки. Известны случаи почти горизонтального положения водной поверхности и пр.

Наиболее полной и совершенной характеристикой распределения водных масс по длине залива могла бы служить абсцисса центра тяжести объема в виде первого и второго начального моментов. Но редкая сеть пунктов наблюдений за уровнями и невысокая точность самих уровней не позволяют этого сделать. Единственно, что возможно оценить, это распределение воды посредством такой простой и надежно определяемой характеристики, как общее падение (разность отметок) между Таллином и Горным институтом. Падение отражает, помимо прочего, уклон водной поверхности, а значит и скорость течения воды.

Ежегодно падение уровня $\Delta Z = Z_{\text{Талл}} - Z_{\text{Гор.ин-т}}$ так же, как и объем W , подсчитаны для каждого наблюдаемого годового максимума уровня у Горного института (в момент пика нагона у Таллина). Координаты кривой обеспеченности $P(\Delta Z)$, построенные по 76-летнему ряду наблюдений (1903--1978 гг.) помещены в табл. 2.9.

В. Определение скорости и направления ветра над Финским заливом

Ветер, в конечном счете, почти единственная внешняя вынуждающая сила, притом наиболее изменчивая во времени и в пространстве. Поэтому требуется особый подход при назначении расчетных характеристик ветра. Задача эта весьма сложная из-за низкой точности и недостаточной репрезентативности самих наблюдений. Заметим еще, что для целей гидродинамических расчетов нужна характеристика ветрового поля над заливом в течение 12-часового периода времени после начального момента.

Разумеется, унификация многовариантных расчетов и вероятностная оценка полученных результатов немыслима без отказа от учета индивидуальных особенностей погоды, сопутствующих каждому наводнению.

Ветровое поле в циклоне изменчиво во времени и в пространстве. Если рассматривать лишь "наводненческие" цикло-

ны, притом в пределах органиченной акватории Финского залива между Таллином и Ленинградом, наконец, в продолжении только полсуток после пика уровня у Таллина, то положение несколько упрощается. Большой частью прохождения атмосферного фронта в циклоне через створ Таллин—Хельсинки и наступление пика уровня у Таллина по времени совпадают. Аналогично положение со створами Хамина—Мо-ху, Ломоносов—Кронштадт—Лисий Нос, поскольку скорость перемещения атмосферного фронта и скорость продвижения гребня длинной волны приблизительно одинаковы (40—60 км/ч). Конечно, ветер вблизи атмосферного фронта по пути перемещения последнего от Таллина до Ленинграда может и усилиться, и ослабеть. Для сравнительно небольшого участка залива Таллин—Ленинград это в равной мере вероятно. Подтверждением могут служить данные о максимальной скорости ветра (V_{\max}) в пунктах Таллин и Кронштадт за 59 случаев наводнений ($Z_{\max} > 160$ см БС) у Горного института, имевших место в период 1924—1978 гг. И средние \bar{V}_{\max} , и дисперсии $\sigma_{V_{\max}}^2$, и, наконец, кривые обеспеченности $P(V_{\max})$ по обоим пунктам практически совпадают.

Сосредоточим далее внимание на прифронтальной зоне, где ветер в циклоне достигает наибольшей силы. Зафиксированную максимальную скорость ветра в каком-либо пункте в момент прохождения через него прифронтальной зоны $V_t = V_{\max}$ будем рассматривать как своего рода реперную величину. Скорость же ветра, например, за 3 ч до максимума V_{t-3} найдем по эмпирической связи $V_{t-3} = f(V_t)$ или, если речь будет идти о проекции скорости ветра на ось залива, то по аналогичной связи

$$(V \cos \alpha)_{t-3} = f[(V \cos \alpha)_t], \quad (2.4)$$

где α — угол, образуемый направлением ветра и направлением оси залива (восток—запад). В частности, при западном ветре $\cos \alpha = 1,0$, при северном и южном ветрах $\cos \alpha = 0$. Для удобства написания вместо символа $V \cos \alpha$ будем здесь пользоваться обозначением V_x .

Сведения о максимальных скоростях ветра $V_t = V_{\max}$ и $V_{xt} = V_{x\max}$ за каждый случай годового максимума уровня у Горного института (1878—1978 гг.) заимствованы из различных источников, а именно:

— из материалов Ленинградского Бюро погоды за 25 случаев наиболее значительных наводнений (1924—1978 гг.).

Определения выполнены по синоптическим картам для середины участка Таллин—Ленинград;

— из таблиц ТМ-1 по Мощному за 24 случая;

— из таблиц ТМ-1 по Кронштадту и Ленинград-порт (как полусумма) за 52 случая.

В тех немногих случаях, когда в таблицах ТМ-1 имелись указания, что скорость ветра $V_{\max} > 20$ м/с, то принималось $V_{\max} = 23$ м/с.

По собранным ежегодным данным построены три кривые обеспеченности:

$$P(V_t) = P(V_{\max}); P(V_{x,t}) = P(V_{x,\max}); P[(VV_x)_t] = P[(VV_x)_{\max}]$$

Расчетное значение имеет лишь кривая $P[(VV_x)_t]$ (см. табл. 2.9). Забегая вперед укажем, что первые две кривые использованы при задании гидрометеорологической информации, нужной для расчетов на гидродинамической модели с целью установления зависимости максимального уровня Z_{\max} от обуславливающих факторов. Третья кривая положена в основу оценки вероятности превышения уровня Z_{\max} композиционным методом.

Экстраполяция кривой обеспеченности $P[(VV_x)_t]$ в область редкой повторяемости имеет в рамках поставленной задачи весьма важное значение. Поэтому была предпринята большая статистическая обработка синоптических карт Европы за 29-летний период (1946—1974 гг.) (более 20 000 карт). Просматривались синоптические карты в пределах обширного северо-западного европейского региона, в границах $53-72^\circ$ с. ш. и $0-35^\circ$ в. д., где интенсивность циклонической деятельности примерно одинакова. То, что циклон в пределах региона перемещался несколько севернее или несколько южнее, можно рассматривать как случайное событие. С учетом природы ленинградских наводнений отбирались глубокие циклоны, которые наблюдались в период с мая по декабрь и обладали следующими характеристиками:

— западная составляющая скорости ветра вблизи атмосферного фронта по ряду пунктов превышала 20 м/с (т. е. $V_{xt} > 20$ м/с);

— участок атмосферного фронта, где скорость ветра $V_{xt} > 20$ м/с, перемещался с запада на восток на расстояние 300—400 км за 6—9 ч.

При просмотре более 20 000 синоптических карт было обнаружено всего 18 циклонических образований с указанными

характеристиками. После исключения четырех случаев, где циклон двигался таким образом, что мог быть рассечен на две части Скандинавским горным массивом, осталось 12 случаев. Полученные материалы представляют интерес для оценки повторяемости синоптических ситуаций, которые потенциально могут служить причиной больших наводнений в Ленинграде.

Дальнейшая обработка синоптических материалов заключалась в следующем. Атмосферный фронт в циклоне совмещался со створом Таллин -Хельсинки, затем циклон двигался по своей траектории. По совмещенной синоптической карте для района островов Мощный и Гогланд находились скорости ветра V_t и V_{xt} . За первые пять случаев с наибольшими значениями V_t и V_{xt} точки нанесены на клетчатку вероятностей. При этом оценка их эмпирической обеспеченности выполнена с учетом того, что площадь восточной части региона, где только и может располагаться завершающий наводненческий циклон, составляет 1/6 долю площади всего региона. Следовательно,

$$P = \frac{m}{6 \cdot 29 + 1} \cdot 100 = \frac{m}{175} \cdot 100 \%$$

(где $n = 29$ есть число лет наблюдений). В табл. 2.7 приводятся фактические данные за отмеченные пять случаев.

Таблица 2.7

Наибольшие скорости ветра в циклонах,
перемещавшихся через северо-западный
европейский регион (1946—1974 гг.)

Год	Дата месяц, число	P %	Скорость ветра		
			V_t м/с	V_{xt} м/с	$(VV_x)_t$ м ² /с ²
1951	31/XI — 1/XII	0,6	27,5	26,0	715
1954	16/I	1,2	26,5	25,2	668
1957	24—25/XII	1,7	26,0	24,0	624
1951	15/X	2,3	25,0	22,7	569
1954	14—15/X	2,8	24,5	21,5	528

Итак, массовые данные о циклонах в пределах северо-запада Европы подтверждают репрезентативность имеющейся выборки о скоростях ветра над Финским заливом. Какого-либо исключительного по силе ветра, намного превосходящего все доселе известное, не отмечалось, по крайней мере, за период 1946–1974 гг. Достоверность кривых обеспеченности $P(V_t)$, $P(V_{xt})$, а главное кривой $P[(VV_x)_t]$ (табл. 2.8), подтверждается и материалами из климатических справочников и специальных монографий [3, 17]. Максимальная годовая скорость ветра с обеспеченностью $P = 5\%$ для северо-запада СССР составляет 22–24 м/с, а с $P = 1\%$ — 27–29 м/с. По нашим данным, скорость ветра несколько меньше (соответственно 20 и 27 м/с). Объясняется это двумя основными причинами: а — рассматривается не весь год, а лишь период, свободный ото льда (май–декабрь); б — принимается большей частью во внимание осредненная скорость ветра для некоторой территории. Заметим, что кривая обеспеченности $P[(VV_x)_t]$ в области редкой повторяемости ориентирована на точку с координатами $P = 0,01\%$; $(VV_x)_t = 1050 \text{ м}^2/\text{с}^2$. Последняя цифра соответствует скорости западного ветра $V_t = V_x = \sqrt{1050} \approx 33 \text{ м/с}$. Конечно, выполненная экстраполяция кривой $P[(VV_x)_t]$ не имеет абсолютно строгого обоснования, тем не менее сама кривая вполне достоверна. В частности, из массовых многолетних наблюдений по многим сотням метеорологических станций на европейской части СССР известно, что скорость ветра 35–40 м/с отмечается лишь в горных районах, а также на высотах 100–200 м над земной поверхностью.

Для оценки изменений скорости ветра во времени воспользуемся графиком связи между максимальной скоростью ветра $V_{t_1} = V_{\max}$ и скоростью за 3 ч до максимума V_{t-3} , т. е. $V_{t-3} = f(V_{t_1})$; то же за 6 ч $V_{t-6} = f(V_t)$ и т. д. Подобные эмпирические связи построены для пунктов Мощный, Кронштадт, Ленинград-порт (связи не приводятся). Общая для всех пунктов связь $V_{t-3} = f(V_t)$ тесная (коэффициент корреляции $r = 0,90$). По мере удаления от максимума связь ухудшается, но вплоть до $t + 12$ ч остается довольно отчетливой. Связи линейные, поэтому, например,

$$V_{t-3} = K V_t. \quad (2.5)$$

Ниже приводятся значения переходного коэффициента k в

выражениях, аналогичных (3.5) :

$$\frac{V_{t-3}}{V_t} = \frac{V_{t+3}}{V_t} = 0,92; \quad \frac{V_{t+9}}{V_t} = 0,74; \quad (2.6)$$

$$\frac{V_{t-6}}{V_t} = \frac{V_{t+6}}{V_t} = 0,86; \quad \frac{V_{t+12}}{V_t} = 0,55.$$

Изберем далее за начало отсчета момент t наступления пика уровня у Таллина. Примем во внимание, что у Таллина в этот момент как правило находится зона наибольшей скорости ветра в циклоне: спустя приблизительно 6 ч она переместится к Ленинграду. С учетом отмеченного, а также приведенных коэффициентов k составлена табл. 2.8.

Таблица 2.8

Изменение во времени и по длине Финского залива переходного коэффициента от скорости ветра вблизи атмосферного фронта у Таллина к скорости ветра на профиле

Расстояние поперечного профиля от Ленинграда по оси Финского залива, км	Момент времени, ч				
	t	$t + 3$	$t + 6$	$t + 9$	$t + 12$
0	0,86	0,92	1,00	0,92	0,86
90	0,89	0,96	0,96	0,89	0,80
180	0,92	1,00	0,92	0,86	0,74
270	0,96	0,96	0,89	0,80	0,65
320	1,00	0,92	0,86	0,74	0,55

Заметим, что фигурирующие в настоящей работе данные о скорости ветра получены по наблюдениям на береговых и островных метеорологических станциях. Над открытой водной

поверхностью скорость ветра заметно больше особенно в маловетренную погоду. Вопрос о пересчете скорости ветра с суши на воду с помощью системы поправочных коэффициентов или об определении скорости ветра над водой по градиенту атмосферного давления выходит за рамки данной работы. Подчеркнем лишь, что в используемых в настоящее время гидродинамических моделях фигурирует скорость ветра, наблюдаемая непосредственно на метеорологических станциях.

Г. Гидрометеорологическая информация для расчетов нагонных уровней воды методом гидродинамического моделирования

Расчет хода уровня воды при нагонах на одномерной гидродинамической модели заключается в численном интегрировании системы дифференциальных уравнений мелкой воды последовательно по отдельным частям Финского залива. Необходимо поэтому располагать исходной информацией по начальным, граничным и последующим условиям.

Н а ч а л ь н ы е у с л о в и я задаются в виде двух продольных профилей водной поверхности по оси Финского залива на участке от Таллина до Ленинграда — одного в момент пика нагона у Таллина, другого — за 1 ч до этого момента. Вид продольного профиля в момент пика нагона у Таллина, как отмечалось, довольно полно определяется двумя его характеристиками — объемом воды W и падением ΔZ на участке Таллин — Горный институт.

Координаты продольных профилей водной поверхности Финского залива помещены в табл. 2.10. При заданных значениях объема воды W и падения ΔZ профиль вычерчивался в виде плавной кривой. Продольные профили даны при строго фиксированных значениях объема W и падения ΔZ , имеющих в многолетнем ряду обеспеченность $P = 1; 5; 10; 20$ и 50% (табл. 2.9). При пяти значениях объема W и падения ΔZ всего получается 25 комбинаций. Еще два дополнительных случая даны при объеме W и падении ΔZ , имеющих обеспеченность P , равную $0,1$ и $0,2\%$.

Переходя далее еще к одному начальному условию (т. е. за 1 ч до пика нагона у Таллина), прежде всего отметим, что это условие мало влияет на конечные результаты расчета. Поэтому вопрос о его представлении не нуждается в особо детальной проработке. Продольные профили водной поверхности Финского залива за 1 ч до пика нагона у Таллина по-

лучены посредством трансформации исходного профиля (т. е. в момент пика нагона). При этом отметки исходного профиля умножались на соответствующий поправочный множитель $a = f(l)$, а именно:

Расстояние от Горного института, км	0	50	100	150	200	250	300	320
Множитель $a \dots (1,06)^*$	0,99	0,95	0,94	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92

Поправочные множители a установлены по локальным связям вида $Z_{t-1} = f(Z_t)$, где Z_t — уровень воды на посту в момент пика нагона у Таллина, Z_{t-1} — то же за 1 ч до пика. Связи строились лишь по тем реальным случаям, когда продольный профиль водной поверхности Финского залива имел наклон в сторону Ленинграда ($\Delta Z > 0$). Последнее согласуется с приведенными в табл. 2.9 значениями объема W и падения ΔZ . При обратном наклоне продольного профиля, т. е. ($\Delta Z < 0$) (что бывает крайне редко), множитель a

Таблица 2.9

Гидрометеорологические характеристики, при которых задана исходная информация для расчета обеспеченности максимального уровня композиционным методом

Характеристика	Размерность	Обеспеченность (P), %						
		0,1	0,2	1	5	10	20	50
Объем воды (W)	км ³	32,5	30,0	27,0	23,5	21,2	18,5	14,0
Падение (ΔZ)	см	145	134	108	78	62	45	10
Скорость ветра (V_t)	м/с	38,0	36,0	28,0	19,0	17,5	15,5	12,5
Скорость ветра (V_{xt})	м/с	36,0	34,0	27,5	17,0	14,5	12,0	10,0
Скорость ветра (VV_x) _t	м ² /с ²	900	845	645	300	230	180	110

* Для Горного института при $Z_t < 50$ см БС множитель $a = 1,02 + 2/Z_t$.

будет иным. По значениям поправочного множителя a не трудно заключить, что в течение часового интервала времени от $t - 1$ до t уровень воды на большей части залива повышается, а в вершине залива, наоборот, падает. Этот факт хорошо известен из наблюдений и полностью объясняется природой явления [5, 47]. Ведь первоначально вершина залива оказывается в восточной периферии циклона, где обычно господствует северо-восточный ветер, который создает сгоны воды.

Координаты продольных профилей водной поверхности Финского залива за 1 ч до пика нагона у Таллина помещены в табл. 2.10. Там же приведены расход воды Q и средняя скорость течения v в створе Таллин — Хельсинки. Расход воды ($\text{м}^3/\text{с}$) вычислен по балансовому соотношению

$$Q = \frac{(W_t - W_{t-1}) 10^9}{3600} \quad (2.7)$$

а скорости течения (м/с) по выражению

$$v = \frac{Q}{\omega} = \frac{Q}{2,5 \cdot 10^6} \quad (2.8)$$

Здесь W_t и W_{t-1} объем воды (км^3) в Финском заливе на участке Таллин — Ленинград в начальные моменты t и $t - 1$ (подсчитаны по формуле (2.3); $\omega = 2,5 \cdot 10^6 \text{ м}^2$ — площадь поперечного сечения залива в створе Таллин — Хельсинки.

Г р а н и ч н ы е у с л о в и я также сравнительно мало влияют на результаты расчетов. Они задаются здесь в виде кривой спада уровня у Таллина в течение 12 ч после пика нагона как начального момента $t = 0$. Ход уровня воды в этот период времени предвычислен по показательной функции

$$Z(i) = Z_t(m)^i = Z_t(0,95)^i \quad (2.9)$$

Ее единственный параметр ($m = 0,95$) найден как тангенс угла наклона линии связи

Таблица 2.10

Отметки продольного профиля водной поверхности по оси Финского залива (см БС)
при различном объеме W и падении ΔZ на участке Таллин-Горный институт

Расстояние от Ленинграда, км	$W = 32,5 \text{ км}^3$			$W = 30,0 \text{ км}^3$			$W = 27,0 \text{ км}^3$			$W = 23,5 \text{ км}^3$		
	ΔZ см	ΔZ см	ΔZ см	ΔZ см	ΔZ см	ΔZ см	ΔZ см	ΔZ см	ΔZ см	ΔZ см	ΔZ см	
0	145	134	108	78	62	45	10	108	78	62	45	10
90	120	103	84	93	97	102	110	67	72	74	82	93
180	141	136	118	116	115	114	112	102	102	102	101	98
270	144	139	128	123	121	119	114	117	113	109	104	101
320	145	140	130	125	122	120	115	120	115	110	105	102
Начальные условия в момент пика нагона у Таллина												
0	0	6	22	47	60	75	105	12	37	48	60	92
90	113	97	80	90	93	98	105	64	69	74	81	90
180	130	126	110	108	107	107	104	96	94	93	92	91
270	133	129	119	115	112	109	106	108	103	100	96	93
320	134	130	121	116	113	110	107	111	107	103	97	93
Начальные условия за 1 ч до пика нагона у Таллина												
0	2	7	24	50	63	78	107	14	40	51	62	99
90	113	97	80	90	93	98	105	64	69	74	81	90
180	130	126	110	108	107	107	104	96	94	93	92	91
270	133	129	119	115	112	109	106	108	103	100	96	93
320	134	130	121	116	113	110	107	111	107	103	97	93
Q тыс. м ³ /с	810	635	508	506	506	490	457	470	460	457	434	403
v м/с	0,32	0,26	0,20	0,20	0,20	0,20	0,18	0,19	0,18	0,18	0,17	0,16

Продолжение табл. 2.10

Расстояние от Ленинграда, км		W = 21,2 км ³					W = 18,5 км ³					W = 14,0 км ³				
		ΔZ см					ΔZ см					ΔZ см				
		108	78	62	45	10	108	78	62	45	10	108	78	62	45	10

Начальные условия в момент пика нагона у Таллина

0	7	32	43	55	83	2	27	38	50	72	-18	12	23	35	52
90	57	63	71	75	84	40	47	55	60	74	17	28	33	41	54
180	92	92	90	90	88	81	78	77	77	76	59	58	58	58	58
270	108	104	99	96	91	102	98	94	89	80	90	83	78	72	61
320	115	110	105	100	93	110	105	100	95	82	95	90	85	80	62

Начальные условия за 1 ч до пика нагона у Таллина

0	9	35	46	56	92	5	30	41	53	76	-12	14	25	38	56
90	54	60	68	72	81	38	45	53	57	76	17	27	33	39	53
180	86	84	83	82	81	75	73	72	71	71	55	55	54	54	64
270	99	96	93	88	84	93	91	86	80	73	83	77	73	66	56
320	107	103	97	93	87	100	95	92	86	76	89	83	78	73	59

0 тыс.м ³ /с	415	410	400	395	370	370	360	350	345	320	270	265	265	260	250
в м/с	0,17	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,13	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10

$$\lg Z_i = \lg Z_t + i \lg m. \quad (2.10)$$

По известной уже причине связь (2.10) строилась лишь по случаям, когда падение $\Delta Z > 0$. Связь очень тесная (коэффициент корреляции 0,94).

Последующие условия должны быть представлены в виде сводки числовых значений скорости ветра V_t и $V_{x,t}$ на оси Финского залива в узловых профилях (поперечниках) через каждые 3 ч после начального момента. В качестве расчетных характеристик приняты равнообеспеченные значения максимальной скорости ветра $V_t = V_{\max}$ и $V_{x,t} = V_{x,\max}$, которые в общем довольно близкие.

Как и для начальных условий, скорость ветра задана при пяти фиксированных значениях V_t и $V_{x,t}$, имеющих в многолетнем ряду обеспеченность P , равную 1; 5; 10; 20 и 50 % (табл. 2.8). Проверочный расчет сделан еще при V_t и $V_{x,t}$ с обеспеченностью P , равной 0,1 и 0,2 %. Изменение же скорости ветра во времени в узловых точках Финского залива получены на основании переходных коэффициентов из табл. 2.7 (не приводятся).

Д. Статистическая обработка результатов расчета максимальных нагонных уровней воды

По исходной гидрометеорологической информации о начальных, граничных и последующих условиях (табл. 2.7—2.9) выполнен расчет хода уровня воды по гидродинамическим моделям ЛОГОИН и ИГ СОАН. Всего выполнено 340 расчетов, из них 212 расчетов сделаны сотрудниками ГГИ на ЭВМ БЭСМ-3 в ИСЭП и 128 расчетов сотрудниками ИГ СОАН. Помимо указанного, выполнены еще по два проверочных расчета (для Горного института и Кронштадта) в предположении, что все исходные характеристики (W , ΔZ , V_t и $V_{x,t}$) имеют в своем ряду обеспеченность $P = 0,2$ и $0,1$ (повторяемость 1 раз в 500 и 1000 лет) (табл. 2.11).

С целью анализа совокупности рассчитанных данных построен ряд графиков, в частности:

- график связи между соответственными максимальными нагонными уровнями воды у Горного института по расчетам на моделях ЛОГОИН и ИГ СОАН;
- то же у Кронштадта;
- совмещенный график связи максимальных уровней воды Горный институт — Кронштадт по модели ЛОГОИН и ИГ СОАН;
- график связи $Z_{\max} = f[\Delta Z (VV_x)_t]$ при различных фиксированных значениях объема W .

Таблица 2.11

P, %	W, км ³	Исходные данные			Z _{max} см БС	
		ΔZ, см	V _t , м/с	V _{x,t} , м/с	Горный институт	Кронштадт
По гидродинамической модели ЛОГОИН						
0,1	32,5	145	38,0	36,0	666	604
0,2	30,0	134	36,0	34,0	623	566
По гидродинамической модели ИГ СОАН						
0,1	32,5	145	38,0	36,0	762	637
0,2	30,0	134	36,0	34,0	711	594

Полученные материалы позволяют сделать ряд выводов.

1. При уровнях $Z_{max} < 300-350$ см БС результаты расчетов по обоим моделям почти одинаковы. При $Z_{max} > 350$ см БС уже выявляется различие; следовательно, либо уровни по модели ЛОГОИН занижены, либо, напротив, уровни по модели ИГ СОАН завышены;

2. Соотношение рассчитанных максимальных нагонных уровней воды у Горного института и Кронштадта по модели ИГ СОАН близко к тому, что имеет место по натурным данным (отношение $Z_{max \text{ Гор.ин-т}}/Z_{max \text{ Крон.}} = 1,20$). По модели ЛОГОИН отношение $Z_{max \text{ Гор.ин-т}}/Z_{max \text{ Крон.}} = 1,12$;

3. Зависимость предвычисленного максимального нагонного уровня от обуславливающих факторов

$$Z_{max} = f [W, \Delta Z, (VV_x)_t] \quad (2.11)$$

линейная во всем возможном диапазоне, вплоть до уровней чрезвычайно редкой повторяемости (один раз в десятки и даже сотни и тысячи лет).

4. До того, как методом композиции будет построена кривая обеспеченности $P(Z_{max})$, невозможно отдать предпочтение одной или другой гидродинамической моделям. Основным критерием отбора должно быть совпадение рассчитанной и эмпирической кривых обеспеченности $P(Z_{max})$ в пределах наблюдаемых значений уровней Z_{max} , а также пример-

ное равенство предвычисленных и наблюдаемых максимумов за возможно большее число реальных случаев наводнений;

5. Основные характеристики реальных наводнений — объем W , падение ΔZ , скорость ветра V_t — являются почти независимыми переменными. В этом легко убедиться по графикам связи между ними. Об этом же свидетельствуют парные коэффициенты корреляции, вычисленные по 63-летнему ряду параллельных наблюдений (1903—1975 гг.), с перерывами, а именно:

$$r_{W\Delta Z} = -0,05; \quad r_{W_t V_t} = 0,30; \quad r_{\Delta Z_t V_t} = -0,04;$$

Средняя же квадратическая ошибка коэффициента корреляции S_r соразмерна с самим коэффициентом.

Как отмечалось, для применения метода композиции необходимо располагать функцией искомой величины — максимального уровня — от обуславливающих факторов /13/:

$$Z_{\max} = f [W, \Delta Z, (VV_x)_t]. \quad (2.12)$$

Применяя аппарат множественной линейной регрессии, получены следующие уравнения:

— по гидродинамической модели ЛОГОИН:
для Горного института

$$t_{\max} = 0,36 (VV_x)_t + 0,36\Delta Z + 3,47W + 77; \quad (2.12a)$$

для Кронштадта

$$Z_{\max} = 0,32 (VV_x)_t + 0,31\Delta Z + 3,34W + 70; \quad (2.12b)$$

— по гидродинамической модели ИГ СОАН:
для Горного института

$$Z_{\max} = 0,48 (VV_x)_t + 0,41\Delta Z + 2,28W + 69; \quad (2.13a)$$

для Кронштадта

$$Z_{\max} = 0,37(VV_x)_t + 0,33\Delta Z + 2,16W + 63; \quad (2.136)$$

где Z_{\max} в см БС, $(VV_x)_t$ — в $\text{м}^2/\text{с}^2$, ΔZ — в см, W — в км^3 .

Для удобства написания обозначим произведение коэффициента регрессии на соответствующую переменную через x , а именно:

$$k_1(VV_x)_t = x_1; \quad k_2\Delta Z = x_2; \quad k_3W = x_3. \quad (2.14)$$

Дополнительно примем во внимание, что имеет место случайная ошибка расчета по гидродинамической модели δz . Сложим ее со свободным членом c и обозначим $c + \delta z = x_4$. При этом в общем виде запишем

$$Z_{\max} = x_1 + x_2 + x_3 + x_4. \quad (2.15)$$

Вообще говоря, построение кривой обеспеченности $P(Z_{\max})$ при известной функции

$$Z_{\max} = f(x_1, x_2, x_3, x_4) \quad (2.16)$$

и наличии кривых плотности распределения вероятностей независимых переменных

$$f_1(x_1); \quad f_2(x_2); \quad f_3(x_3); \quad f_4(x_4)$$

может быть выполнено двумя приемами:
— путем численного решения интеграла

$$P(Z_{\max}) = \iiiii f_1(x_1) f_2(x_2) f_3(x_3) f_4(x_4) dx_1 dx_2 dx_3 dx_4 \quad (2.17)$$

по частной области, где $Z_{\max} > Z'_{\max}$ (здесь Z'_{\max} фиксированное значение уровня Z_{\max});

— путем последовательного применения интеграла свертки для двух переменных, например

$$f_{1,2}(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(x_1) f_2(y - x_1) dx_1, \quad (2.18)$$

где $y = x_1 + x_2$. В последующем кривая плотностей распределения вероятностей $f_{1,2,3,4}(y) = f(Z_{\max})$ в обычном порядке перестраивается в кривую обеспеченности $P(Z_{\max})$. Более удобным оказался второй прием. По ходу расчета можно было анализировать полученные результаты, устранять ошибки и пр.

Последовательное интегрирование по выражениям, аналогичным (2.18), осуществлено в вычислительном центре ГГИ по специально составленной программе на ЭВМ Минск-32. Кривые плотности распределения вероятностей

$$f_1(x_1); \quad f_2(x_2); \quad f_3(x_3)$$

установлены посредством дифференцирования соответствующих кривых обеспеченности

$$P_1(x_1); \quad P_2(x_2); \quad P_3(x_3)$$

с одинаковым шагом $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x_3 = 10$ см. Кривая же плотностей вероятностей $f_4(x_4)$ получена из предположения, что случайная ошибка расчета Z_{\max} на модели δZ распределена по нормальному закону; средняя же квадратическая ошибка равна для Горного института 20 см, для Кронштадта 15 см (судя по 34 проверочным расчетам для реальных наводнений за период 1950—1975 гг.).

Предвычисленные методом композиции кривые обеспеченности $P(Z_{\max})$, а также эмпирическая кривая $P(Z_{\max})$ для Кронштадта представлены на рис. 2.6, из которого видно, что кривые обеспеченности $P(Z_{\max})$, рассчитанные по гидродинамическим моделям ЛОГОИН и ИГ СОАН, различаются между собой незначительно. В целом имеет место неплохое совпадение предвычисленных и эмпирических кривых

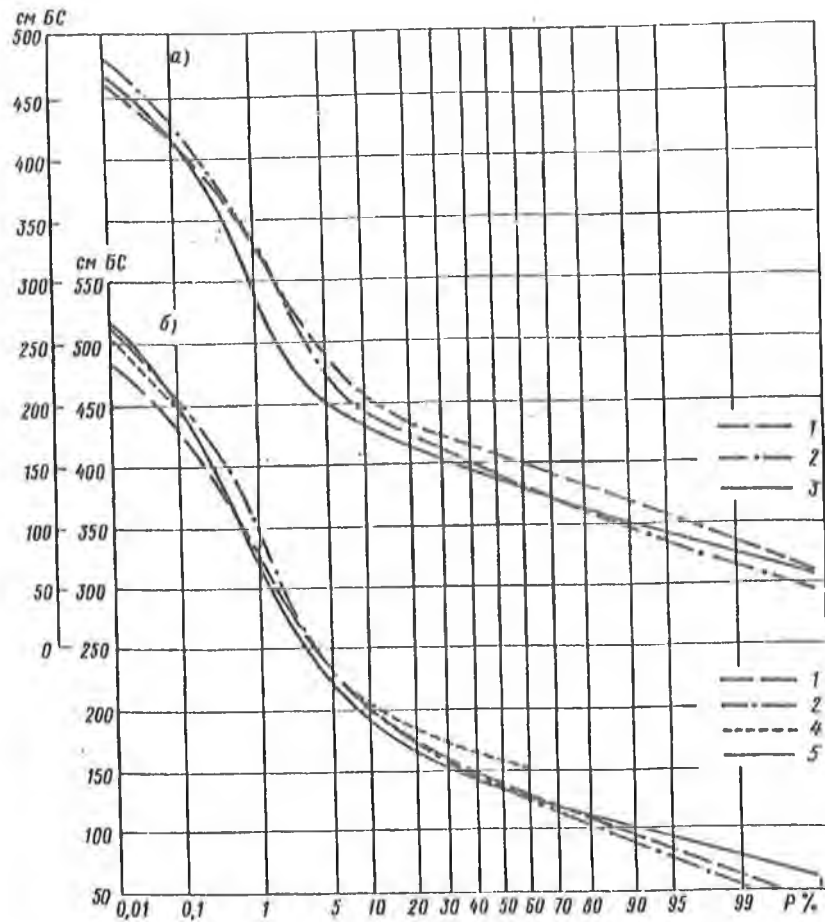


Рис. 2.6. Кривые обеспеченности максимального годового уровня воды Невской губы у г. Кронштадта в естественных (а) и проектных (б) условиях.

1 — по гидродинамической модели ЛОГОИН; 2 — по гидродинамической модели ИГ СОАН; 3 — по наблюдаемым данным и расчетам композиционным методом (принятая кривая); 4 — по гидравлической модели ГГИ с учетом принятой кривой для естественных условий; 5 — принятая кривая для проектных условий.

$P(Z_{\max})$. Тем не менее для Горного института лучше подходит модель ЛОГОИН, а для Кронштадта — модель ИГ СОАН. Факт этот не случаен. В течение ряда лет модель ЛОГОИН совершенствовалась с целью предсказания наводнений в Ленинграде; прогнозам же наводнений в Кронштадте придавалось меньшее внимание. Кроме того, по модели ЛОГОИН информации об уровнях Финского залива в начальный момент задается через 90 км, что приводит к чрезмерному огрублению (по модели ИГ СОАН — через 7,5 км). Наконец, судя по техническим отчетам указанных организаций, ошибки предвычисления максимального уровня Z_{\max} за случаи реальных наводнений (1924, 1948—1975 гг.) для Горного института несколько меньше по модели ЛОГОИН, а для Кронштадта — по модели ИГ СОАН.

По-видимому, при учете ряда дополнительных факторов нагонного наводнения — градиента атмосферного давления, площади ледяного покрова, расхода воды р. Невы и пр. — можно было бы добиться еще лучшего совпадения предвычисленной и эмпирической кривых $P(Z_{\max})$. Однако в гидродинамическом и математическом отношении задача оказалась бы неразрешимой.

С учетом всего изложенного при экстраполяции эмпирических кривых обеспеченности максимальных годовых уровней воды $P(Z_{\max})$ в области редкой повторяемости мы в основном ориентировались на результаты расчетов композиционным методом по гидродинамической модели ЛОГОИН для Горного института и по модели ИГ СОАН для Кронштадта. Впрочем, ориентация на осредненную расчетную кривую $P(Z_{\max})$ по двум моделям мало повлияла бы на конечные результаты.

В табл. 2.12 приводятся итоговые данные о максимальных годовых уровнях воды р. Невы и Невской губы различной повторяемости в естественных условиях. Там же указана средняя квадратическая ошибка ординаты кривой обеспеченности (по А. В. Рождественскому /42, 43/).

При выборе отметок гребня защитной дамбы встает также вопрос: одинаковы ли расчетные максимальные уровни воды по всему 25-километровому фронту сооружения. Общие соображения как будто указывают на то, что в период подъема должен иметь место наклон водной поверхности от середины залива к берегам, а при спаде, наоборот, — от берегов к середине. В случае преобладания ветра, например, северо-западного направления, нагонный подъем уровня воды на южном берегу Невской губы должен быть больше, чем на северном. Наличие силы Кориолиса должно приводить к обрат-

Таблица 2.12

Максимальные годовые уровни воды р. Невы
и Невской губы в естественных условиях

Обеспеченность (вероятность превышения), %	Повторяемость	Уровень, см БС		Средняя квадратическая ошибка, см	
		р. Нева — Горный институт	Невская губа — г. Кронштадт	р. Нева — Горный институт	Невская губа — г. Кронштадт
		0,01	1 раз в 10000 лет	540	465
0,1	1 раз в 1000 лет	475	410	36	25
1	1 раз в 100 лет	345	293	16	16
5	1 раз в 20 лет	257	200	11	10
20	1 раз в 5 лет	215	165	8	8
50	1 раз в 2 года	175	138	5	5

ному эффекту и т. д.

Для естественных условий поставленный вопрос нетрудно решить путем анализа графиков связи соответственных максимальных уровней воды на островных и береговых станциях Финского залива. При достоверных наблюдениях за уровнем и единой высотной основе средняя линия связи будет совпадать с линией равных значений, — если, конечно, отметки максимумов в целом одинаковые. Указанные связи построены для пунктов Кронштадт — Ломоносов и Кронштадт — Лисий Нос (связи не приводятся). Помимо соответственных максимумов, на связи наносились соответственные годовые минимумы, а также средние годовые уровни. Сделано это как с целью контроля, так и по соображениям методического характера. Если бы отметки нулей графиков постов были плохо увязаны, то линия связи максимумов оказалась бы, скажем, приподнятой над линией равных значений, настолько же, насколько и линия связи средних годовых уровней.

Оказалось, что средняя линия связи соответственных уровней совпадает с линией равных значений. То же самое относится к связям соответственных уровней по постам Гог-

ланд — Хамина и Гогланд — Кунда (связи не приводятся). Из этого можно сделать вывод, что в целом максимальные расчетные уровни воды посередине Финского залива и по берегам практически одинаковы. Иными словами, для всего фронта защитных сооружений должны приниматься одинаковые расчетные максимальные уровни воды. Впрочем, в отдельных пунктах береговой линии залива максимальные уровни могут заметно отличаться от уровней посередине залива (см. ниже).

Несмотря на сделанный вывод представляется необходимым более детально проанализировать наблюдавшиеся перекосы водной поверхности в створе защитных сооружений. С этой целью подвергались анализу ход уровней воды по пунктам Кронштадт, Ломоносов, Лисий Нос за все случаи нагонов с $Z_{\max} > 120$ см БС (1933—1975 гг., с перерывами). Выяснилось следующее:

а) пик нагона в указанных трех пунктах наступает, как правило, одновременно (с разницей 10—20 мин);

б) перекося водной поверхности не зависит от уровня; решающее значение здесь имеет направление и скорость ветра;

в) судя по максимальным уровням, в 35 % случаев имеет место вогнутая форма поперечного профиля водной поверхности залива (уровни воды на северном и южном берегах выше, чем у о. Котлин), в 25 % случаев — выпуклая форма. Еще в 40 % — водная поверхность залива наклонена с севера на юг или с юга на север;

г) в одном случае из десяти максимальный уровень воды при нагоне у о. Котлин может быть выше или ниже, чем у берегов, на 15 см, а в одном случае из ста — на 25 см.

Для возможности расчета максимальных годовых уровней воды Финского залива в проектных условиях нужны сведения о повторяемости максимальных уровней в естественных условиях по всему заливу от Кронштадта до Таллина. В некоторой мере аналогичное положение и с минимальными годовыми уровнями. По очевидным причинам поставленный вопрос не требует таких детальных проработок, какие, например, предприняты при обосновании расчетного максимума в створе защитного сооружения.

При расчете были использованы материалы многолетних наблюдений за уровнем в ряде пунктов Финского залива к западу от Кронштадта, а именно: Озерки, Старое Гарколово, Усть-Луга, Усть-Нарва, Мощный, Хамина, Гогланд, Кунда, Хельсинки, Таллин. Местоположение пунктов показано на рис. 2.3.

Самый простой путь нахождения расчетных максимальных

годовых уровней воды по длине Финского залива состоит в построении эмпирических кривых обеспеченности $P(Z_{\max})$ по отдельным пунктам с последующей их увязкой по продольному профилю. Однако имеющиеся ряды наблюдений непродолжительные. Кроме того, из-за наличия сужений и расширений, сложного очертания береговой линии, неровностей дна и пр. в прибрежной зоне залива на фоне общего подъема уровня отмечаются местные нагоны и сгоны. В ряде лет годовые максимумы у Кронштадта и других пунктах залива наступают в разные сроки.

Другой путь состоит в переносе расчетного уровня Z_{\max} у Кронштадта на иные пункты по связи соответственных уровней. Сами связи (не приводятся) довольно тесные, линейные. Однако найденный по связи уровень может быть занижен, поскольку, например, уровень у Мощного, соответствующий наблюдаемому годовому максимуму у Кронштадта, нередко оказывается заметно ниже максимального годового уровня, имевшего место у того же Мощного, но в другой момент времени.

Таким образом, и один, и другой приемы обладают недостатками. Чтобы уменьшить ошибку, в пределах вершины Финского залива были применены оба приема. По остальному заливу расчетные уровни Z_{\max} получены в обычном порядке по локальным кривым обеспеченности $P(Z_{\max})$ (пункты Хамина, Гогланд, Хельсинки, Таллин).

Продольные профили водной поверхности Финского залива с равнообеспеченными максимальными годовыми уровнями воды представлены на рис. 2.7; сами уровни указаны в табл. 2.13. Расстояние пункта от защитных сооружений

Таблица 2.13

Максимальные годовые уровни воды р. Невы
и Финского залива, см БС

Пункты	Расстояние от защитных сооружений, км	Обеспеченность, %				
		50	5	1	0,1	0,01
Максимальные годовые уровни в естественных условиях						
Горный институт	-30	175	257	345	475	540
Кронштадт	0	138	200	293	410	465
	10	134	195	285	405	454

Продолжение табл. 2.13

Пункты	Расстояние от защитных сооружений, км	Обеспеченность, %				
		50	5	1	0,1	0,01
	20	133	191	281	398	448
	30	130	189	276	393	440
Озерки — Серая Лошадь	40	128	185	268	380	430
	50	124	179	259	372	418
Приморск — Ст. Гарколово	60	120	172	250	356	400
	70	116	165	238	340	382
Выборг — Усть-Луга	76	112	161	232	320	368
	80	110	159	229	316	362
	90	104	153	222	308	353
	100	97	150	218	304	348
Мощный — Усть-Нарва	103	95	148	216	303	346
Хамина — Гогланд — Кунда	160	82	130	186	265	300
Хельсинки — Таллин	287	82	114	130	154	176
Максимальные годовые уровни в проектных условиях						
Кронштадт	0	—	222	325	455	515
	10	—	221	322	450	508
	20	—	212	316	441	497
	30	—	206	306	426	484
Озерки — Серая Лошадь	40	—	200	295	412	470
	50	—	193	285	398	450
Приморск — Ст. Гарколово	60	—	184	272	380	428
	70	—	176	255	358	404
Выборг — Усть-Луга	76	—	170	246	346	390
	80	—	169	242	340	384
	90	—	160	234	326	372
	100	—	154	226	316	360
Мощный — Усть-Нарва	103	—	153	222	312	358
Хамина — Гогланд — Кунда	160	—	130	186	265	300
Хельсинки — Таллин	287	—	114	130	154	176

(г. Кронштадт) дано по оси залива. Линии на продольном профиле проводились как плавные кривые с учетом изменения площади живого сечения залива. Как видно по рис. 2.7,

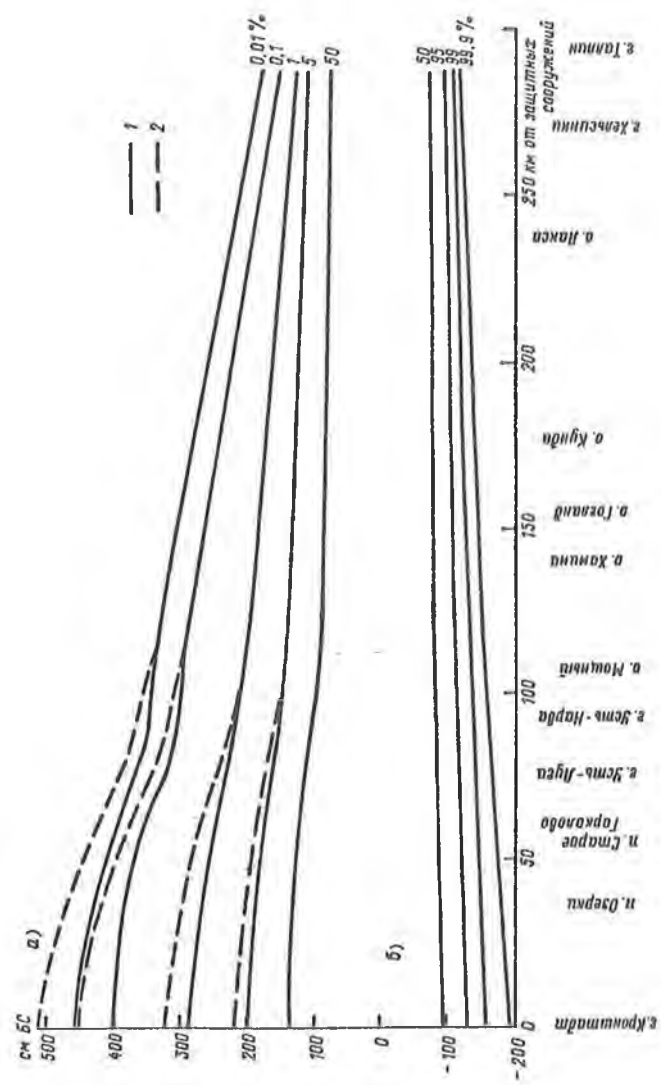


Рис. 2.7. Продольные профили водной поверхности Финского залива с равнообеспеченными максимальными (а) и минимальными (б) годовыми уровнями воды в естественных (1) и проектных (2) условиях.
У линий указана обеспеченность в %.

перелом продольного профиля происходит в основном в районе так называемой Нарвской стенки между створом Усть-Нарва—Виройки на западе и створом Шепелев—Приморск на востоке.

С учетом вышеизложенного представляется возможным рассчитать, какими будут максимальные годовые уровни воды Финского залива у Кронштадта и к западу от него после постройки защитных сооружений.

Строящиеся защитные сооружения встанут на пути длинной волны, распространяющейся с запада на восток вдоль Финского залива. Вода больше не будет расходоваться на заполнение Невской губы. Все это приведет к некоторому повышению гребня длинной волны на подходе к сооружениям, а, следовательно, и к повышению максимального уровня воды в нижнем бьефе сооружения (т. е. со стороны залива). С учетом указанного повышения уровня назначены габариты и конструкция самих сооружений.

Очевидно, что с возведением защитных сооружений произойдет повышение максимума на какой-то части акватории Финского залива. Встает вопрос: а не случится ли так, что, избавив Ленинград от наводнений, мы обречем на частые затопления Сестрорецк, Зеленогорск и другие города и поселки на побережья Финского залива.

Поставленная задача решалась двумя путями, именно:

- а) путем лабораторных экспериментов на гидравлической модели;
- б) путем численных экспериментов на гидродинамической модели.

Лабораторные эксперименты на гидравлической модели. Эксперименты выполнены В. Г. Носковым /37/ в русловой лаборатории ГГИ. Горизонтальный масштаб 1:10000, вертикальный масштаб 1:200, масштаб времени 5,1 с: 1 ч. Имитировалось распространение свободной длинной волны (всего 188 опытов).

Детальное рассмотрение полученных экспериментальных материалов не входит в нашу задачу. Остановимся лишь на результатах, имеющих прямое отношение к поставленной задаче.

Судя по выполненным опытам, при наличии защитных сооружений, высота гребня длинной волны возрастает (непосредственно перед сооружением — в среднем на 10—15 %). В целом по направлению с востока на запад, по мере удаления от сооружения, надбавка уровня ΔZ_{\max} уменьшается. За пределами вершины Финского залива, к западу от линии Приморск — Сескар — Усть-Луга, $\Delta Z_{\max} \approx 0$. Примечательно,

что самая большая надбавка ΔZ_{\max} имеет место не у сооружения, а в некотором удалении от него — в створе Толбухин — Красная Горка (10—12 км от южного участка защитной дамбы) и в створе Сестрорецк — Зеленогорск (0—7 км от северного участка дамбы) — см. рис. 1.6. Объясняется это, по-видимому, тем, что в измененных условиях залив оканчивается расширением, вытянутым с юго-запада на северо-восток. Появляется небольшой наклон водной поверхности в указанном направлении. Кроме того, у приглубого берега, вблизи Дюн и Солнечной, должен отмечаться эффект отражения волны.

В табл. 2.14 приводятся данные о максимальном годовом

Таблица 2.14

Максимальный годовой уровень воды Невской губы у г. Кронштадта в естественных условиях (Z_{\max}) и приращение уровня Финского залива в проектных условиях (ΔZ_{\max})

Поперечный профиль, пункт	Обеспеченность, %					
	0,01	0,1	1	5	20	50
	Уровень Z_{\max} см БС					
г. Кронштадт	465	410	293	200	165	138
	Приращение уровня ΔZ см					
Северные и Южные ворота	45	41	34	27	22	18
Сестрорецк — Зеленогорск	57	52	41	31	28	24
Толбухин — Красная Горка, Озерки — Шепелево	40	37	30	23	20	18
Приморск — Сескор — Усть-Луга	22	20	16	13	12	11

уровне воды у г. Кронштадта в естественных условиях различной обеспеченности (Z_{\max}) и соответствующих приращениях уровня в проектных условиях (ΔZ_{\max}) в пределах вершины Финского залива. Данные получены посредством несложной обработки материалов, содержащихся в техническом отчете ГГИ. Напомним, что они относятся лишь к свободной длинной волне.

Численные эксперименты на гидродинамической модели. Расчеты хода уровня воды в Невской губе у г. Кронштадта при нагонах в проектных условиях выполнены по гидродинамическим моделям ЛОГОИН и ИГ СОАН /40, 46/. Изменение программы счета на ЭВМ по сравнению с естественными условиями состояло в переносе граничного створа от устья р. Невы к Северным и Южным воротам у о. Котлин. Исходной служила та же гидрометеорологическая информация, что и при расчете хода уровня в естественных условиях (табл. 2.7—2.9). Всего выполнено 170 расчетов при различных комбинациях трех основных параметров нагона в фиксированный момент времени: объема W , падения ΔZ , скорости ветра $V_t = V_{\max}$ и $V_{xt} = V_{x\max}$. Дополнительно сделаны два контрольных расчета при значениях W , ΔZ , V_t и V_{xt} , имеющих в многолетнем ряду повторяемость 1 раз в 500 и 1000 лет ($P = 0,1$ и $0,2\%$); максимальный уровень (см БС) оказался равным:

	1 раз в 500 лет	1 раз в 1000 лет
По модели ЛОГОИН, см БС	600	614
По модели ИГ СОАН, см БС	640	661

При анализе полученных данных (не приводятся) обращает на себя внимание, что с постройкой защитных сооружений максимальный нагонный уровень воды перед дамбой у г. Кронштадта может оказаться не только выше (что вполне понятно), но также и ниже, чем в естественных условиях. Последнее характерно для сравнительно небольших наводнений. Причина столь необычного, на первый взгляд, явления кроется в ином, чем в естественных условиях, сочетании отраженной длинной волны с ветровыми нагонами и сейшмами. Надо думать, по той же причине не обнаруживается сколько-нибудь тесной связи между соответственными максимальными уровнями в естественных и проектных условиях, хотя чем выше уровень Z_{\max} , тем, как правило, и больше приращение ΔZ_{\max} .

На основании данных гидродинамических расчетов установлена аналитическая зависимость вида (2.12)

$$Z_{\max} = f[W, \Delta Z, (VV_x)_t],$$

которая для проектных условий так же, как и для естественных, оказалась тесной, линейной, а именно:

— по гидродинамической модели ЛОГОИН

$$Z_{\max} = 0,37(VV_x)_t + 0,44\Delta Z + 2,56W + 57; \quad (2.19)$$

— по гидродинамической модели ИГ СОАН

$$Z_{\max} = 0,41(VV_x)_t + 0,52\Delta Z + 0,44W + 78, \quad (2.20)$$

где Z_{\max} в см БС, $(VV_x)_t$ — в $\text{м}^2/\text{с}^2$, ΔZ — в см, W — в км^3 .

Дальнейшая статистическая обработка материалов, подобно предыдущему, заключалась в построении кривых обеспеченности максимального уровня $P(Z_{\max})$ в проектных условиях методом композиции законов распределения. Для наглядности на рис. 2.6 б совмещены кривые обеспеченности $P(Z_{\max})$ по гидродинамическим моделям ЛОГОИН и ИГ СОАН, а также по гидравлической модели ГГИ. Последняя получена путем сложения соответствующих величин уровня Z_{\max} в естественных условиях из табл. 2.12 и приращений уровня из табл. 2.14. На рис. 2.6 а изображена также кривая обеспеченности $P(Z_{\max})$ для естественных условий.

Как видно по рис. 2.6 б, все три кривые обеспеченности максимального годового уровня $P(Z_{\max})$ в створе защитных сооружений в проектных условиях $P(Z_{\max})$ — несмотря на то, что они получены независимым путем — в целом довольно близкие. Разница не превышает 20—30 см. Однако совпадение предвычисленных кривых обеспеченности $P(Z_{\max})$ является необходимым, но недостаточным критерием их достоверности. Ведь и для естественных условий предвычисленные кривые $P(Z_{\max})$ как-то отличались от кривой $P(Z_{\max})$, полученной по натурным наблюдениям, в особенности в диапазоне обеспеченности $1 < P < 5 \%$.

Ввиду невысокой точности расчетов окончательное обоснование кривой обеспеченности $P(Z_{\max})$ для проектных условий целесообразно осуществить путем введения к уровням по кривой $P(Z_{\max})$ для естественных условий добавку $\Delta Z_{\max} = Z_{\max \text{ проект}} - Z_{\max \text{ естест.}}$. Саму же добавку ΔZ_{\max} установим двумя приемами:

а) как разность равнообеспеченных ординат каждой предвычисленной кривой $P(Z_{\max})$ для проектных условий

(рис. 2.6 б) и принятой кривой $P(Z_{\max})$ для естественных условий (рис. 2.6 а). При этом получены следующие осредненные значения по трем моделям:

P %	0,01	0,1	1	3	5	20	50
ΔZ_{\max} см. . . .	37	37	42	39	26	13	3
ΔZ_{\max} %	8	9	14	18	13	8	2

б) как разность равнообеспеченных ординат соответствующих предвычисленных кривых $P(Z_{\max})$ для проектных и естественных условий. Средние значения ΔZ_{\max} (включая данные расчетов на гидравлической модели ГГИ) таковы:

P %	0,01	0,1	1	3	5	20	50
ΔZ_{\max} см. . . .	33	26	15	(11)	(9)	(7)	(3)
ΔZ_{\max} %	7	6	5	(5)	(4)	(4)	(2)

(Заметим, что если $Z_{\max} < 0$, то для осторожности принималось $Z_{\max} = 0$ — см. цифры в скобках).

Таким образом, в диапазоне обеспеченности $0,01 < P < < 5$ % добавки уровня ΔZ_{\max} колеблются от 9 до 42 см, или от 4 до 18 % самого подъема. При существующей точности расчетов детализация добавки в зависимости от уровня Z_{\max} или от обеспеченности P практически невозможна. Правильно будет принять некоторую постоянную относительную добавку, равную 11 % (считая от подъема уровня в естественных условиях). С учетом этого проведен верхний участок кривой обеспеченности $P(Z_{\max})$ в диапазоне $0,01 \leq P \leq 5$ % (рис. 2.6 б). Участок же кривой $P(Z_{\max})$ в диапазоне $5 < P \leq 20$ % прочерчен таким образом, чтобы значение ΔZ_{\max} постепенно уменьшалось от 11 до 0 %. Наконец, при $P > 20$ % кривая $P(Z_{\max})$ для проектных и естественных условий полностью совпадают (поскольку Ленинград будет защищаться от наводнений с уровнем $Z_{\max} > 180$ см БС у Горного института, чему соответствует уровень $Z_{\max} > > 160$ см БС у Кронштадта).

Заметим, что для створа защитных сооружений в проектных условиях как максимальный уровень Z_{\max} , так и кривая обеспеченности уровня $P(Z_{\max})$ установлены в предположении, что судо- и водопропускные отверстия полностью закрыты с начала подъема. В действительности, отверстия будут закрываться при достижении на подъеме уровня $Z \approx \approx 100$ см БС. Как это повлияет на максимум? Чтобы ответить на поставленный вопрос, в ИГ СОАН был выполнен расчет хода уровня воды за четыре различных случая нагонных навод-

нений со следующими параметрами:

Случай	W км ³	ΔZ см	V_t м/с	V_{xt} м/с
1	27,0	108	15,5	12,0
2	27,0	108	28,0	27,5
3	18,5	45	15,5	12,0
4	18,5	45	28,0	27,5

и при условии, что отверстия в дамбе закрываются при достижении уровня $Z = 50; 110$ и 150 см БС. В пределах точности гидродинамических расчетов ($10-20$ см) не удастся выявить, как влияет момент закрытия отверстий в дамбе на максимум. По-видимому, с перекрытием отверстий возникает небольшое колебательное движение водных масс у самих сооружений, которое довольно быстро затухает и различным образом комбинируется с подходящей сюда длинной волной.

Согласно принятой кривой обеспеченности $P(Z_{max})$ (рис. 2.6 б), в табл. 2.15 указаны максимальный годовой

Таблица 2.15

Максимальный годовой уровень воды Финского залива у г. Кронштадта в проектных условиях

Обеспеченность (вероятность превышения), %	Повторяемость	Уровень, см БС	Средняя квадратическая ошибка, см
0,01	1 раз в 10 000 лет	515	49
0,1	1 раз в 1 000 лет	455	33
1	1 раз в 100 лет	325	21
5	1 раз в 20 лет	222	13
20	1 раз в 5 лет	165	10
50	1 раз в 2 года	138	7

уровень воды Финского залива у г. Кронштадта перед защитными сооружениями, а также средняя квадратическая ошибка его определения, в предположении, что для проектных условий относительная ошибка несколько больше (примерно на 20 %), чем для естественных условий.

Как отмечалось, с постройкой защитных сооружений максимальные уровни по длине Финского залива, к западу от сооружений, несколько повысятся.

Максимальный годовой уровень в каком-либо пункте Финского залива в проектных условиях нетрудно получить, складывая две соответствующие величины, именно: максимальный уровень в естественных условиях Z_{\max} (табл. 2.13) и приращения уровня ΔZ_{\max} . Для удобства подсчетов приращение уровня в каком-либо пункте залива ($\Delta Z_{\max l}$) выражено в относительных величинах, т. е. в долях от соответствующего приращения уровня у Кронштадта $\Delta Z_{\max \text{Крон}}$. Нужные данные заимствованы из опытов В. Г. Носкова на гидравлической модели. Отношение приращений уровней $\Delta Z_{\max l} / \Delta Z_{\max \text{Крон}}$ почти не зависит от исходного уровня ΔZ_{\max} у Кронштадта. Координаты кривой

$$\frac{\Delta Z_{\max l}}{\Delta Z_{\max \text{Крон}}} = f(l) \quad (2.21)$$

(где l — расстояние от защитных сооружений в км) следующие:

l км	0	15	30	50	75	100	140
$\frac{\Delta Z_{\max l}}{\Delta Z_{\max \text{Крон}}}$	1,00	1,10	0,80	0,65	0,40	0,20	0,00

С помощью выражения (2.21), учитывая максимальные уровни залива в естественных условиях (табл. 2.13), наконец, зная приращение уровня у Кронштадта (как разность кривых $P(Z_{\max})$, представленных на рис. 2.6 а и 2.6 б), были рассчитаны максимальные годовые уровни в различных пунктах Финского залива в проектных условиях (табл. 2.13). По данным этой таблицы на рис. 2.7 изображены продольные профили залива с равнообеспеченными максимальными годовыми уровнями воды.

2.3. Минимальные годовые уровни воды Финского залива и устья р. Невы

Как отмечалось, в устье р. Невы и в Невской губе самые низкие в году уровни всегда отмечаются при сгонах воды,

которые создаются восточным ветром. Ветер этого направления может быть как при циклональной, так и антициклональной погоде. Очень большие сгоны бывают в том случае, когда циклон и антициклон располагаются парой, причем так, что стык их приходится на Финский залив. Ветровые потоки на стыке циклона и антициклона достигают особой силы и устойчивости.

Для оценки повторяемости минимального годового уровня р. Невы у Горного института использованы многолетние, почти непрерывные наблюдения по самописцу с 1878 по 1978 г. По Невской губе у г. Кронштадта, помимо самописца уровня (1898–1978 гг.), велись учащенные наблюдения (4–8 раз в сутки) с 1836 по 1897 г.

Минимальные годовые уровни воды у Горного института и Кронштадта (табл. 2.16) установлены по эмпирическим кривым обеспеченности $P(Z_{min})$. Их экстраполяция в области редкой повторяемости выполнена графическим путем. При этом учтено, что, как следует из анализа причин возникновения больших сгонов воды, самый низкий наблюдаемый уровень в устье р. Невы (–124 см БС, 2/XI 1910 г.) не является предельным. По свидетельству Крафта /16/ 9/IX 1744 г. в Петербурге сильным восточным ветром выгнало почти всю воду из каналов. Если принять во внимание глубину каналов в то время, то минимальный уровень у Горного института должен быть –140 см БС, а его эмпирическая обеспеченность $P \approx 0,3\%$. На точку 1744 г. и ориентирован нижний участок кривой $P(Z_{min})$.

Заметим, что кривая обеспеченности $P(Z_{min})$ у Кронштадта имеет большую асимметрию, чем кривая $P(Z_{min})$ у Горного института. Это объясняется заметным влиянием расхода воды на низкие уровни в устье р. Невы и почти полным отсутствием такого влияния в вершине Финского залива. Значительная асимметрия кривой обеспеченности $P(Z_{min})$ затрудняет ее экстраполяцию. Тем не менее наличие весьма продолжительных наблюдений (с 1836 г.) дает уверенность в том, что установленные минимальные годовые уровни редкой повторяемости (табл. 2.15) вполне надежны.

Минимальные годовые уровни воды в различных пунктах Финского залива (табл. 2.15) определялись тем же способом, что и максимальные. Исходным служил рассчитанный уровень Z_{min} у Кронштадта. На другие пункты он переносился по связи соответственных уровней. По рассчитанным уровням на гидрологических постах вычерчивались продольные профили водной поверхности (не приводятся).

Уместно поставить вопрос: изменятся ли минимальные

Таблица 2.16

Минимальные годовые и зимние уровни воды
р. Невы и Финского залива, см БС

Створ	Расстояние от защитных сооружений, км	Обеспеченность, %			
		50	95	99	99,9
Минимальные годовые уровни воды					
Горный институт	-30	-75	-114	-132	-156
	0	-94	-134	-164	-195
	10	-92	-132	-160	-190
	20	-92	-128	-156	-186
	30	-88	-126	-154	-184
Озерки	40	-86	-123	-150	-180
	50	-84	-120	-146	-174
Старое Гарколово	60	-82	-118	-142	-170
	70	-80	-114	-139	-166
Выборг — Усть-Луга	76	-78	-114	-138	-164
	80	-78	-113	-136	-162
	90	-78	-112	-134	-160
	100	-76	-110	-132	-157
Усть-Нарва — Мощный	103	-76	-110	-132	-156
Кунда — Гогланд — Хамина	160	-74	-105	-122	-142
Таллин — Хельсинки	287	-70	-92	-104	-116
Минимальные зимние уровни воды					
Горный институт	-30	-66	-110	-131	-156
Кронштадт	0	-83	-121	-145	-176
	10	-83	-120	-144	-170
	20	-82	-116	-142	-166
	30	-80	-114	-138	-161
	40	-76	-112	-134	-156
Озерки	50	-74	-108	-130	-151
	60	-72	-105	-126	-146
Старое Гарколово	70	-68	-100	-120	-140
	76	-67	-98	-118	-138
Выборг — Усть-Луга	80	-66	-96	-116	-136
	90	-63	-92	-112	-130
	100	-60	-88	-106	-124
Усть-Нарва — Мощный	103	-60	-86	-104	-123

годовые уровни Финского залива с возведением защитных сооружений? По-видимому, не изменятся! Для подобного утверждения есть основания. При сгонах отверстия в защитных сооружениях остаются открытыми. Сгон — явление длительное, охватывающее большие водные пространства Финского залива.

2.4. Максимальные и минимальные зимние уровни воды Финского залива и устья р. Невы

Выборка сведений о максимальном и минимальном уровне воды за зимний период сопряжена с условностью. Ледяной покров Финского залива в Северных и Южных воротах в большинстве лет неустойчив. При штормах ледяной покров взламывается, в особенности в начале зимы. Еще более неустойчив процесс замерзания. Плавающий лед в Невской губе раньше всего появляется у берегов, затем этот лед смерзается в забереги, которые вначале довольно быстро, а затем все медленнее продвигаются скачкообразно в направлении центральной части губы. В тихую морозную погоду губа сплошь покрывается неподвижным льдом в течение 2–3 дней. При неустойчивой погоде замерзание Невской губы растягивается на 2,0–2,5 месяца. Весной в губе плавающий лед держится от 5–8 до 15–20 дней. Также неустойчив ледяной покров и в устье р. Невы, в частности у Горного института. Здесь это связано с работой ледоколов и сбросом больших масс теплых промышленных вод. Добавим к сказанному, что подробные сведения о ледовых явлениях у Кронштадта и Горного института имеются не за все годы.

Представляется поэтому целесообразным пойти на следующую условность. Под зимним периодом следует понимать период от появления льда осенью до исчезновения льда весной. Ледоставный же период начинается от первого дня образования устойчивого покрова в начале зимы до дня вскрытия в конце зимы. В таком подходе есть практический смысл. Для некоторых элементов гидротехнических сооружений могут представлять опасность как отдельные ледяные поля в начале зимы, так и сторощенный лед в середине зимы.

Максимальные и минимальные уровни воды за зимний период и период ледостава выбраны из справочников, гидрологических морских ежегодников и водомерных книжек. На их основании построены эмпирические кривые обеспеченности $P(Z_{\max})$ и $P(Z_{\min})$ для Горного института и Кронштадта в двух вариантах: за зимний период и за период ледостава (табл. 2.17). При этом по Горному институту для зимнего периода использован 102-летний ряд наблюдений (с 1877-78 по 1976–79 гг.), а по Кронштадту -- 144-летний ряд (с 1835-36 по 1976–79 гг.). Для периода же ледостава ряд наблюдений по Кронштадту более короткий (с зимы 1888-89 гг.). До 1888 г. подробных данных о ледовых явлениях не имеется.

Вопрос о зимних уровнях Финского залива связан еще с

Таблица 2.17

Максимальные и минимальные зимние уровни воды
р. Невы и Невской губы в естественных условиях, см БС

Обеспеченность, %	р. Нева—Горный институт		Невская губа—т. Кронштадт	
	зимний период	период ледостава	зимний период	период ледостава
	Максимальные уровни воды			
0,1	335	300	280	250
1	282	252	230	203
5	233	207	187	165
20	180	160	147	130
50	137	127	116	97
	Минимальные уровни воды			
50	-66	-64	-83	-82
80	-87	-84	-99	-97
95	-110	-105	-121	-114
99	-131	-124	-145	-129
99,9	-156	-148	-176	-156

одной условностью. Дело в том, что при зимних наводнениях в Ленинграде граница сплошного ледяного покрова редко когда располагается западнее меридиана о. Мощный. У Таллина же залив вообще не замерзает. С другой стороны, одна из целей определения максимального уровня залива (зимнего и годового) — это оценка влияния защитных сооружений на естественный уровень режим залива. Представляется поэтому целесообразным, во-первых, ограничиться восточной частью залива (до Мощного). Во-вторых, рассматривать совокупность максимального зимнего уровня у Кронштадта и соответствующих ему уровней в различных пунктах залива, несмотря на ледовую обстановку в этих пунктах.

Как и прежде, перенос рассчитанных зимних уровней Z_{\max} и Z_{\min} у Кронштадта на другие пункты Финского залива (табл. 2.18) выполнен с помощью связей соответственных уровней и продольных профилей водной поверхности. Причем сами связи соответственных уровней в естественных условиях строились по наблюдаемым данным, а в

Таблица 2.18

Максимальные зимние уровни воды
р. Невы и Финского залива, см БС

Створ	Расстояние от защитных сооружений, км	Обеспеченность, %			
		50	5	1	0,1
Максимальные зимние уровни в естественных условиях					
Горный институт	-30	137	233	282	335
Кронштадт	0	116	187	230	280
	10	112	184	227	276
	20	108	181	222	270
	30	104	176	216	260
	40	98	172	210	250
Озерки — Серая Лошадь	50	94	162	198	238
	60	88	150	186	220
Приморск — Старое Гарколово	70	84	138	170	204
	76	80	134	164	197
Выборг — Усть-Луга	80	78	132	160	190
	90	74	128	154	181
	100	74	125	150	176
Мощный — Усть-Нарва	103	74	124	148	174
Максимальные зимние уровни в проектных условиях					
Кронштадт	0	116	200	256	311
	10	112	194	253	307
	20	108	190	246	298
	30	104	183	236	285
	40	98	177	224	270
Озерки — Серая Лошадь	50	94	166	210	254
	60	88	154	196	236
Приморск — Старое Гарколово	70	84	142	183	220
	76	80	140	174	209
Выборг — Усть-Луга	80	78	136	170	200
	90	74	130	160	189
	100	74	127	155	182
Мощный — Усть-Нарва	103	74	126	153	180

проектных условиях — по рассчитанным величинам. По-видимому, с возведением защитных сооружений в зимний период произойдет несколько меньшее повышение уровня залива, чем в летне-осенний. Однако из наблюдений известно, что кромка неподвижного ледяного покрова в заливе от года к году занимает различное положение. Поэтому для осторожности будем считать, что повышение уровня при наличии и отсутствии льда практически одинаково.

2.5. Максимальные и минимальные уровни воды р. Невы

Почти любые колебания водной поверхности Финского залива, вызванные нагоном и сгоном, длинной волной и сейшей, приливом и отливом, передаются в Невскую губу, значительно усиливаются в ней из-за мелководности и, распространяясь вверх по реке, постепенно затухают. Ход уровней воды в различных пунктах р. Невы во время нагонного наводнения изображен на рис. 2.8.

По мере продвижения вверх по р. Неве влияние Финского залива ослабевает, но усиливается влияние Ладожского озера (точнее расхода воды из озера). В самом истоке реки у г. Петрокрепости уровень всецело следует за расходом воды. Чем выше уровень Ладоги, тем толще слой воды, переливающейся через песчано-каменистую грядку, которая отгораживает юго-восточную часть Шлиссельбургской губы озера от реки. В то же время с повышением уровня озера уменьшается доля расхода воды, следующего по искусственной ложбине — Кошкинскому фарватеру. Всем этим объясняется своеобразное (двойковогнутое) очертание кривой расходов $Q_{Нева}(Z_{Ладога})$. Помимо расхода воды, а также нагонов и сгонов, на уровень р. Невы влияют зажоры и заторы льда.

С учетом отмеченных выше особенностей водного и ледового режима р. Невы в каждом ее пункте можно различать три годовых максимума уровня воды и три годовых минимума. Методика расчета указанных экстремумов описана в статье Р. А. Нежиховского /33/, и здесь ограничимся краткими замечаниями.

Первый по времени максимум уровня в реке связан с прохождением наибольшего в году расхода воды (как правило, в июне). В маловодные по весне годы в случае наступления дождливого лета максимум смещается на летние и даже осенние месяцы. Продолжительность стояния уровня, близкого к максимуму, довольно велика — 1,0—1,5 месяца.

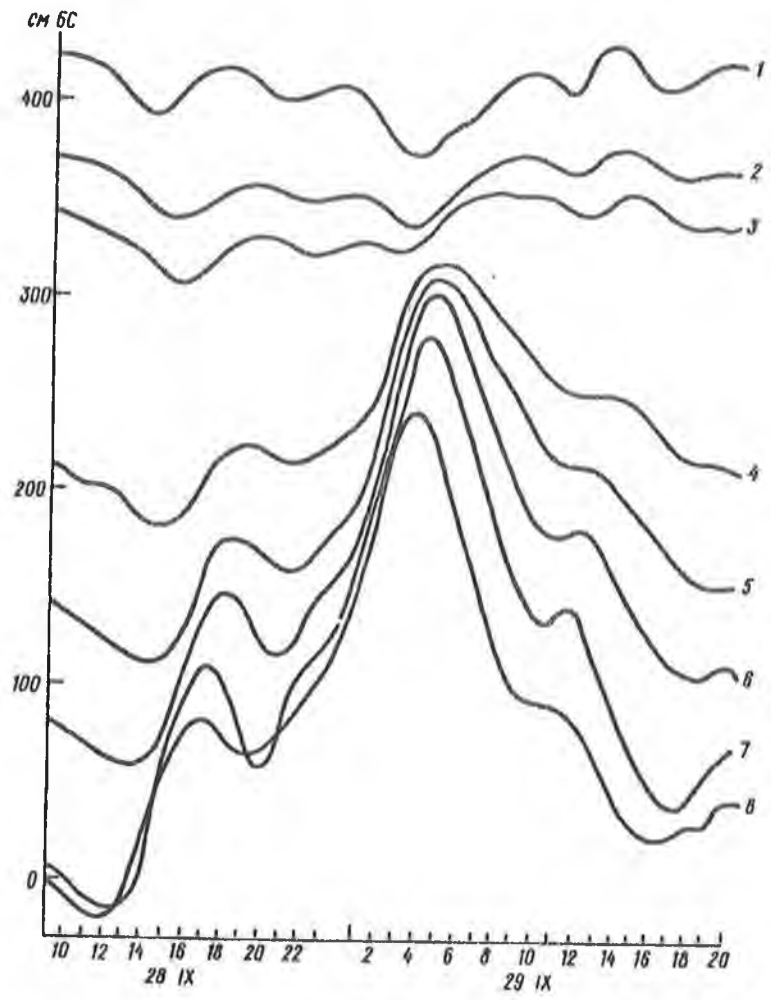


Рис. 2.8. Ход уровней воды в различных пунктах р. Невы и Невской губы во время наводнения 28—29/IX 1975 г.

1 — Петрокрепость, 2 — Угольный причал, 3 — Пески, 4 — Ивановское, 5 — Понтонная, 6 — Новосаратовка, 7 — Горный институт, 8 — Кронштадт.

Максимальные уровни в различных пунктах реки установлены в помощью "елочки" кривых расходов воды $Q(Z)$ (т. е. совмещенного графика кривых $Q(Z)$, где уровни даны в единой Балтийской системе отметок) при известных максимальных годовых расходах $Q(Z)$ той или иной обеспеченности (табл. 2.18). Расход Q_{\max} принимался одинаковым по всей реке (ввиду незначительности бокового притока).

Второй по времени максимум приходится на осенний период (большой частью на октябрь—декабрь) и обусловлен продвижением вверх по реке нагонной волны из Финского залива (точнее, обратной положительной волны). Длительность стояния высоких уровней невелика (2—3 ч). Исходным для расчета послужил ранее установленный максимальный годовой уровень р. Невы у Горного института различной обеспеченности $Z_{\max \text{ Гор. ин-т}}$. На пункты, где имелись ежечасные наблюдения по самописцам (Литейный мост, Охтинский мост, з-д „Большевик”, Новосаратовка, Понтонная, Ивановское) исходный уровень $Z_{\max \text{ Гор. ин-т}}$ перенесен по связям соответственных уровней. Далее строился продольный профиль водной поверхности реки, составленный из равнообеспеченных уровней Z_{\max} , с которого и снимались уровни Z_{\max} для остальных пунктов. Заметим, что упомянутые связи соответственных уровней и продольные профили строились отдельно для расходов $Q_{\text{Нева}} \approx 2500 \text{ м}^3/\text{с}$ и $Q_{\text{Нева}} \approx 3500 \text{ м}^3/\text{с}$. Большие нагоны, как правило, бывают в многоводные годы, и поэтому уровни Z_{\max} обеспеченностью $P \leq 5\%$ устанавливались по связям и профилям при расходе $Q_{\text{Нева}} \approx 3500 \text{ м}^3/\text{с}$.

Можно отметить, что описанный способ переноса наблюдаемого максимального нагонного уровня в устье р. Невы на всю остальную реку мало пригоден для каждого конкретного наводнения. Для достижения поставленной цели обратимся к рис. 2.9, на котором схематично изображены продольные профили водной поверхности р. Невы в различные моменты наводнения. По мере продвижения вверх по реке высота нагонной волны уменьшается. Отношение высоты гребня нагонной волны в i -ом пункте к высоте гребня волны у Горного института (где высота исчислена над положением водной поверхности, соответствующей наблюдаемому расходу)

$$\frac{\Delta Z_{\max i}}{\Delta Z_{\max \text{ Гор. ин-т}}} = \frac{Z_{\max i} - Z_i(Q_{\text{Нева}})}{Z_{\max \text{ Гор. ин-т}} - Z_{\text{Гор. ин-т}}(Q_{\text{Нева}})}$$

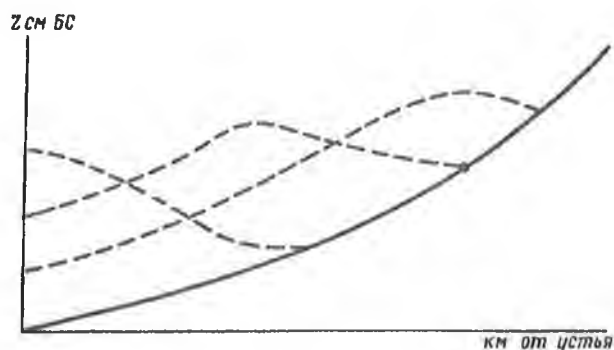


Рис. 2.9. Схема распространения нагонной (длинной) волны вверх по р. Неве (пунктирные линии).

Сплошной линией показан продольный профиль водной поверхности реки при каком-либо расходе воды.

должно быть тем меньше, чем больше перепад преодолевает волна. При данном расходе воды $Q_{\text{Нева}}$ перепад $Z_i(Q_{\text{Нева}}) - Z_{\text{Гор.ин-т}}(Q_{\text{Нева}})$. Для простоты вычислений примем во внимание, что уровень у Горного института почти не зависит от расхода. Заменяем уровень его средним многолетним значением, или ординаром (11 см БС). При этом отношение высот гребня нагонной волны

$$\frac{\Delta Z_{\text{max } i}}{\Delta Z_{\text{max Гор.ин-т}}} = \frac{Z_{\text{max } i} - Z_i(Q_{\text{Нева}})}{Z_{\text{max Гор.ин-т}} - 11}$$

а перепад $Z_i(Q_{\text{Нева}}) - 11$.
График зависимости

$$K = \frac{\Delta Z_{\text{max } i}}{\Delta Z_{\text{max Гор.ин-т}}} = f[Z_i(Q_{\text{Нева}}) - 11] \quad (2.22)$$

представлен на рис. 2.10. График построен на основании всех

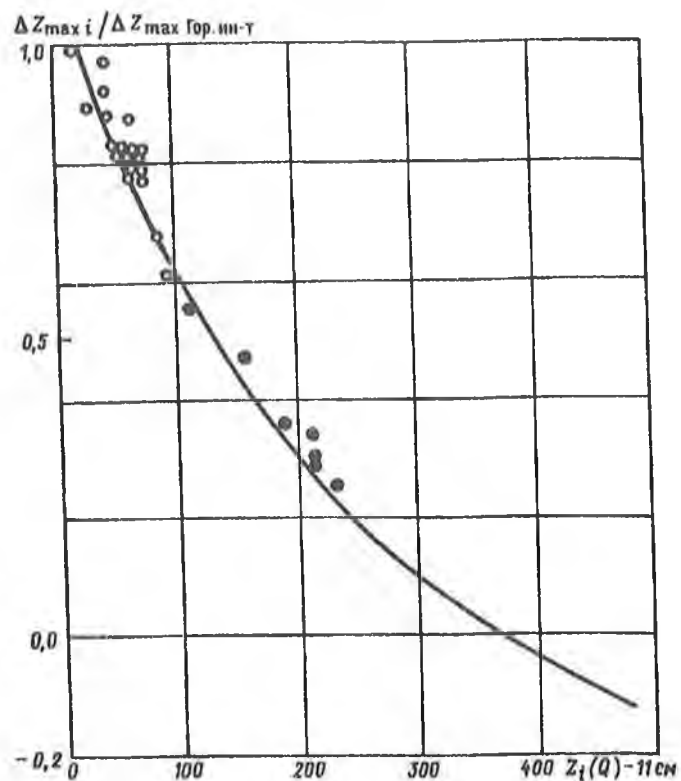


Рис. 2.10. Зависимости $K = f(Z_i(Q) - 11)$ для переноса наблюдаемого максимального нагонного уровня р. Невы в устье на другие пункты реки.

имеющихся параллельных наблюдений по самописцам уровней в пунктах Горный институт, Новосаратовка, Ивановское (1955—1975 гг.). Нижний участок зависимости ориентирован на точку, относящуюся к истоку реки, а именно: при среднем уровне Ладожского озера (484 см БС) спад уровня в истоке (за счет западного ветра, создающего здесь сгон) примерно равен 0,1 величины нагона в устье.

Пользуясь зависимостью (2.22) (рис. 2.10) нетрудно перенести на любой пункт р. Невы наблюдаемый максимальный нагонный уровень у Горного института

$$Z_{\max i} = K \Delta Z_{\max \text{Гор.ин-т}} + Z_i(Q_{\text{Нева}}). \quad (2.23)$$

Предварительно строится продольный профиль водной поверхности реки при расходе, предшествующем нагону (см. раздел 3.1).

Третий годовой максимум зазорного происхождения приурочен к моменту замерзания реки (обычно декабрь). Высокие уровни держатся 2—5 дней. Методика расчета максимальных зазорных уровней заключалась в следующем /34/. По каждому пункту с более или менее продолжительным периодом наблюдений строилась кривая обеспеченности. Затем вычерчивался продольный профиль водной поверхности реки из равнообеспеченных уровней Z_{\max} . С последнего и определились уровни Z_{\max} по пунктам, где не было наблюдений.

По аналогии с максимальным уровнем в каждом пункте р. Невы надо различать три годовых минимума:

- при наименьшем расходе воды в летне-осенний период;
- при самом большом сгоне воды (октябрь—ноябрь);
- при различного рода ледовых явлениях в зимний период, а также в периоды осеннего и весеннего ледохода.

Последний минимум разнороден по происхождению. В одних случаях он связан с резким уменьшением расхода воды (из-за стеснения льдом и шугой поперечного сечения на отмели перед истоком реки или вследствие распространения подпора от зазора льда до самого истока). В других случаях имеет место резкий спад уровня в нижнем бьефе зазорного скопления льда (из-за аккумуляции воды в верхнем бьефе зазора). Наконец, бывает так, что сильный сгон приходится на период осеннего ледохода.

Методика расчета минимальных годовых уровней воды во многом сходна с методикой расчета годовых максимумов и повторно здесь не излагается.

В табл. 2.19 помещена сводка максимальных и минимальных годовых уровней воды повторяемостью 1 раз в 100 лет для нескольких десятков пунктов р. Невы и Ладожского озера. С учетом этих уровней, как правило, осуществляется проектирование различных сооружений в Ленинграде и ближайших пригородах.

Как видно из табл. 2.19, на самом нижнем 20-километровом участке р. Невы от устья до Володарского моста наивысший из трех максимумов имеет нагонное происхождение, а на следующем 30-километровом участке от Володарского моста до Островков (20—50 км от устья) — зазорное происхождение. На участке же Островки — Ладожское озеро (50—74 км от устья) наступление самого высокого уровня связано с прохождением очень большого расхода воды. Иное положение с минимальными уровнями. Почти по всей реке мини-

Таблица 2.19

Максимальные и минимальные годовые уровни воды (см БС)
повторяемостью 1 раз в 100 лет

Водный объект	Пункт	Расстояние от устья р. Невы, км	Максимальные уровни				Минимальные уровни			
			при расходе воды	при нагоне воды	при зажоге льда	при расходе воды	при расходе воды	при сгоде воды	в зимний период	
Ладожское озеро	—	82,5	675	554	620	350	447	340		
Шлиссельбургская губа	Ладожская водокачка	76,8	670	552	613	299	444	185		
То же	Посечено	75,6	669	551	605	287	440	160		
"	Щерметьевка	73,9	660	549	600	266	431	125		
р. Нева	Петрокрепость	73,0	635	535	595	223	386	110		
То же	Угольный	70,3	620	525	585	185	368	85		
"	Черная река	69,1	611	524	580	180	358	80		
"	Красные сосны	61,0	575	502	555	175	336	60		
"	Пески	56,8	560	487	550	164	325	50		
"	Лобаново	55,0	555	482	545	160	314	45		

Продолжение табл. 2.19

Водный объект	Пункт	Расстояние от устья р. Невы, км	Максимальные уровни				Минимальные уровни			
			при расходе воды	при нагоде воды	при зажоге льда	при расходе воды	при расходе воды	при сгоде воды	в зимний период	
р. Нева	Павлово	52,7	547	475	530	153	304	35		
То же	Островки	50,2	525	470	527	148	280	30		
"	Отрадное	47,6	497	462	525	139	248	20		
"	выше пос. Пелла	46,2	430	452	523	108	197	15		
"	Ивановское	44,9	392	441	520	74	152	10		
"	Большие Пороги	42,7	362	436	510	65	126	-5		
"	Корчино	36,7	270	425	485	47	54	-30		
"	Понтоный	35,8	255	423	480	45	45	-35		
"	Усть-Ижора	34,0	237	417	470	42	31	-40		
"	Кривое Колено	29,2	195	404	445	23	-4	-60		
"	Новосаратовка	27,0	183	396	440	16	-23	-74		
"	з-д "Большевик"	23,0	145	381	425	10	-40	-80		
"	ниже з-да "Большевик"	22,2	135	378	415	7	-45	-83		
"	Ф-ка Ногина	17,0	89	370	315	5	-77	-90		
"	Охтинский мост	12,5	60	362	195	3	-103	-105		
"	Литейный мост	7,8	44	355	35	2	-119	-118		
"	Горный институт	2,8	35	345	10	2	-132	-124		
Невская губа	Гутуевский ковш	-0,1	25	325	5	0	-138	-126		
То же	Кронштадт	-27	9	293	0	-4	-164	-129		

мум 99%-ной обеспеченности отмечается при наличии тех или иных ледовых явлений.

С возведением защитных сооружений по линии Горская — Кронштадт — Ломоносов будет полностью предотвращена опасность наводнений в Ленинграде и ближайших населенных пунктах (Кронштадте, Ломоносове, Петродворце, Стрельне и др.). Максимальные нагонные уровни обеспеченностью $P \leq 20$ % сильно понизятся как в Невской губе, так и по всей р. Неве. Что же касается максимума р. Невы, связанного с прохождением наибольшего в году расхода воды, а также максимума зажорного происхождения, то они никак не изменятся.

Иная ситуация сложится при реализации проекта переброски стока из неевского бассейна на волжский склон в размере $7,1 \text{ км}^3/\text{год}$. Благодаря наличию неевского регулирующего гидроузла в истоке реки можно будет полностью устранить опасность зажорных наводнений. Для этого достаточно в период замерзания реки (после того, как кромка пройдет Охтинский мост) сократить расход в Неве до $1400\text{--}2000 \text{ м}^3/\text{с}$ (см. раздел 5).

Регулирование стока воды из Ладожского озера приведет также к заметному уменьшению максимального расхода р. Невы малой обеспеченности ($P < 5$ %) — примерно на 15—20 % и соответствующему понижению максимальных уровней по всей длине реки.

2.6. Ход уровней воды при нагонах и сгонах

При решении ряда вопросов проектирования комплекса защитных сооружений и разработке правил его эксплуатации (фильтрация грунтовых вод под дамбой, устойчивость дамбы на сдвиг и т. д.) необходимо располагать типовыми (расчетными) графиками хода уровня воды Невской губы у г. Кронштадта во время нагонных наводнений. Подобные графики нужны и для р. Невы у Горного института при оценке ущербов от наводнений, проектировании канализационных выпусков и пр.

Напомним, что термин "нагон" применен здесь для сокращенного наименования любого более или менее значительного подъема воды в устье р. Невы и в Невской губе независимо от причины его возникновения. То же самое относится к термину "сгон", обозначающий спад воды.

2.6.1. Ход уровней воды при нагонах и сгонах в естественных условиях

Ход уровня воды в устье р. Невы и в Невской губе при нагонных наводнениях очень разнообразный. Один нагон растянутый и низкий, другой — короткий и высокий. Большею частью вслед за пиком уровня происходит непрерывный спад, но иногда спад нарушается новым подъемом. Несмотря на это можно указать некоторые общие черты, свойственные колебаниям уровня при больших нагонах воды. В среднем продолжительность спада в 1,1—1,3 раза превышает продолжительность подъема. Чем больше нагон, тем, как правило, дольше держится высокий уровень. Очень большой нагон всегда предоставлен одномодальным графиком хода уровня; небольшие нагоны иногда имеют многопиковые очертания хода уровня. Заметим еще, что максимальная часовая интенсивность повышения уровня воды р. Невы у Горного института при больших нагонах (свыше 200 см над ординаром) составляет в среднем 35—50 см/ч, достигая иногда 80—110 см/ч, а для Невской губы у Кронштадта соответственно 30—40 и 70—80 см/ч.

Рассмотрим характеристику хода уровня воды при нагонах отдельно у Кронштадта и у Горного института. В первом случае были использованы все имеющиеся систематические наблюдения по самописцу, а также многосрочные наблюдения за все те случаи (1898—1979 гг.); когда в устье р. Невы у Горного института имели место наводнения с максимальным уровнем $Z_{\max} > 160$ см БС. К упомянутым данным добавлены еще три случая выдающихся наводнений 1777, 1824 и 1879 гг. Как известно, наводнение 1777 и 1824 гг. относятся к числу пяти самых катастрофических наводнений, наблюдавшихся за всю историю Петербурга—Ленинграда. Наводнение же 1879 г. характеризуется самой большой (с 1836 г.) продолжительностью стояния высокого уровня. Чтобы восстановить ход уровня за наводнением 1777 и 1824 гг., были изучены многочисленные описания очевидцев, сопоставлены границы затоплений и отметки местности в прошлом и в настоящее время и пр. Ход уровня воды за четыре самых больших наводнения представлен на рис. 2.11.

Всего за 85-летний период (1777, 1824, 1879, 1898—1979 гг.) отмечалось 100 случаев наводнений указанных размеров. Чтобы сравнить число лет и число наводнений, исключены из рассмотрения 15 случаев с небольшими значениями Z_{\max} и ненадежными данными. Примерно за 1/5 часть всех случаев ежечасные сведения об уровне у Кронштадта либо вовсе отсутствуют, либо имеются срочные наблюдения

9012

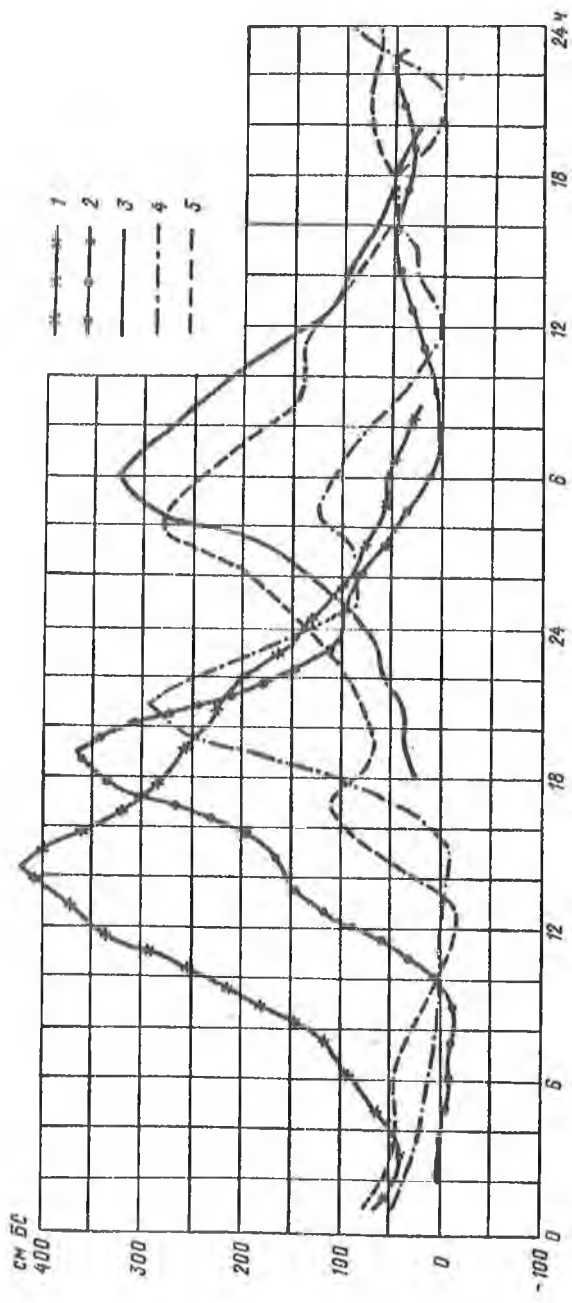


Рис. 2.11. Ход уровня воды р. Невы у Горного института во время пяти самых больших наводнений в Петербурге-Ленинграде.
1 — 19-20/XI 1824 г.; 2 — 23-24/IX 1924 г.; 3 — 20-21/IX 1777 г.; 4 — 15-16/X 1955 г.; 5 — 28-29/IX 1975 г.

(через 4–6 ч). При этом ход уровня восстановлен по связям соответственных уровней Кронштадт — Горный институт (связи не приводятся), которые построены отдельно для фаз подъема и спада со смещением во времени на 1 ч.

За каждый случай наводнения по графикам хода уровня у г. Кронштадта определялась продолжительность $T_{Z > \bar{Z}}$ непрерывного стояния уровня выше некоторого срезочного уровня \bar{Z} (рис. 2.12), а именно:

$$T_{Z > 75}, T_{Z > 100}, \dots, T_{Z > 325}, T_{Z > 350}.$$

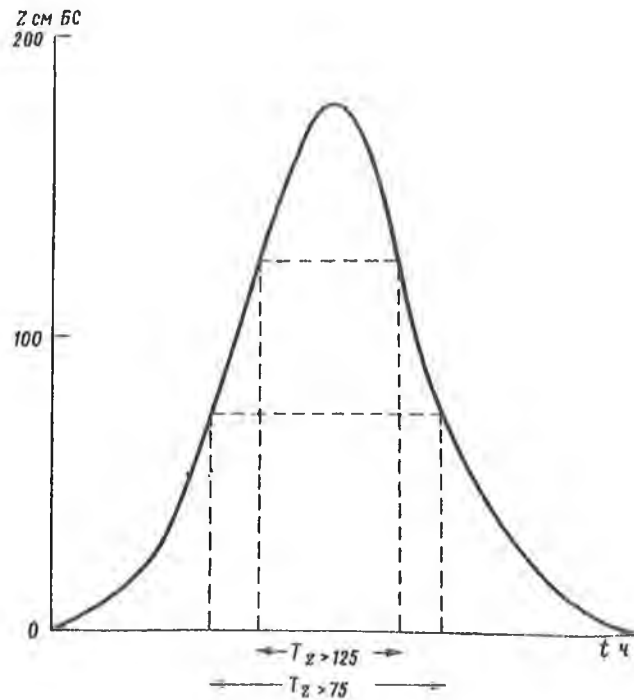


Рис. 2.12. Схема определения продолжительности стояния высокого уровня воды $T_{Z > 75}$ и $T_{Z > 125}$.

Иногда в период повышения уровня отмечались один-два перехода через $Z = 75$ см БС, изредка — через $\bar{Z} = 100$ см БС. При этом перерыв менее четырех часов включался в общую продолжительность.

Несмотря на весьма разнообразное очертание графиков хода уровня воды при наводнениях правильно будет следующее утверждение. Все зафиксированные наводнения образуют собой однородную статистическую совокупность. Основные характеристики наводнения — максимальный уровень Z_{\max} и продолжительность стояния высокого уровня $T_Z > \bar{Z}$ — это две варьирующие величины, для описания изменчивости которых применимы двумерные функции распределения вероятностей. Между величинами Z_{\max} и $T_Z > \bar{Z}$ существует некоторая стохастическая зависимость. Все отмеченное дает основание записать общеизвестное положение теории вероятностей

$$P(Z_{\max}, T_Z > \bar{Z}) = P(Z_{\max})P(T_Z > \bar{Z}/Z_{\max}). \quad (2.24)$$

В выражении (2.24):

$P(Z_{\max})$ — безусловная кривая вероятности превышения (безусловная кривая обеспеченности) максимального годового уровня воды Z_{\max} ;

$P(T_Z > \bar{Z}/Z_{\max})$ — условная кривая вероятности превышения (условная кривая обеспеченности) продолжительности стояния высокого уровня воды $T_Z > \bar{Z}$ (где \bar{Z} — некоторый срезочный уровень) при заданном значении максимума Z_{\max} ;

$P(Z_{\max}, T_Z > \bar{Z})$ — двумерная функция вероятности превышения (двумерная функция обеспеченности) максимального уровня Z_{\max} и продолжительности $T_Z > \bar{Z}$.

Подчеркнем, что условная кривая обеспеченности $P(T_Z > \bar{Z}/Z_{\max})$ и двумерная функция обеспеченности $P(Z_{\max}, T_Z > \bar{Z})$ будут неодинаковыми для различного срезочного уровня \bar{Z} , над которым определяется продолжительность $T_Z > \bar{Z}$.

Безусловная кривая обеспеченности $P(Z_{\max})$ уже имеется (рис. 2.3). Чтобы получить условную кривую обеспеченности $P(T_Z > \bar{Z}/Z_{\max})$, необходимо вначале выяснить характер связи между $T_Z > \bar{Z}$ и Z_{\max} . Для этой цели первоначально были построены графики связи $T_Z > 75 = f(Z_{\max})$ (т. е. для срезочного уровня $Z = 75$ см БС); $T_Z > 100 = f(Z_{\max})$ (для срезочного уровня $Z = 100$ см БС) и т. д. Образцы

(через 4–6 ч). При этом ход уровня восстановлен по связям соответственных уровней Кронштадт — Горный институт (связи не приводятся), которые построены отдельно для фаз подъема и спада со смещением во времени на 1 ч.

За каждый случай наводнения по графикам хода уровня у г. Кронштадта определялась продолжительность $T_{Z > \bar{Z}}$ непрерывного стояния уровня выше некоторого срезочного уровня \bar{Z} (рис. 2.12), а именно:

$$T_{Z > 75}, T_{Z > 100}, \dots, T_{Z > 325}, T_{Z > 350}.$$

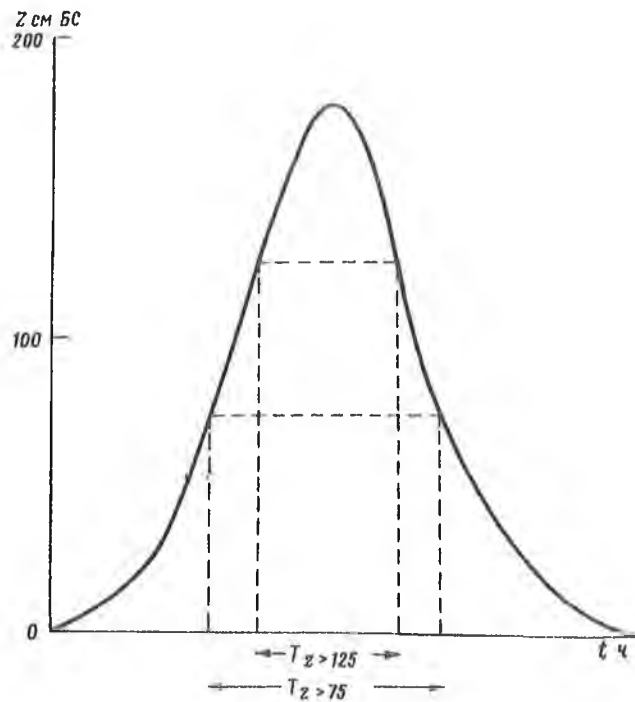


Рис. 2.12. Схема определения продолжительности стояния высокого уровня воды $T_{Z > 75}$ и $T_{Z > 125}$.

Иногда в период повышения уровня отмечались один-два перехода через $Z = 75$ см БС, изредка — через $\tilde{Z} = 100$ см БС. При этом перерыв менее четырех часов включался в общую продолжительность.

Несмотря на весьма разнообразное очертание графиков хода уровня воды при наводнениях правильно будет следующее утверждение. Все зафиксированные наводнения образуют собой однородную статистическую совокупность. Основные характеристики наводнения — максимальный уровень Z_{\max} и продолжительность стояния высокого уровня $T_Z > \tilde{Z}$ — это две варьирующие величины, для описания изменчивости которых применимы двумерные функции распределения вероятностей. Между величинами Z_{\max} и $T_Z > \tilde{Z}$ существует некоторая стохастическая зависимость. Все отмеченное дает основание записать общеизвестное положение теории вероятностей

$$P(Z_{\max}, T_Z > \tilde{Z}) = P(Z_{\max})P(T_Z > \tilde{Z}/Z_{\max}). \quad (2.24)$$

В выражении (2.24):

$P(Z_{\max})$ — безусловная кривая вероятности превышения (безусловная кривая обеспеченности) максимального годового уровня воды Z_{\max} ;

$P(T_Z > \tilde{Z}/Z_{\max})$ — условная кривая вероятности превышения (условная кривая обеспеченности) продолжительности стояния высокого уровня воды $T_Z > \tilde{Z}$ (где \tilde{Z} — некоторый срезочный уровень) при заданном значении максимума Z_{\max} ;

$P(Z_{\max}, T_Z > \tilde{Z})$ — двумерная функция вероятности превышения (двухмерная функция обеспеченности) максимального уровня Z_{\max} и продолжительности $T_Z > \tilde{Z}$.

Подчеркнем, что условная кривая обеспеченности $P(T_Z > \tilde{Z}/Z_{\max})$ и двумерная функция обеспеченности $P(Z_{\max}, T_Z > \tilde{Z})$ будут неодинаковыми для различного срезочного уровня \tilde{Z} , над которым определяется продолжительность $T_Z > \tilde{Z}$.

Безусловная кривая обеспеченности $P(Z_{\max})$ уже имеется (рис. 2.3). Чтобы получить условную кривую обеспеченности $P(T_Z > \tilde{Z}/Z_{\max})$, необходимо вначале выяснить характер связи между $T_Z > \tilde{Z}$ и Z_{\max} . Для этой цели первоначально были построены графики связи $T_Z > 75 = f(Z_{\max})$ (т. е. для срезочного уровня $Z = 75$ см БС); $T_Z > 100 = f(Z_{\max})$ (для срезочного уровня $Z = 100$ см БС) и т. д. Образцы

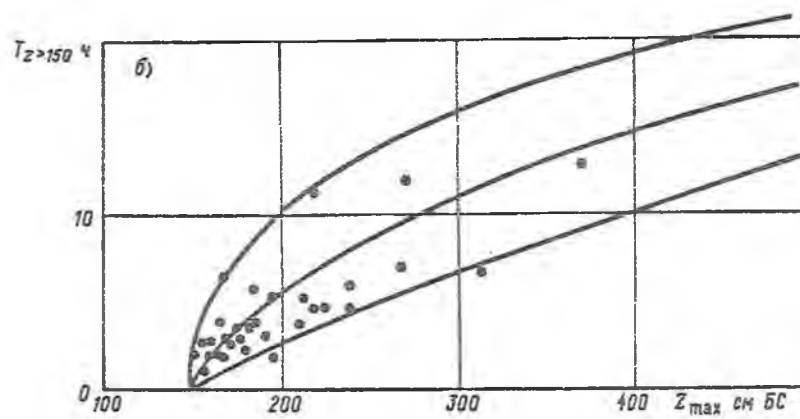
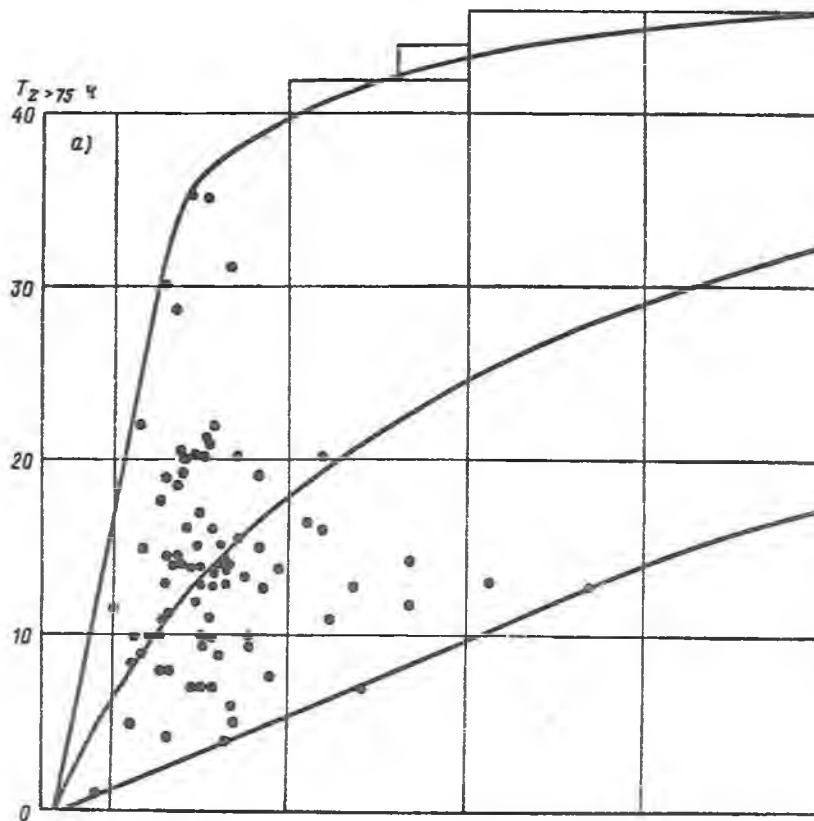


Рис. 2.13. Невская губа — г. Кронштадт. Графики связей $T_{Z > \tilde{Z}} = f(Z_{\max})$.

Здесь $T_{Z > \tilde{Z}}$ — продолжительность стояния высокого уровня воды $Z > \tilde{Z}$ при нагонных наводнениях, Z_{\max} — максимальный уровень нагонного наводнения: а — $\tilde{Z} = 75$ см БС, б — $\tilde{Z} = 150$ см БС.

таких графиков связи представлены на рис. 2.13. Поскольку количество больших наводнений, а тем более катастрофических, невелико, то число точек, по которым построена связь вида $T_Z > \bar{Z} = f(Z_{\max})$, быстро падает с повышением срезочного уровня \bar{Z} . Так, если связь $T_Z > 100 = f(Z_{\max})$ выявлена по 85 случаям, то связь $T_Z > 200 = f(Z_{\max})$ — всего лишь по 12 случаям. Ограниченный объем информации не позволяет с достаточной надежностью обосновать как сами связи для продолжительности $T_Z > 200 \dots T_Z > 350$, так и верхние участки остальных связей для $T_Z > 75 \dots T_Z > 175$. В этих обстоятельствах решающую роль при построении условной кривой обеспеченности $P(T_Z > \bar{Z}/Z_{\max})$ имеет гидрологический анализ. Лишь на его основе можно в какой-то мере восполнить острую нехватку натурных данных.

Обратимся к связям вида $T_Z > \bar{Z} = f(Z_{\max})$ (рис. 2.13). При их анализе можно прийти к важным выводам.

Средняя продолжительность стояния высокого уровня $T_Z > \bar{Z}$ в период наводнения в целом увеличивается по мере возрастания самого максимального уровня Z_{\max} . Иначе обстоит дело с многолетними колебаниями продолжительности $T_Z > \bar{Z}$. При срезочном уровне Z , лишь немногим отличающемся от максимального уровня Z_{\max} , продолжительность $T_Z > \bar{Z}$ невелика. Так, например, в случае наводнения с максимальным уровнем $Z_{\max} = 160$ см БС продолжительность $T_Z > 150$ колеблется от 0,5 до 4,5 ч. При дальнейшем повышении срезочного уровня Z — если только $Z \ll Z_{\max}$ — диапазон колебания $T_Z > \bar{Z}$ резко возрастет. Затем многолетняя амплитуда колебания продолжительности $T_Z > \bar{Z}$ либо несколько падает (для $T_Z > 75$, $T_Z > 100$ и $T_Z > 125$), либо остается почти неизменной (для $T_Z > 150$, $T_Z > 175$, ... , $T_Z > 350$). Подобное соотношение между многолетней амплитудой колебания продолжительности $T_Z > \bar{Z}$ и заданным значением максимального уровня Z_{\max} обуславливается самой природой наводнения. Небольшое наводнение может иметь как длинноволновое происхождение (следовательно, быть кратковременным), так и чисто нагонное (и поэтому быть продолжительным). Очень большое наводнение в основном обязано возникновению длинной волны, в связи с чем его продолжительность невелика.

С учетом отмеченного, выполнены следующие действия по объединению в одну статистическую совокупность имеющихся данных уровенных наблюдений при наводнениях.

Первое действие заключалось в том, что средние линии графиков связи $T_Z > \bar{Z} = f(Z_{\max})$, т. е. кривые $T_Z > \bar{Z}(Z_{\max})$ были перенесены на сборный график и тщательно взаимно

увязаны. Аналогичным образом поступили с верхними и нижними огибающими кривыми, а также с кривыми $A_{T_{Z > \bar{z}}}(Z_{\max})$, где $A_{T_{Z > \bar{z}}}$ есть многолетняя амплитуда колебания величины $T_{Z > \bar{z}}$. Полученные сводные графики функций $T_{Z > \bar{z}}(Z_{\max})$ и $A_{T_{Z > \bar{z}}}(Z_{\max})$ представлены на рис. 2.14.

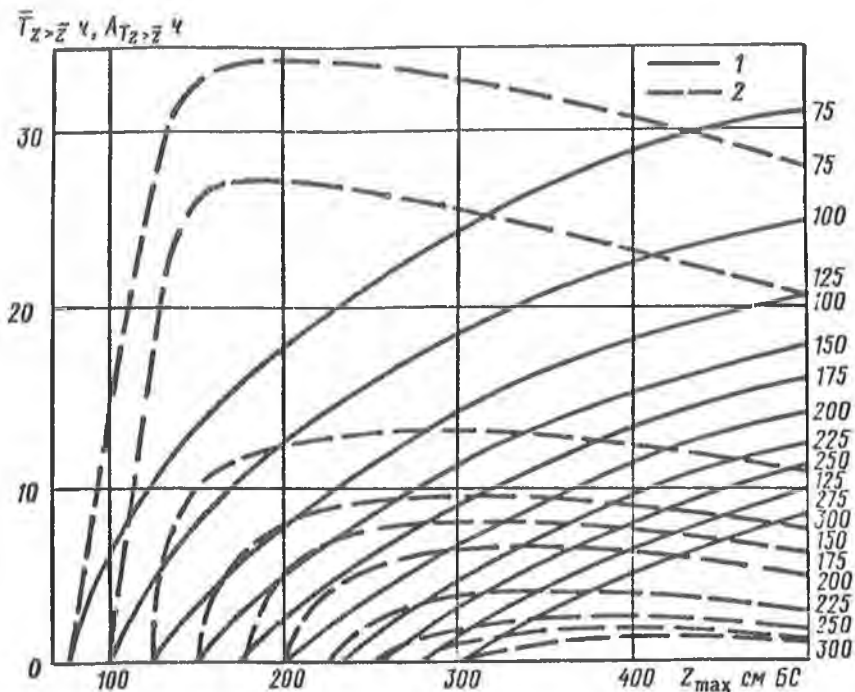


Рис. 2.14. Невская губа — г. Кронштадт. Зависимости $T_{Z > \bar{z}}(Z_{\max})$ (1) и $A_{T_{Z > \bar{z}}}(Z_{\max})$ (2) при нагонных наводнениях.

Здесь $T_{Z > \bar{z}}$ — средняя многолетняя продолжительность стояния высокого уровня воды $Z > \bar{z}$ при заданном максимальном уровне Z_{\max} ; $A_{T_{Z > \bar{z}}}$ — многолетняя амплитуда колебания величины $T_{Z > \bar{z}}$ при заданном уровне Z_{\max} . Цифры у линий — срезочный уровень \bar{z} в см БС.

Следующее действие состояло в том, что отклонение точек на каком-либо графике связи $T_{Z > \bar{z}} = f(Z_{\max})$ от средней кривой $\bar{T}_{Z > \bar{z}}(Z_{\max})$ выражалось в относительных величинах.

нах — в долях от соответствующей многолетней амплитуды $A_{T_Z > \tilde{Z}}$ при данном Z_{\max} , т. е.

$$\frac{T_{Z > \tilde{Z}} - \bar{T}_{Z > \tilde{Z}}}{A_{T_Z > \tilde{Z}}} = \frac{\Delta T_{Z > \tilde{Z}}}{A_{T_Z > \tilde{Z}}} = k_{Z > \tilde{Z}} \quad (2.25)$$

Наконец, строились кривые обеспеченности относительных уклонений $P(k_{Z > \tilde{Z}})$. Эмпирические кривые обеспеченности получены для каждой связи $T_{Z > \tilde{Z}} = f(Z_{\max})$ в отдельности и совмещены на общем графике. Кривые $P(k_{Z > \tilde{Z}})$ предполагаются неширокой полосой, что позволяет провести одну среднюю кривую; ее координаты таковы:

P%.....1	5	20	50	70	95	99
$k_{Z > \tilde{Z}} \dots$	0,77	0,53	0,27	0,04	-0,08	-0,33

Взаимоувязанное положение обобщенных кривых связи средней продолжительности $T(Z_{\max})$ и многолетней амплитуды продолжительности $A_{T_Z > \tilde{Z}}(Z_{\max})$ (рис.2.14), близкое совпадение кривых обеспеченности относительных величин $P(k_{Z > \tilde{Z}})$ для различных связей $T_{Z > \tilde{Z}} = f(Z_{\max})$ — все это служит доказательством правильности объединения всех имеющихся данных уровневых наблюдений в однородную статистическую совокупность с целью нахождения условной кривой обеспеченности $P(T_{Z > \tilde{Z}}/Z_{\max})$, фигурирующей в выражении (2.24). Условная же кривая обеспеченности $P(T_{Z > \tilde{Z}}/Z_{\max})$ при фиксированном значении максимального уровня Z_{\max} и каком-либо срезочном уровне \tilde{Z} , для которого находится продолжительность стояния $T_{Z > \tilde{Z}}$, запишется так:

$$T_{Z > \tilde{Z}}/Z_{\max}(P) = T_{Z > \tilde{Z}}(Z_{\max}) + k_{Z > \tilde{Z}}(P) A_{T_Z > \tilde{Z}}(Z_{\max}), \quad (2.26)$$

где и средняя продолжительность $T_{Z > \tilde{Z}}/Z_{\max}$, и многолетняя амплитуда продолжительности $A_{T_Z > \tilde{Z}}(Z_{\max})$ есть функция от уровня и определяется по рис. 2.14.

Для примера получим условные кривые обеспеченности

$P(T_Z > \bar{Z}/200)$ при максимальном уровне $Z_{\max} = 200$ см БС, который в многолетнем ряду имеет повторяемость 1 раз в 20 лет, и срезочном уровне $\bar{Z} = 75; 100; 125$ и 175 см БС. По рис. 2.14 имеем:

\bar{Z} , см БС.	75	100	125	150	175
$T_Z > \bar{Z}$ ч.	17,8	12,7	8,0	5,2	2,5
$A_{T_Z > \bar{Z}}$ ч	34,0	27,0	12,4	8,0	5,0

Результаты подсчетов по выражению (2,26) с учетом приведенных данных о средней продолжительности $T_Z > \bar{Z}$, многолетней амплитуде $A_{T_Z > \bar{Z}}$ и ординат кривой относительных отклонений $P(kZ > \bar{Z})$ для максимального уровня $Z_{\max} = 200$ и 293 см БС изображены на рис. 2.15. Максимальные уровни в многолетнем ряду имеют повторяемость соответственно 1 раз в 20 и 100 лет ($P = 5\%$ и $P = 1\%$).

Условная кривая обеспеченности $P(T_Z > \bar{Z}/Z_{\max})$ представляет некоторый самостоятельный интерес. И, все же, ее построение — это промежуточный этап. В конечном счете, для нужд проектирования необходимо дать ответ на следующие вопросы:

Первый вопрос. Какова вероятность P того, что две основные количественные характеристики наводнения — максимальный уровень Z_{\max} и продолжительность стояния высокого уровня $T_Z > \bar{Z}$ — одновременно превысят заданные значения P . Иными словами, какова двухмерная обеспеченность заданного сочетания уровня Z_{\max} и продолжительности $T_Z > \bar{Z}$, т. е. $P(Z_{\max}, T_Z > \bar{Z})$.

Выполнение по формулам (2.22) и (2.24) результаты определения координат двухмерной функции обеспеченности $P(Z_{\max}, T_Z > \bar{Z})$ для четырех значений срезочного уровня \bar{Z} , равных 100, 150, 200 и 250 см БС, помещены в табл. 2.20. Для удобства сравнения при любом срезочном уровне Z определения сделаны для семи одинаковых значений обеспеченности сочетания характеристик $P(Z_{\max}, T_Z > \bar{Z})$, равных 50; 10; 5; 2; 1; 0,1 и 0,01 %.

Второй вопрос. Каково очертание типового графика колебания уровня воды в период нагонного наводнения при заданном значении двухмерной обеспеченности?

Повторно укажем, что при одной и той же величине двухмерной обеспеченности могут иметь место различные значения основных характеристик наводнения Z_{\max} и $T_Z > \bar{Z}$. Если та или иная конкретная комбинация Z_{\max} и $T_Z > \bar{Z}$ уже определена (см. табл. 2.19), то ход уровня воды во времени $Z(t)$ в диапазоне $\bar{Z} < Z < Z_{\max}$ нетрудно прочертить

Таблица 2.20

Координаты двумерной функции обеспеченности $P(Z_{\max}, \Gamma_{Z>\tilde{Z}})$
 Невской губы у г. Кронштадта в естественных условиях

Обеспеченность сочетания $P(Z_{\max}, \Gamma_{Z>\tilde{Z}}), \%$	Характеристики наводнений и их обеспеченности			
	Обеспеченность, %		Характеристика	
	$P(Z_{\max})$	$P(\Gamma_{Z>\tilde{Z}}/Z_{\max})$	Z_{\max} см БС	$\Gamma_{Z>\tilde{Z}}$ ч
1	2	3	4	5
$\tilde{Z} = 100$ см БС				
50	53	95	138	1,0
10	10	95	184	2,3
5	5	95	200	3,9
2	2	95	240	6,6
1	1	95	293	10,0
0,1	0,1	95	410	15,7
0,01	0,01	95	465	17,4
$\tilde{Z} = 150$ см				
50	53	95	138	—
10	10	95	184	1,5
5	5	95	200	2,4
2	2	95	240	5,0
1	1	95	293	7,9
0,1	0,1	95	410	13,2
0,01	0,01	95	465	14,8
$\tilde{Z} = 200$ см БС				
50	53	95	138	—
10	10	95	184	—
5	5	95	200	—
2	2	95	240	1,3
1	1	95	293	4,1
0,1	0,1	95	410	9,9
0,01	0,01	95	465	11,7
$\tilde{Z} = 250$ см БС				
50	53	95	138	—
10	10	95	184	—
5	5	95	200	—
2	2	95	240	—
1	1	95	293	2,0
0,1	0,1	95	410	7,8
0,01	0,01	95	465	10,0

Обеспеченность сочетания $P(Z_{\max}, T_{Z>\tilde{Z}}), \%$	Характеристики наводнений и их обеспеченности							
	Обеспеченность, %		Характеристика		Обеспеченность, %		Характеристика	
	$P(Z_{\max})$	$P(T_{Z>\tilde{Z}}/Z_{\max})$	Z_{\max} см БС	$T_{Z>\tilde{Z}}$ ч	$P(Z_{\max})$	$P(T_{Z>\tilde{Z}}/Z_{\max})$	Z_{\max} см БС	$T_{Z>\tilde{Z}}$ ч
	6	7	8	9	10	11	12	13

102

 $\tilde{Z} = 100$ см БС

50	67	75	125	2,6	91	55	100	—
10	20	50	164	10,1	91	11	100	—
5	10	50	184	12,3	62	8	130	13,6
2	4	50	208	14,1	40	5	145	20,6
1	2	50	240	16,2	20	5	164	23,5
0,1	0,2	50	385	23,2	2	5	240	29,4
0,01	0,02	50	454	25,1	0,2	5	385	34,8

 $\tilde{Z} = 150$ см БС

50	67	75	125	—	91	55	100	—
10	20	50	164	2,0	91	11	100	—
5	10	50	184	3,9	62	8	130	—

2	4	50	208	6,0	40	5	145	—
1	2	50	240	8,3	20	5	164	4,6
0,1	0,2	50	385	15,5	2	5	240	12,8
0,01	0,02	50	454	17,4	0,2	5	385	19,8

 $\tilde{Z} = 200$ см БС

50	67	75	125	—	91	55	100	—
10	20	50	164	—	91	11	100	—
5	10	50	184	—	62	8	130	—
2	4	50	208	0,9	40	5	145	—
1	2	50	240	3,3	20	5	164	—
0,1	0,2	50	385	11,4	2	5	240	6,0
0,01	0,02	50	454	13,4	0,2	5	385	14,4

103

 $\tilde{Z} = 250$ см БС

50	67	75	125	—	91	55	100	—
10	20	50	164	—	91	11	100	—
5	10	50	184	—	62	8	130	—
2	4	50	208	—	40	5	145	—
1	2	50	240	—	20	5	164	—
0,1	0,2	50	385	7,7	2	5	240	—
0,01	0,02	50	454	10,4	0,2	5	385	8,9

Примечание. Z_{\max} — максимальный годовой уровень воды,
 $T_{Z>\tilde{Z}}$ — продолжительность стояния высокого уровня,
 \tilde{Z} — срезочный уровень.

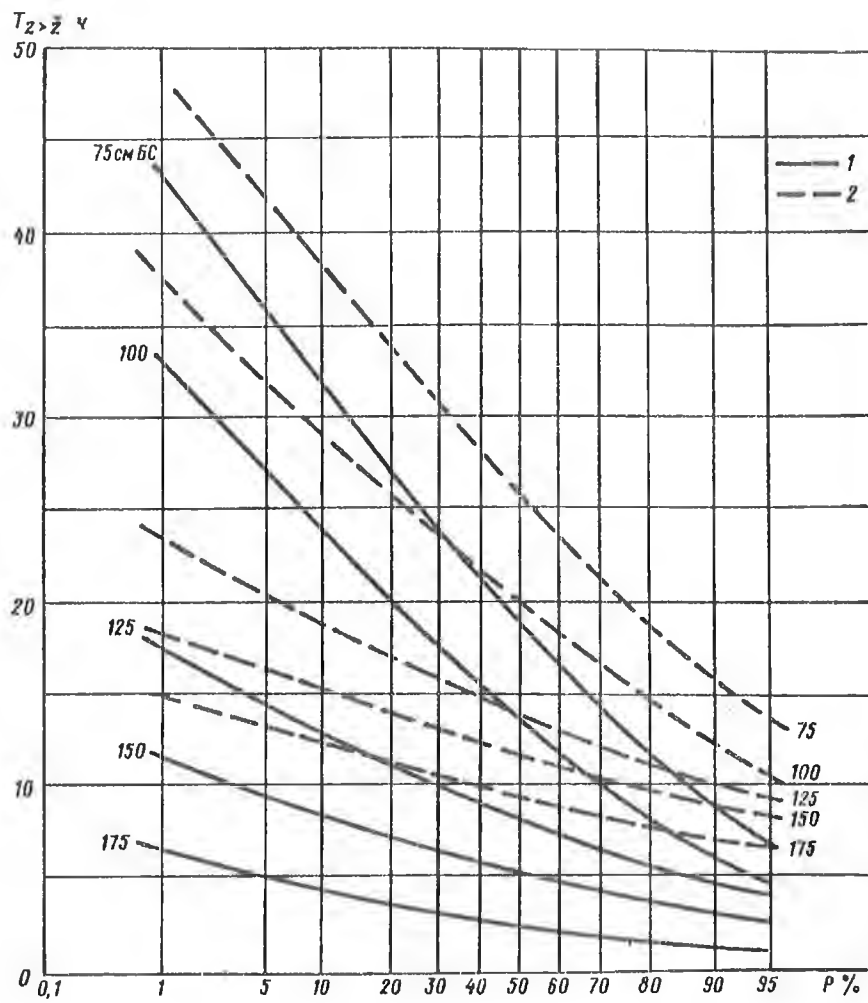


Рис. 2.15. Невская губа — г. Кронштадт. Условные кривые обеспеченности $P(T_Z > \bar{Z}/Z_{max})$:

1 — при $Z_{max} = 200$ см БС; 2 — при $Z_{max} = 293$ см БС. Цифры у линий — срезочный уровень \bar{Z} в см БС.

на глаз с учетом того, что продолжительность подъема и спада уровня в среднем равна соответственно 0,45 и 0,55 от общей продолжительности нагона.

Наиболее важный расчетный случай относится к сочетанию максимального уровня Z_{\max} с продолжительностью стояния высокого уровня $T_{Z_{\max}} > 100$. Именно при наступлении на подъеме уровня $Z = \bar{Z} = 100$ см БС у Кронштадта (см. раздел 2.9) надлежит закрывать отверстия в защитной дамбе. Для этого частного случая по описанной методике выполнено построение типовых графиков хода уровня $Z(t)$ (рис. 2.16). Сделано оно для ряда значений двухмерной обеспеченности $P(Z_{\max}, T_{Z_{\max}} > 100)$, но на рис. 2.16 представлены лишь для $P(Z_{\max}, T_{Z_{\max}} > 100) = 1$ и 0,1 %. В нижней части графиков в диапазоне $0 < Z < 100$ см БС ход уровня вычерчен исходя из продолжительности всего нагона 35–45 ч. Именно такая продолжительность свойственна большинству значительных наводнений, имеющих в той или иной мере длинноволновое происхождение. Впрочем, следует иметь в виду, что при небольших нагонах (100–130 см над ординаром) иногда отмечается весьма продолжительное стояние повышенного уровня (до 3–5 сут и более).

Представленные на рис. 2.16 графики хода уровня воды следует понимать так. Пусть двухмерная обеспеченность $P(Z_{\max}, T_{Z_{\max}} > 100) = 1$ %. Тогда в одно столетие может случиться непродолжительное, но высокое наводнение с параметрами: $T_{Z_{\max}} > 100 \geq 10$ ч и $Z_{\max} \geq 293$ см БС. В другое столетие произойдет несколько меньшее наводнение ($Z_{\max} \geq 240$ см БС), но с обычной продолжительностью ($T_{Z_{\max}} > 100 = 16,2$ ч). Наконец, в третье столетие случится относительно невысокое ($Z_{\max} \geq 165$ см БС), но весьма продолжительное наводнение ($T_{Z_{\max}} > 100 \geq 23,3$ ч) (см. табл. 2.20).

Рассмотрим теперь вопрос о ходе уровня воды при нагонах у Горного института.

Особенности хода уровня воды р. Невы у Горного института, так же, как и хода уровня Невской губы у Кронштадта, описываются посредством двухмерной функции вероятностей превышения. Добавим, что поставленный вопрос для Горного института не нуждается в детальной проработке. Поэтому ниже ограничимся кратким пояснением.

С целью установления двухмерной функции распределения использованы ежечасные сведения об уровне воды за все случаи наводнений с максимальным уровнем $Z_{\max} > 160$ см БС, наблюдавшиеся в период с 1898 по 1979 г. К ним присоединены еще три случая наводнения 1777, 1824 и 1879 гг. Продолжительность ряда 85 лет.

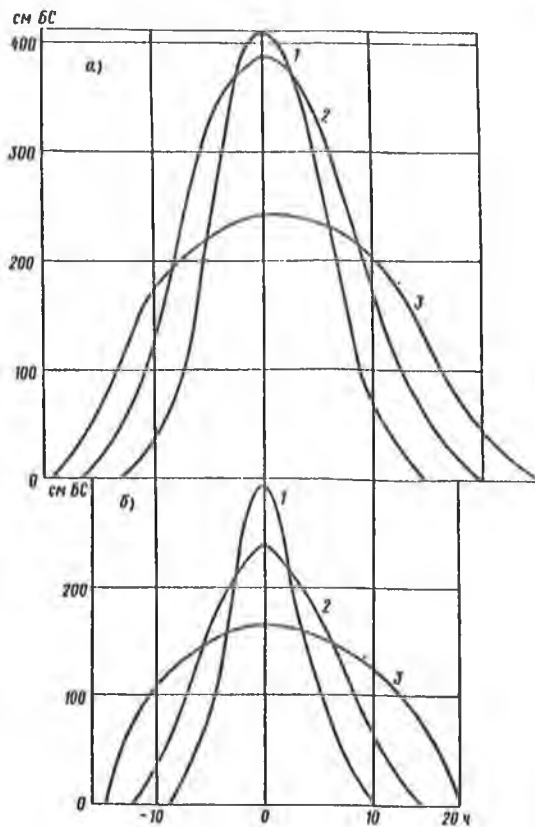


Рис. 2.16. Невская губа — г. Кронштадт. Типовые графики хода уровня воды в период нагонного наводнения при различных сочетаниях максимального годового уровня воды Z_{\max} и продолжительности стояния высокого уровня $T_Z > 100$.

а) $P(Z_{\max}, T_Z > 100) = 0,1\%$: 1 — $1 - P_{Z_{\max}} = 0,1\%$, $P(T_Z > 100 / Z_{\max}) = 95\%$; 2 — то же соответственно при 0,2 и 50%; 3 — при 2 и 5%.

б) $P(Z_{\max}, T_Z > 100) = 1\%$: 1 — $1 - P_{Z_{\max}} = 1\%$, $P(T_Z > 100 / Z_{\max}) = 95\%$; 2 — то же соответственно при 2 и 50%; 3 — при 20 и 5%.

Координаты двухмерной функции обеспеченности $P(Z_{\max}, T_Z > \bar{Z})$ при значениях срезочного уровня \bar{Z} , равных 100, 150, 200 и 250 см БС, помещены в табл. 2.21.

Типовые графики хода уровня воды $Z(t)$ для двух значений двухмерной обеспеченности $P(Z_{\max}, T_Z > \bar{Z})$, равных 1 и 0,1 %, и наиболее важного частного случая срезочного уровня $\bar{Z} = 100$ см БС представлены на рис. 2.17. В нижней их части, в интервале $0 < Z < 100$ см БС, ход уровня прочерчен из предположения, что общая продолжительность нагона составляет обычно 30–50 ч.

В заключение укажем, что с возведением защитной дамбы несколько повысятся максимальные нагонные уровни воды перед дамбой в верхней части Финского залива. Соответственно возрастет продолжительность стояния высокого уровня. Однако соотношение между максимальным уровнем Z_{\max} и продолжительностью $T_Z > \bar{Z}$ останется таким же, как в естественных условиях. Это подтверждается материалами расчетов по гидродинамическим моделям ЛОГОИН и ИГ СОАН.

С учетом отмеченного по описанной выше методике нетрудно выполнить построение условных кривых обеспеченности $P(T_Z > \bar{Z}/Z_{\max})$ и хода уровней в проектных условиях (если в этом будет потребность).

Ход уровня воды при сгонах, равно как и при нагонах, чрезвычайно разнообразный. Тем не менее выявляются некоторые общие закономерности. Падение уровня при сgone обычно происходит медленнее, чем его восстановление. Продолжительность периода спада в среднем равна 0,60, а периода подъема 0,80 от общей продолжительности сгона. Очень большие сгоны сравнительно кратковременные (1,5–2,0 сут). Небольшие же сгоны могут быть и кратковременными, и весьма длительными. Так, в 1959 г. у Кронштадта уровень воды ниже –50 см БС держался 11 сут подряд (с 3 по 13/XII). В устье р. Невы низкое стояние уровня воды отчасти обусловлено также малой водностью реки. Например, в маловодную суровую зиму 1941–42 г. у Горного института уровень воды около –40 см БС держался почти два месяца подряд.

Ход уровня воды при сгонах, по аналогии с нагонами, описывается посредством двухмерной функции распределения вероятностей превышения. Методика нахождения указанной функции подробно описана выше, поэтому здесь ограничимся краткими пояснениями.

Статистической обработке подвергнуты все случаи сгонов с минимальным уровнем $Z_{\min} < -80$ см БС у Горного инс-

Таблица 2.21

Координаты двумерной функции обеспеченности $P(Z_{\max}, T_{Z > \bar{Z}})$
р. Нева у Горного института

Обеспеченность сочетания $P(Z_{\max}, T_{Z > \bar{Z}}), \%$	Характеристики наводнений и их обеспеченности			
	Обеспеченность, %		Характеристика	
	$P(Z_{\max})$	$P(T_{Z > \bar{Z}}/Z_{\max})$	Z_{\max} см БС	$T_{Z > \bar{Z}}$ ч
1	2	3	4	5
$\bar{Z} = 100$ см БС				
50	53	95	175	0
10	10	95	238	4,8
5	5	95	257	6,6
2	2	95	296	9,9
1	1	95	345	14,2
0,1	0,1	95	475	22,3
0,01	0,01	95	540	25,6
$\bar{Z} = 150$ см БС				
50	53	95	175	0,4
10	10	95	238	4,6
2	2	95	296	8,3
1	1	95	345	11,3
0,1	0,1	95	475	15,8
0,01	0,01	95	540	18,1
$\bar{Z} = 200$ см БС				
50	53	95	175	—
10	10	95	238	1,5
2	2	95	296	4,6
1	1	95	345	6,8
0,1	0,1	95	475	11,0
0,01	0,01	95	540	12,7
$\bar{Z} = 250$ см БС				
50	53	95	175	—
10	10	95	238	—
2	2	95	296	1,9
1	1	95	345	4,4
0,1	0,1	95	475	8,6
0,01	0,01	95	540	10,3

108

109

Характеристики наводнений и их обеспеченности									
Обеспеченность сочетания $P(Z_{\max}, T_{Z>\bar{Z}}), \%$	Обеспеченность, %		Характеристика		Обеспеченность, %		Характеристика		
	$P(Z_{\max})$	$P(T_{Z>\bar{Z}}/Z_{\max})$	Z_{\max} см БС	$T_{Z>\bar{Z}}$ ч	$P(Z_{\max})$	$P(T_{Z>\bar{Z}}/Z_{\max})$	Z_{\max} см БС	$T_{Z>\bar{Z}}$ ч	
	6	7	8	9	10	11	12	13	
$\bar{Z} = 100$ см БС									
50	67	75	161	3,2	91	55	128	3,2	
10	20	50	216	14,0	91	11	128	9,2	
5	10	50	237	16,4	62	8	166	19,7	
2	4	50	264	19,6	40	5	189	27,4	
1	2	50	296	22,7	20	5	216	31,8	
0,1	0,2	50	446	33,8	2	5	296	43,1	
0,01	0,02	50	528	37,4	0,2	5	446	54,6	
$\bar{Z} = 150$ см БС									
50	67	75	161	1,2	91	55	128	—	
10	20	50	216	7,3	91	11	128	—	
2	4	50	264	11,5	40	5	189	9,5	
1	2	50	296	13,8	20	5	216	13,8	
0,1	0,2	50	446	21,0	2	5	296	22,6	
0,01	0,02	50	528	23,4	0,2	5	446	30,7	
$\bar{Z} = 200$ см БС									
50	67	75	161	—	91	55	128	—	
10	20	50	216	1,6	91	11	128	—	
2	4	50	264	5,5	40	5	189	—	
1	2	50	296	7,5	20	5	216	3,4	
0,1	0,2	50	446	13,7	2	5	296	12,1	
0,01	0,02	50	528	16,1	0,2	5	446	19,5	
$\bar{Z} = 250$ см БС									
50	67	75	161	—	91	55	128	—	
10	20	50	216	—	91	11	128	—	
2	4	50	264	1,2	40	5	189	—	
1	2	50	296	3,4	20	5	216	—	
0,1	0,2	50	446	10,1	2	5	296	5,7	
0,01	0,02	50	528	12,3	0,2	5	446	13,8	

Примечание. Z_{\max} — максимальный годовой уровень воды,
 $T_{Z>\bar{Z}}$ — продолжительность стояния высокого уровня,
 \bar{Z} — срезочный уровень.

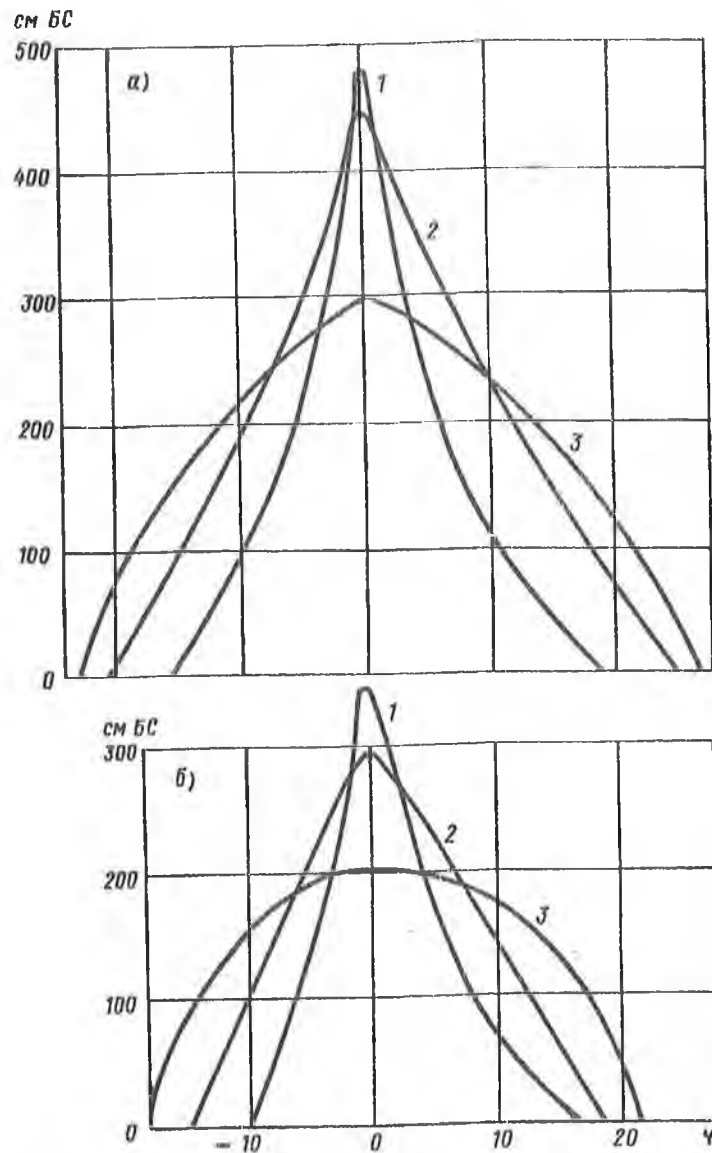


Рис. 2.17. Река Нева — Горный институт. Типовые графики хода уровня воды в период нагонного наводнения при различном сочетании максимального годового уровня воды Z_{\max} и продолжительности стояния высокого уровня $T_Z > 100$.
Усл. обозн. см. на рис. 2.14.

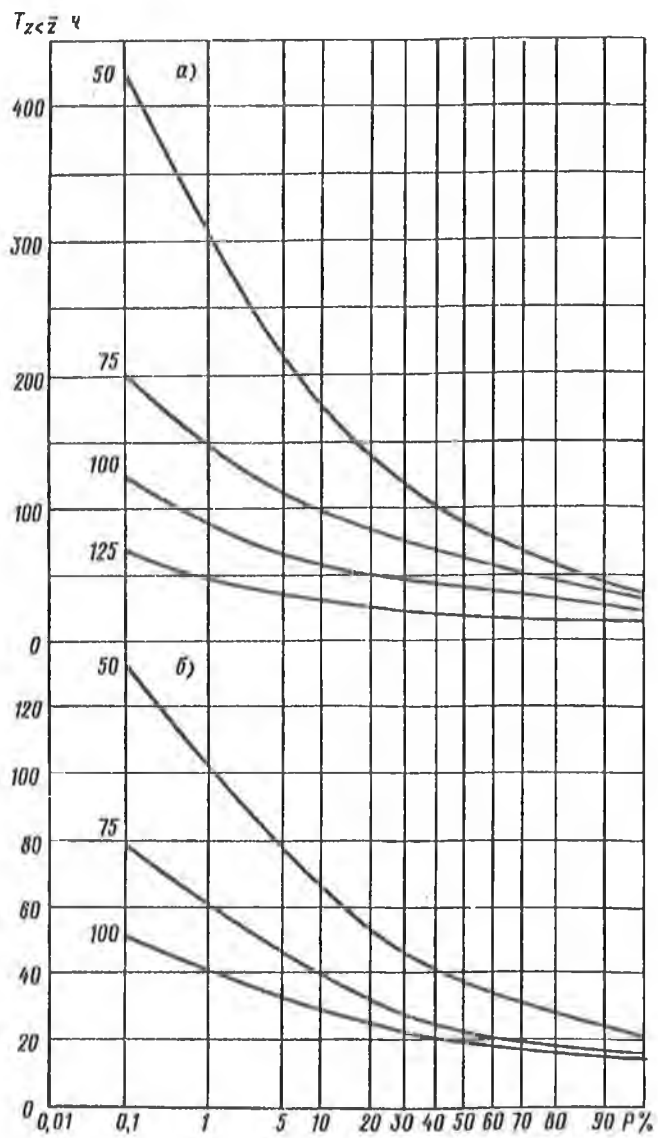


Рис. 2.18. Условные кривые обеспеченности $P(T_{Z < \tilde{Z}} < \tilde{Z}/Z_{\min})$.

Здесь $T_{Z < \tilde{Z}}$ — продолжительность стояния низкого уровня воды $Z < \tilde{Z}$ при сгоде, а — Невская губа — г. Кронштадт ($Z_{\min} = -170$ см БС); б — р. Нева — Горный институт ($Z_{\min} = 130$ см БС). Цифры у линий — срезочный уровень \tilde{Z} в см БС.

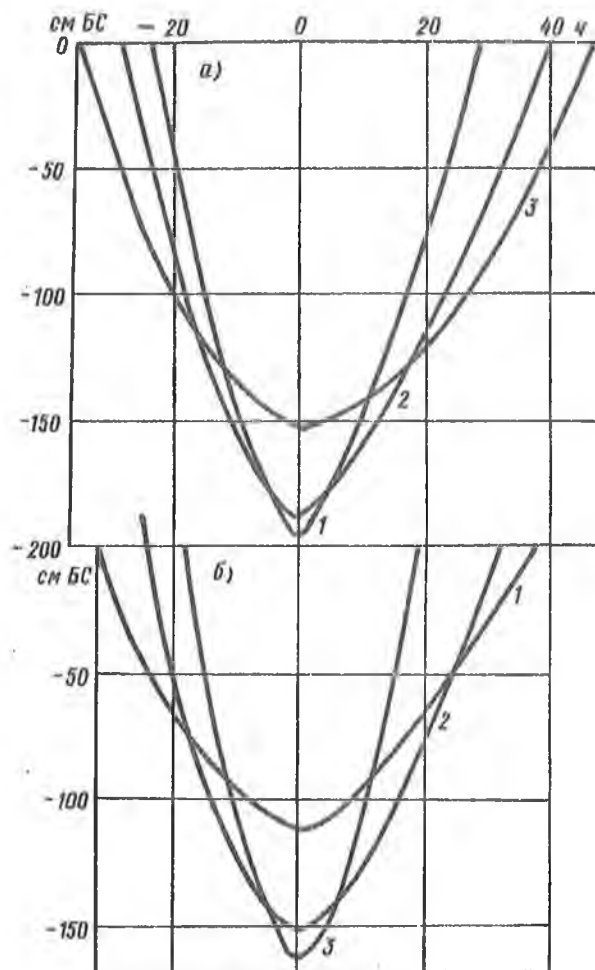


Рис. 2.19. Невская губа — г. Кронштадт. Типовые графики хода уровня воды в период сгона при различных сочетаниях минимального годового уровня Z_{\min} и продолжительности стояния низкого уровня $T_Z < -100$.

а) $P(Z_{\min}, T_Z < -100) = 99,9\%$; 1 — $P_{Z_{\min}} = 99,9\%$, $P(T_Z < -100 : Z_{\min}) = 95\%$; 2 — то же соответственно при 99,8 и 50%; 3 — при 98 и 95%. б) $P(Z_{\min}, T_Z < -100) = 99\%$; 1 — $P_{Z_{\min}} = 99\%$, $P(T_Z < -100 : Z_{\min}) = 95\%$; 2 — то же соответственно при 98 и 50%; 3 — при 80 и 95%.

титута. За период 1878—1975 гг. отмечалось 44 таких случая, а у Кронштадта за 1836—1975 гг. — 94 случая. Замеги́м, что по многим случаям имелись лишь срочные наблюдения (4—8 раз в сутки).

Связи $T_Z < \bar{Z} = f(Z_{\min})$ установлены для следующих сре́зочных уровней:

по Горному институту: $\bar{Z} = -50, -75, -100$ и -130 см БС;

по Кронштадту: $\bar{Z} = -75, -100, -130$ и -160 см БС.

Условные кривые обеспеченности $P(T_Z < \bar{Z}/Z_{\min})$ для Кронштадта и Горного института за наиболее важный частный случай, когда минимальный годовой уровень Z_{\min} имеет в многолетнем ряду повторяемость 1 раз в 100 лет, представлены на рис. 2.18. Типовые графики хода уровней

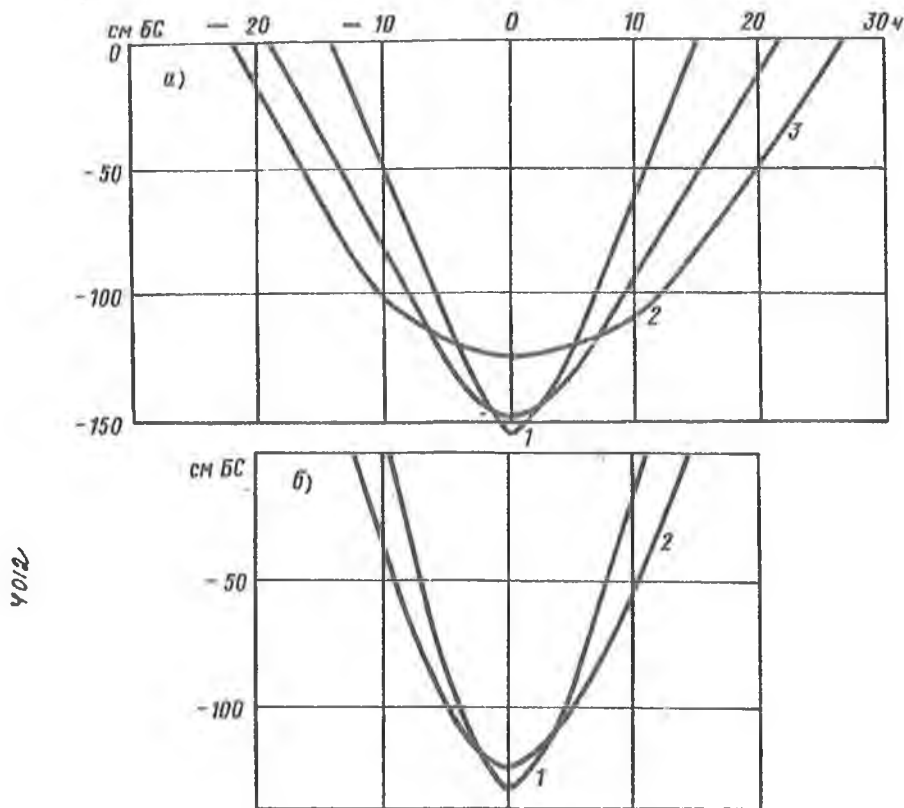


Рис. 2.20. р. Нева — Горный институт. Типовые графики хода уровня воды в период сгона при различных сочетаниях минимального годового уровня Z_{\min} и продолжительности стояния низкого уровня $T_Z < -100$. Усл. обозн. см. на рис. 2.14.

воды при обеспеченности $P(Z_{\min}, T Z < \bar{Z})$, равной 1 и 0,1 %, изображены на рис. 2.19 и 2.20.

2.6.2. Ход уровней воды при нагонах и сгонах в проектных условиях

С постройкой комплекса защитных сооружений Невская губа превратится в полузамкнутый водоем. В обычных условиях водообмен между Невской губой и Финским заливом будет осуществляться через открытые судо- и водопропускные отверстия в дамбе. Количество и габариты отверстий назначены таким образом, чтобы не внести сколько-нибудь заметных изменений в естественный водный режим губы. С получением прогноза о значительном подъеме воды в Ленинграде все отверстия в дамбе будут закрываться, и тогда Невская губа превратится уже в закрытый водоем. За счет стока р. Невы уровень в губе начнет постепенно повышаться. Одновременно на водную поверхность губы будет действовать сильный ветер (как правило, западного направления), создавая нагон в устье Невы и сгон у сооружения. В результате совместного влияния неевского стока и западного ветра в устье Невы могут наблюдаться подъемы воды (рис. 2.21). Эти подъемы получили условное название "остаточных наводнений".

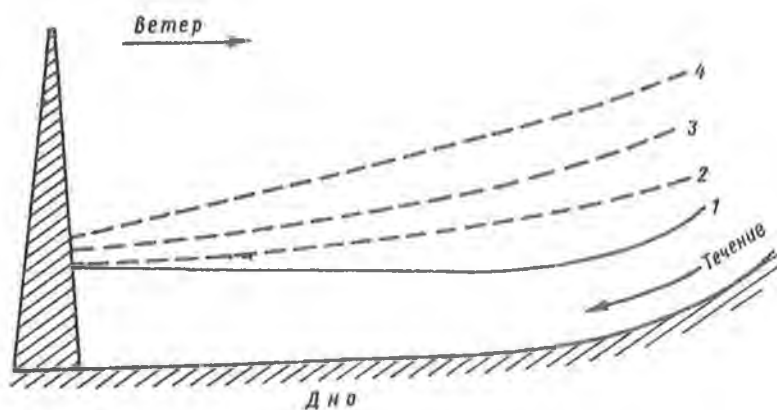


Рис. 2.21. Схема формирования остаточного наводнения в Невской губе и дельте р. Невы.

1, 2, 3 и 4 — последовательные моменты фазы подъема остаточного наводнения.

Максимальный уровень воды при остаточных наводнениях (Z_{\max}^*) зависит от ряда сильно варьирующих от случая к

случаю природных факторов — расхода р. Невы, силы и направления ветра над акваторией Невской губы, продолжительности стояния высокого уровня воды в вершине Финского залива. С учетом этого представляется целесообразным наметить следующий путь решения поставленной задачи. За каждый наблюдавшийся случай наводнения рассчитывается максимальный уровень Z^*_{\max} , по значениям которого строится кривая обеспеченности $P(Z^*_{\max})$. Верхняя часть кривой $P(Z^*_{\max})$ ориентируется на самый высокий возможный уровень.

По предварительным наметкам Ленинград и другие населенные пункты (Кронштадт, Ломоносов, Петродворец, Стрельна, Лисий Нос и т. д.) будут защищаться от любого наводнения с подъемом уровня воды р. Невы у Горного института более 160 см БС. Заметим, что за 103-летний период наблюдения (1878—1980 гг.) по самописцу у Горного института отмечалось 118 таких случаев. По другим наметкам Ленинград будет защищаться от всех наводнений с максимальным уровнем у Горного института $Z_{\max} \geq 190$ см БС. За указанный период имели место 49 таких случаев. Вопрос о том, какой подъем воды надлежит в будущем (2000—2010 гг.) считать наводнением, пока окончательно не решен.

Для определения максимального уровня остаточного наводнения Z^*_{\max} за какой-либо конкретный случай (см. ниже) нужны, помимо прочего, данные наблюдений по самописцу в створе защитных сооружений, т. е. у Кронштадта. Самописец здесь начал регулярно действовать с 1898 г. Всего за 83-летний период наблюдений у Кронштадта (1898—1980 гг.) отмечалось 98 случаев нагонов в устье р. Невы с максимальным уровнем $Z_{\max} > 160$ см БС у Горного института. Чтобы уравнивать число случаев с числом лет, а также из-за утери части подлинных материалов, уровень Z^*_{\max} рассчитан за 83 случая наводнений. В их число в виде исключения вошел случай 1879 г., характеризующийся весьма длительным стоянием высокого уровня. Отсутствующие наблюдения за уровнем у Кронштадта восстановлены по связи с Горным институтом.

Очевидно, что значение максимального уровня остаточного наводнения Z^*_{\max} будет определяться не только природными факторами, но и режимом эксплуатации комплекса защитных сооружений, в первую очередь временем открытия и закрытия судо- и водопропускных отверстий.

Что касается выбора момента для открытия отверстий, то вопрос этот решается сравнительно просто. Отверстия открываются в период спада в тот момент, когда уровни воды

перед сооружениями и за сооружениями сравниваются. Необходимо лишь считаться с тем, что с появлением сплошной преграды в виде защитной дамбы уровень воды перед нею несколько повысится по сравнению с естественными условиями. В частности, в диапазоне уровня $Z^*_{\max} = 160 \div 200$ см БС, характерного для высоких остаточных наводнений (см. ниже), и закрытых отверстиях в дамбе указанное повышение составит 10–25 см. Предположим, что повышение равно 20 см. С учетом отмеченного момента закрытия определяется, как точка пересечения наблюдаемого хода уровня у Кронштадта, т. е. перед сооружением (с поправкой +20 см), и рассчитанного хода уровня — то же у Кронштадта, но уже за сооружением.

Вопрос о выборе момента на подъеме для закрытия судов и водопропускных отверстий менее определенный. С одной стороны, чем раньше закрывать отверстия, тем больше резерв емкости в Невской губе, который в последующем будет заполняться за счет стока воды р. Невы. Но, с другой стороны, более продолжительным будет период нахождения за закрытой дамбой, а значит и больше суммарный сток р. Невы. Добавим к сказанному, что всякий случай полного перекрытия отверстий в дамбе наносит ущерб морскому судоходству и несколько сокращает водообмен между Невской губой и Финским заливом, что по санитарным условиям весьма нежелательно.

Исходя из общих соображений, на первых порах принято, что судовые и водопропускные отверстия закрываются в тот момент на подъеме, когда уровень воды в Невской губе у Кронштадта (при открытых отверстиях) достигнет 100 см БС. Такое простое правило очень удобно при эксплуатации и, как будет видно из дальнейшего, почти гарантирует от превышения максимальным уровнем Z^*_{\max} опасных значений. Если бы оказалось, что рассчитанный уровень Z^*_{\max} очень высокий, то пришлось бы избрать иной момент для закрытия отверстий и повторить расчет. Во всяком случае, надо считаться с тем, что продолжительность периода нахождения за закрытыми сооружениями не может быть меньше 1,5–2,0 ч., — поскольку на закрытие и открытие всех отверстий требуется около получаса.

Расчет максимального уровня воды остаточного наводнения Z^*_{\max} за какой-либо конкретный случай состоит из двух основных последовательных этапов: 1 — расчета хода среднего уровня Невской губы за счет поступления невиской воды; 2 — расчета ветровой денивелизации в губе и установления хода уровней у Горного института и Кронштадта. По каждому

из этих этапов в отдельности ниже приводятся нужные пояснения.

П е р в ы й э т а п. Расчет хода среднего уровня Невской губы.

Ход среднего уровня Невской губы $Z_{\text{ср}}(t)$ нетрудно рассчитать на основе уравнения водного баланса. При шаге времени 1 ч и начальном уровне $Z_{\text{ср}} = 100$ см БС запишем

$$W_{Z_{\text{ср}}}(t) = W_{Z_{\text{ср}}} = 100 + \frac{Qt \cdot 3600}{10^6}, \quad (3.27)$$

где $W_{Z_{\text{ср}}}(t)$ — суммарный объем воды (млн. м³) в Невской губе (от створа защитных сооружений до устья р. Невы) и в русле р. Невы (в пределах подпора); Q — суммарный приток воды (м³/с) в Невскую губу и в русло р. Невы в указанных границах за счет стока Невы и бокового притока с частного бассейна; t — время (ч) от момента закрытия судо- и водопропускных отверстий защитных сооружений; $W_{Z_{\text{ср}} = 100}$ — объем воды (млн. м³) при уровне $Z_{\text{ср}} = 100$ см БС.

Кривая объемов Невской губы $W(Z_{\text{ср}})$ получена в обычном порядке путем численного интегрирования кривой площадей водного зеркала $\Omega'(Z_{\text{ср}})$. Поскольку здесь представляют интерес лишь высокие уровни, то нуль отсчета кривых $\Omega'(Z_{\text{ср}})$ и $W'(Z_{\text{ср}})$ отнесен к среднему многолетнему уровню губы, или ординару, с отметкой $Z_{\text{ср}} = 0,0$ см БС. При этом уровне площадь водного зеркала Невской губы между створом защитных сооружений на западе и устьями рукавов невиской дельты на востоке $\Omega Z_{\text{ср}}$ равна 383 км². Эта площадь определена планиметрированием батиметрической карты масштаба 1:25 000 (1976 г. изд.). Площади же затопления в прибрежной зоне губы при других значениях уровня ($Z_{\text{ср}} = 50, 100, \dots, 300$ см БС) установлены по топографическим картам крупного масштаба.

Кривая объемов р. Невы $W(Z_{\text{ср}})$ построена лишь для нижнего участка реки (включая невиский бар) в пределах зоны подпора от нагонов. Длина зоны подпора меняется в зависимости от расхода воды в реке и величины нагона в Невской губе. Так, при расходе воды в Неве, близком к среднему многолетнему (2500 м³/с), и уровне в губе $Z_{\text{ср}} = 100$ см БС верхняя граница зоны подпора находится в 45–48 км от

устья, а при уровне $Z_{\text{ср}} = 200$ см БС — в 52–54 км от устья. По аналогии с Невской губой при построении кривой объемов для нижнего участка р. Невы $W''(Z_{\text{ср}})$ учтены лишь объемы в русле над "ординарным" положением водной поверхности в реке. Ведь только на заполнение этой части русловой емкости расходуется вода от нагонной волны. Высотное положение ординарной плоскости обрисовывается продольным профилем водной поверхности реки в период открытого русла при среднем многолетнем расходе воды в Неве, равном $2500 \text{ м}^3/\text{с}$ и среднем уровне в губе $0,0$ см БС (рис. 2.1). Объем (млн. м^3) подсчитан по выражению

$$W'' = \frac{l}{10^3} \left(\frac{B_0 \Delta Z_0}{2} + B_1 \Delta Z_1 + \dots + B_{n-1} \Delta Z_{n-1} + \frac{B_n \Delta Z_n}{2} \right),$$

где $B_0, B_1, \dots, B_{n-1}, B_n$ — ширина реки (м) в расстоянии $0; 1, \dots, n-1, n$ км от устья; $\Delta Z_0, \Delta Z_1, \dots, \Delta Z_{n-1}, \Delta Z_n$ — превышение уровня воды в реке при подпоре (м) над ординарным положением в расстоянии $0, 1, \dots, n-1, n$ км от устья. Данные о ширине р. Невы и основных рукавов дельты заимствованы из лоцманской карты масштаба 1:25 000 (1974 г. изд.), а о ширине второстепенных рукавов и проток дельты — из монографии [32]. Независимо от уровня воды ширина реки принималась постоянной, что при крутых берегах Невы и незначительности самого объема W'' вполне допустимо. Превышения уровня ΔZ в реке при различном среднем уровне губы $Z_{\text{ср}}$ установлены по продольным профилям водной поверхности.

Координаты кривой площадей водной поверхности $\Omega(Z_{\text{ср}})$ и кривой объемов $W(Z_{\text{ср}})$ Невской губы и нижнего участка р. Невы в пределах подпора в зависимости от среднего уровня губы $Z_{\text{ср}}$ следующие:

$Z_{\text{ср}}$ см БС . . .	0	50	100	150	200	250	300
Ω км ²	396	403	408	412	415	424	438
W млн. м^3 . . .	0	238	460	634	824	1016	1250

В исходное уравнение водного баланса Невской губы (2.27) входит также суммарный приточный расход (Q), который складывается из расхода р. Невы ($Q_{\text{Нева}}$) и приточного расхода с частного бассейна ($Q_{\text{част}}$), т. е.

$$Q = Q_{\text{Нева}} + Q_{\text{част}}$$

Расход воды в Неве ($Q_{\text{Нева}}$) за каждый конкретный случай наводнения определен на основании многолетней кривой $Q_{\text{Нева}}(Z)$ по наблюдаемому среднему суточному уровню у г. Петрокрепости за день до наводнения. Основанием служило то, что время добегания от истока до устья реки составляло около 18 ч. При этом переходный коэффициент $k_{\text{зим}}$ в случае наличия у г. Петрокрепости заберегов и ледохода не вводился; случаев же ледостава не было. Заметим еще, что нагону в устье р. Невы обычно соответствует сгон в истоке. Однако минимальный уровень при сгоне в истоке, как правило, наступает на 2–4 ч позже максимального нагонного уровня в устье.

Боковой приток с частного бассейна р. Невы и Невской губы от Новосаратовки до створа защитных сооружений площадью $\Delta F = 2450 \text{ км}^2$ находился путем суммирования притока с трех частей, на которые был разделен указанный бассейн:

1. Водная поверхность Невской губы и р. Невы, $\Delta F_1 = 396 \text{ км}^2$. Приточный расход с этой площади равен количеству осадков, выпадающих в единицу времени. При обычной длительности выпадения осадков около 6 ч (установлена обработкой записей из таблиц ТМ-1) имеем для среднего расхода ($\text{м}^3/\text{с}$)

$$Q_{\text{част.1}} = \frac{396 \cdot 10^6}{6 \cdot 3600} \cdot \frac{x}{10^3} \approx 18x,$$

где x — слой осадков (мм) за соответствующие полусутки, средний арифметический по двум метеорологическим станциям (Кронштадт, Ленинград-порт);

2. Города и городские поселения, $\Delta F_2 = 790 \text{ км}^2$ (в перспективе на 2000–2010 гг.). При указанных осадках, продолжительности дождевого стока около 8 ч (т. е. на 2 ч больше продолжительности выпадения осадков) и коэффициенте стока 0,8 для среднего расхода ($\text{м}^3/\text{с}$) имеем

$$Q_{\text{част.2}} = \frac{790 \cdot 10^6}{8 \cdot 3600} \cdot \frac{0,8x}{10^3} \approx 22x,$$

где x — слой осадков (мм) за полусутки;

3. Остальная территория частного бассейна площадью

$$\Delta F_3 = \Delta F - (\Delta F_1 + \Delta F_2) = 2450 - (396 + 790) = 1264 \text{ км}^2.$$

Приток с этой территории ($\text{м}^3/\text{с}$) вычислен через средний арифметический модуль расхода ($M_{\text{ср}}$) небольших рек-аналогов на день наводнения

$$Q_{\text{част.3}} = M_{\text{ср}} \cdot 1264,$$

где $M_{\text{ср}}$ — в $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$. В качестве рек-аналогов для периода 1933–1980 гг. избраны: р. Большая Охта — д. Новое Девяткино ($F = 768 \text{ км}^2$), р. Мга — д. Горы ($F = 754 \text{ км}^2$). Река Большая Охта впадает в Неву справа и характерна для части бассейна, занятой сельскохозяйственными угодьями и парками. Река Мга, хотя и впадает в Неву выше Новосаратовки, но вполне характерна для части бассейна, покрытой лесами, болотами и заболоченными землями. Для периода 1878–1932 гг., когда на этих реках наблюдения не велись, модуль среднего суточного расхода принимался по р. Тихвинке — д. Горелуха ($F = 2200 \text{ км}^2$). О возможности такой замены свидетельствует наличие приближенной связи между средними суточными расходами рек Большая Охта и Тихвинка в дни больших нагонов воды в устье р. Невы.

Описанным способом определены расходы р. Невы ($Q_{\text{Нева}}$) и приточные расходы с частного бассейна ($Q_{\text{част}}$) за каждый случай наводнения. В целом, как отмечалось, суммарный приток в огражденную акваторию равен $Q = Q_{\text{Нева}} + Q_{\text{част}}$. В большинстве случаев $Q_{\text{част}} = 100 \div 300 \text{ м}^3/\text{с}$, что на 5–10 % меньше суммарного притока. Но в отдельных случаях $Q_{\text{част}} = 400 \div 500 \text{ м}^3/\text{с}$, или 15–20 % суммарного притока.

Полученная кривая объемов $W(Z_{\text{ср}})$ и подсчитанные расходы Q использованы для предвычисления хода среднего уровня Невской губы во время наводнения $Z_{\text{ср}}(t)$ по уравнению (2.27). Для облегчения расчетов уравнение (2.27) преобразовано так:

$$\frac{W_{Z_{\text{ср}}}(t) - 460}{3,6} = \frac{Qt}{1000} \quad (2.28)$$

(поскольку $W_{Z_{\text{ср}} = 100} = 460$ млн. м³) и затем представлено в табличной форме в виде функции

$$Z_{\text{ср}}(t) = f(Q, t). \quad (2.29)$$

Использование функции (2.29) (не приводится) для предвычисления хода уровня $Z_{\text{ср}}(t)$, строго говоря, возможно, если в момент закрытия отверстий в защитных сооружениях (т. е. когда уровень у Кронштадта на фазе подъема достигнет 100 см БС — см. ниже) средний уровень Невской губы $Z_{\text{ср}}$ также равен 100 см БС. Судя по имеющимся данным, примерно в 85 % случаев в указанный момент $90 \leq Z_{\text{ср}}(t = 0) \leq 110$ см БС, что находится в пределах точности наблюдений и расчетов. При существенном же неравенстве $Z_{\text{ср}}(t = 0) \neq 100$ см БС введено следующее правило. Если в начальный момент $Z_{\text{ср}}(t = 0) < 90$ см БС, то расчет хода уровня $Z_{\text{ср}}(t)$ по-прежнему выполнялся по табулированной функции (2.27), поскольку это идет в запас. Если же $Z_{\text{ср}}(t = 0) > 110$ см БС, то расчет осуществляется по индивидуальному для каждого случая уравнению водного баланса вида

$$W_{Z_{\text{ср}}(t)} = W_{Z_{\text{ср}}(t=0)} + \frac{Qt}{1000} \cdot 3,6 \text{ млн. м}^3. \quad (2.30)$$

Отметим попутно, что средний уровень Невской губы (см БС) вычислялся как полусумма

$$Z_{\text{ср}} = \frac{Z_{\text{НУС}} + Z_{\text{Крон}}}{2}, \quad (2.31)$$

а при отсутствии наблюдений у НУС по выражению

$$Z_{\text{ср}} = \frac{(Z_{\text{Гор.ин-т}} - 6) + Z_{\text{Крон}}}{2}, \quad (2.32)$$

где 8 см есть разность средних многолетних уровней р. Невы на участке Горный институт — Невская устьевая станция (НУС).

Второй этап. Расчет ветровой денивиляции в Невской губе и установление хода уровней воды у Горного института и Кронштадта.

Расчет ветровой денивиляции в огражденной акватории выполнен по методу А. В. Караушева /21/. В соответствии с рекомендациями /39/ Невская губа разделена на три однородных участка, именно:

Расстояние от защитных сооружений, км . . .	0—6,2	6,2—21,4	21,4—27,0
Средняя глубина (при уровне $Z_{\text{ср}} = 0$ см БС), м	3,15	3,84	2,27

Если среднюю глубину на участке при уровне $Z_{\text{ср}} = 0$ см БС обозначить $H_{Z_{\text{ср}} = 0}$, то соответствующая глубина при любом другом уровне $Z_{\text{ср}}$ запишется так:

$$H_{Z_{\text{ср}}} = H_{Z_{\text{ср}} = 0} + Z_{\text{ср}} \quad (2.33)$$

Помимо морфометрических характеристик для целей расчета нужны еще данные о средней высоте волны на участке и коэффициенте шероховатости дна.

Высота волны на участке при наличии защитных сооружений определена по способу, изложенному в работе /24/. При этом сделано допущение о постоянстве глубины в пределах расчетного участка. Дно губы песчаное. Направление ветра западное; другое направление в случае больших подъемов воды встречается крайне редко. Средняя высота волны на участке находилась, как средняя взвешенная по площади. Сведения о рассчитанных высотах волны h при различных значениях скорости западного ветра $\geq \cos \alpha = V_x$ и среднего уровня губы $Z_{\text{ср}}$ приведены в табл. 2.22.

Коэффициент шероховатости (по Маннингу) для Невской губы вместе с баром р. Невы принят равным 0,04. Значение это получено обратными вычислениями. Так, при среднем многолетнем расходе воды р. Невы, равном $2500 \text{ м}^3/\text{с}$, и средней площади поперечного сечения губы в безветренную погоду W , равной $43\,200 \text{ м}^2$, имеем:

Таблица 2.22

Средняя высота волны 1 %-ной обеспеченности (h)
по отдельным участкам Невской губы
при различных скоростях ветра западного направления V_x
и средних уровнях губы $Z_{\text{ср}}$

$Z_{\text{ср}}$ см БС	V_x м/с		
	10	20	30
0,0—6,2 км от защитных сооружений			
0	0,5	0,9	1,5
100	0,6	1,0	1,6
200	0,6	1,1	1,8
300	0,7	1,2	1,9
6,2—21,4 км от защитных сооружений			
0	0,6	1,1	1,7
100	0,7	1,3	1,9
200	0,8	1,4	2,1
300	0,9	1,5	2,3
21,4—27,0 км от защитных сооружений			
0	0,4	0,7	1,2
100	0,5	0,9	1,5
200	0,7	1,2	1,8
300	0,8	1,3	2,1

$$V_{\text{ср}} = \frac{2500}{43 \cdot 200} = 0,06 \text{ м/с.}$$

Средняя глубина губы $H_{\text{ср}} = 2,98$ м. Между НУС и Кронштадтом ($\Delta L = 26$ км) при указанном расходе падение $\delta Z = 0,035$ м. Согласно формуле Шези—Маннинга коэффициент шероховатости равен

$$n = \frac{H_{\text{ср}}^{1/6}}{V_{\text{ср}}} \sqrt{H_{\text{ср}} \frac{\delta Z}{\Delta L}} = \frac{(2,98)^{1/6}}{0,06} \sqrt{2,98 \cdot \frac{0,035}{26 \cdot 10^3}} = 0,04.$$

Принятый коэффициент шероховатости $n = 0,04$ несколько больше того, что указывается в таблицах Срибного (для больших и средних равнинных рек с благоприятными условиями состояния ложа и течения воды $n = 0,033$). Несколько преувеличенное значение коэффициента n объясняется наличием в юго-восточной части губы застойной зоны, а также системы отмелей на бере р. Невы.

В общем случае, согласно рекомендациям [21], падение на каком-либо участке водоема есть арифметическая сумма двух слагаемых

$$\delta Z = \delta Z_{\text{ст}} + \delta Z_{\text{ветр}} \quad (2.34)$$

где $\delta Z_{\text{ст}}$ — падение, обусловленное стоковым течением, $\delta Z_{\text{ветр}}$ — падение, вызванное действием ветра. Величина $\delta Z_{\text{ст}}$ в Невской губе настолько незначительна, что ее можно учитывать приближенно в целом для губы и устья Невы (см. ниже). В отношении же величины $\delta Z_{\text{ветр}}$ надо сделать ряд пояснений.

Падения $\delta Z_{\text{ветр}}$ на каком-либо участке водоема определяются по выражению

$$\delta Z_{\text{ветр}} = \frac{\Delta L}{H_{\text{ср}}} T, \quad (2.35)$$

где ΔL — длина участка, м; $H_{\text{ср}}$ — средняя глубина на участке, м; параметр

$$D = 1 + \frac{24}{3C} \quad (2.36)$$

характеризует силу трения на границе раздела вода—грунт, а параметр

$$T = 1,3 \cdot 10^{-4} (0,0033 + 0,01VV_x) \quad (2.37)$$

учитывает касательное напряжение на границе раздела вода—

воздух. Здесь C — коэффициент Шези; h — средняя высота волны на участке, м; V — скорость ветра на высоте 2 м над водной поверхностью, м/с; $V_x = V \cos \alpha$ — то же проекция скорости ветра на ось залива. Для западного ветра, совпадающего с осью Финского залива, произведение $V V_x \approx V_x^2$.

Вкратце о скорости ветра. В последующем при расчетах обычно использовались наблюдения по двум метеорологическим станциям (Ленинград-порт и Кронштадт). С учетом местоположения этих станций при переходе от скорости ветра по флюгеру над сушей к скорости ветра над водой требуется ввести поправочный множитель 1,2, а при переходе от высоты флюгера к высоте 2 м — множитель 0,8. Произведение $1,2 \times 0,8 \approx 1,0$, поэтому никаких поправок в наблюдаемую скорость ветра не вводилось. К такому же выводу пришли авторы гидродинамических моделей ленинградских наводнений.

Денивияция $\delta Z_{\text{ветр}}$ находилась одновременно для всех трех расчетных участков Невской губы при заданных значениях среднего уровня губы $Z_{\text{ср}}$ и скорости западного ветра V_x . По ним в первом приближении вычерчивался продольный профиль водной поверхности губы. После проверки на сходимости водного баланса выполнялся расчет во втором приближении, а иногда даже в третьем приближении (пока разность между суммарным объемом при уровне $Z_{\text{ср}}$ и суммой объемов трех участков не превышала 3–5 %).

Рассчитанные уровни у западной и восточной оконечностей Невской губы корректировались еще на величину перепада $\delta Z_{\text{ст}}$ за счет стокового течения (табл. 2.23).

Таблица 2.23

Падение по длине Невской губы (см)
при стоковом режиме течений

Средний уровень Невской губы $Z_{\text{ср}}$ см БС	Горный институт — Кронштадт	Горный институт — середина Невской губы	Середина Невской губы — Кронштадт
0	12	8	4
100	9	6	3
200	8	5	3
250	7	4	3

Приведенные в табл. 2.23 величины $\delta Z_{ст}$ получены отчасти по натурным наблюдениям и отчасти посредством определений по формуле Шези.

Итогом предварительных расчетов являются функции

$$Z_{Гор.ин-т} = f(Z_{ср}, V_{\chi}) \text{ и } Z_{Крон} = f(Z_{ср}, V_{\chi}). \quad (2.38)$$

Однако пользоваться ими неудобно, поскольку не всегда ветер бывает западного направления. На косинус же угла, образуемого ветром и осью залива, надлежит умножить перепад уровней (это вытекает из формул (2.35) и (2.37), но не сами уровни. Кроме того, функция (2.38) занимает на графике узкую полосу и нанести дополнительные изолинии затруднительно. Для удобства пользования на основании функций (2.38), во-первых, вычерчена разностная функция

$$\delta Z = Z_{Гор.ин-т} - Z_{Крон} = f(Z_{ср}, V_{\chi}) \quad (2.39)$$

(рис. 2.22) и, во-вторых, установлены выражения

$$Z_{Гор.ин-т} = Z_{ср} + 0,54\delta Z \quad (2.40)$$

и

$$Z_{Крон} = Z_{ср} - 0,46\delta Z. \quad (2.41)$$

Очевидно, если ветер направлен под углом α к оси губы, то

$$Z_{Гор.ин-т} = Z_{ср} + 0,54(\delta Z \cos \alpha) \quad (2.40a)$$

и

$$Z_{Крон} = Z_{ср} - 0,46(\delta Z \cos \alpha). \quad (2.41a)$$

Вычисленный по методу Караушева перепад уровней и сами уровни характеризуют стационарный процесс. В реальных условиях скорость и направление ветра, а также средний

уровень губы непрерывно меняются во времени. В связи с этим примем во внимание следующее. Средний уровень губы меняется плавно. Интенсивность подъема уровня в проектных условиях обычно составляет 3—5 см/ч и лишь иногда — 8—10 см/ч. В момент закрытия судо- и водопропускных отверстий в Невской губе уже существует вполне развитая система волнения. Наконец, речь идет о постепенном переходе от одного почти установившегося режима к другому при небольших различиях скорости и направления ветра, высоты волны и среднего уровня. В отдельных случаях все же отмечаются довольно резкие изменения скорости и направления ветра, что вызывает соответствующий спад или подъем уровня в продолжение 1,0—1,5 ч. С учетом всего изложенного был принят такой порядок расчета хода уровней Невской губы и р. Невы при остаточных наводнениях:

— по данным о приточном расходе Q на основании уравнения (2.28) определяется средний уровень Невской губы $Z_{ср}$ на конец каждого часового интервала времени, начиная с момента, когда на фазе подъема у Кронштадта уровень достигал 100 см БС (т. е. $Z_{Крон}(t = 0) = 100$ см БС);

— по хронологическому графику изменения скорости и направления ветра на двух метеорологических станциях (Ленинград-порт, Кронштадт) находилась в целом для губы средняя скорость V и средняя величина $\cos a$ для середины каждого часового интервала времени;

— с учетом уровня $Z_{ср}$ на конец каждого часового интервала времени и скорости ветра V на середину интервала по рис. 2.22 устанавливался перепад уровня δZ между Горным институтом и Кронштадтом в случае западного ветра;

— величина перепада δZ умножалась на $\cos a$ и по выражениям (2.40а) и (2.40б) находились значения уровня у Горного института и Кронштадта, которые относились к концу соответствующего часового интервала времени.

Заметим, что иногда график хода уровня у Кронштадта при наводнении имел многопиковое очертание, и уровни между пиками опускались ниже 100 см БС. При этом, если перерыв между пиками был меньше четырех часов, то оба пика рассматривались как одно наводнение. Напомним, что расчет начинался с момента, когда на подъеме уровень у Кронштадта достигал 100 см БС. Предполагалось, что в этот начальный момент ($Z_{Крон}(t = 0) = 100$ см БС) полностью перекрываются все отверстия защитных сооружений. Закачивался расчет на спаде, когда предвычисленный уровень у Кронштадта оказывался равным наблюдаемому уровню, поднятому на 20 см.

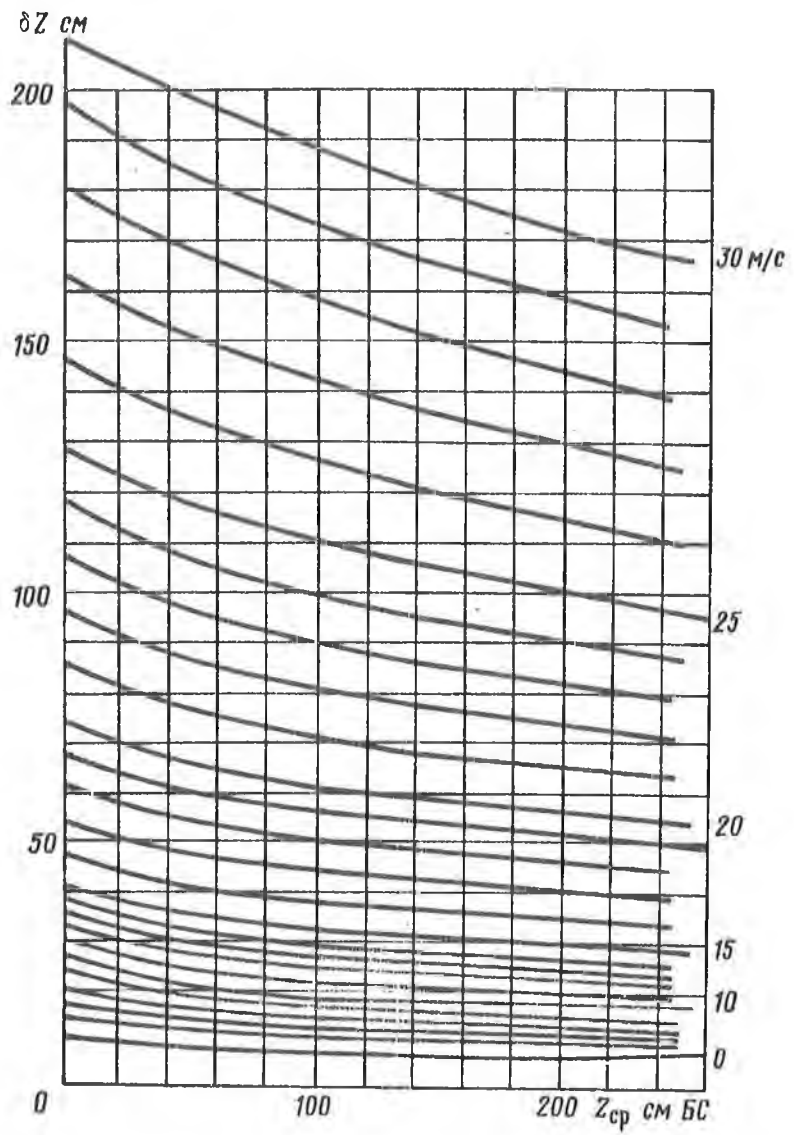


Рис. 2.22. График функции $\delta Z = f(Z_{cp}, V_x)$ для участка Горный институт — Кронштадт.

У линий — скорость ветра V_x в м/с.

Уместно задать вопрос: является ли указанный начальный момент оптимальным? Может быть, если избрать иной начальный момент, то максимальный уровень остаточного наводнения у Горного института ($Z_{\max \text{ Гор. ин-т}}^*$) — эта основная расчетная характеристика — окажется более низким.

Для ответа на поставленный вопрос выполнены дополнительные подсчеты по описанной методике с начального момента, приуроченного к наступлению на фазе подъема уровня $Z_{\text{Крон}}(t=0) = 70$ и 120 см БС. Подсчеты осуществлены по четырем группам наводнений (в каждой группе пять случаев), а именно:

— случаи с самой большой продолжительностью нахождения за закрытой дамбой (1912, 1913, 1921, 1948, 1975 гг.);

— случаи с самым высоким максимальным уровнем остаточного наводнения у Горного института, исчисленным при $Z_{\text{Крон}}(t=0) = 100$ см БС (1879, 1903, 1912, 1913, 1918 гг.); (между двумя наводнениями 1879 г. (4–5/IX) и 5–6/IX) уровень у Кронштадта не опускался ниже 70 см БС. Продолжительность нахождения за закрытой дамбой при $Z_{\text{Крон}}(t=0) = 70$ см БС для второго наводнения условно принята такой же, как и для первого наводнения);

— случаи с самой большой продолжительностью стояния высокого уровня ($Z_{\text{Крон}} > 100$ см БС) в естественных условиях (1912, 1913, 1921, 1948, 1975 гг.);

— случаи с самой большой продолжительностью стояния высокого уровня ($Z_{\text{Крон}} > 70$ см БС) в естественных условиях (1879, 1903, 1913, 1951, 1962, 1975 гг.).

Поскольку некоторые наводнения являются экстремальными одновременно по нескольким характеристикам, то всего набирается 10 случаев из 20 возможных. Результаты подсчетов помещены в табл. 2.24. При их анализе можно прийти к важным выводам:

1. Чем ниже начальный уровень $Z_{\text{Крон}}(t=0)$, тем больше продолжительность пребывания за закрытыми защитными сооружениями (T^*). В частности, при $Z_{\text{Крон}}(t=0) = 70$ см БС она обычно на 3–10 ч больше, чем при $Z_{\text{Крон}}(t=0) = 100$ см БС, а при $Z_{\text{Крон}}(t=0) = 120$ см БС, напротив, на 3–8 ч меньше. Следовательно, для уменьшения периода T^* надо закрывать отверстия как можно позже;

2. Зависимость максимального уровня остаточного наводнения $Z_{\max \text{ Гор. ин-т}}^*$ от начального уровня $Z_{\text{Крон}}(t=0)$ довольно сложная. Так, при $Z_{\text{Крон}}(t=0) = 120$ см БС рассчитанный максимум $Z_{\max \text{ Гор. ин-т}}^*$ почти такой же, как и при $Z_{\text{Крон}}(t=0) = 100$ см БС, но при $Z_{\text{Крон}}(t=0) = 70$ см БС максимум уже в среднем на 25–35 см ниже. Из

Таблица 2.24

Продолжительность нахождения за закрытыми защитными сооружениями (Г*)
и максимальный уровень остаточного наводнения (Z*_{пакГор.ин-т})
при перекрытии отверстий с наступлением
на фазе подъема уровня Z_{Крон}(t = 0) = 70, 100 и 120 см БС

Дата	Z _{Крон} (t = 0) = 70 см БС		Z _{Крон} (t = 0) = 100 см БС		Z _{Крон} (t = 0) = 120 см БС						
	Год	число	Г*	Z* _{пакГор.ин-т}	Г*	Z* _{пакГор.ин-т}					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
		Г*		Г*		Г*		Г*		Г*	
		ч		ч		ч		ч		ч	
		мин		мин		мин		мин		мин	
		см БС		см БС		см БС		см БС		см БС	
1879	5 IX	28	35	227	12	15	189	10	00	210	
1903	15 XI	19	35	157	15	00	175	12	10	179	
1912	3 X	19	00	133	15	00	161	7	25	161	
1913	5 XII	28	30	153	17	25	156	12	25	171	
1918	24 VIII	16	15	136	15	00	169	12	00	179	
1921	4 X	24	00	132	16	35	148	12	00	154	
1948	22 X	21	00	119	16	50	148	12	35	152	
1951	5 XII	20	00	115	7	25	122	5	00	138	
1962	13 IX	15	40	125	8	10	135	5	00	146	
1975	3 XII	32	00	198	21	25	138	13	35	142	

последнего факта на первый взгляд вытекает, что отверстия надо перекрывать при $Z_{\text{Крон}}(t=0) < 100$ см БС. Подобный вывод неверен по следующим причинам:

— при $Z_{\text{Крон}}(t=0) = 70$ см БС по сравнению с $Z_{\text{Крон}}(t=0) = 100$ см БС заметно снижаются не все максимумы, а лишь те, что попадают в диапазон $150 < Z_{\text{max Гор.ин-т}}^* < 170$ см БС. Уровни эти не опасны для современного Ленинграда. Укажем, что в настоящее время частичное подтапливание города происходит при уровне у Горного института 180–190 см БС. Затопление парков, садов и других малонаселенных районов начинается при уровне 190–200 см БС, а отдельных жилых кварталов — при уровне 210–220 см БС;

— величина снижения уровня $Z_{\text{max Гор.ин-т}}^*$ обнаруживает тенденцию к уменьшению по мере возрастания размера остаточного наводнения;

— в ряде случаев в период подъема отмечаются неоднократные переходы уровня через $Z_{\text{Крон}} = 70$ см БС, и в эксплуатационных условиях нелегко будет оценить, какой из переходов является окончательным. При достижении же на фазе подъема уровня $Z_{\text{Крон}} = 100$ см БС подобные переходы встречаются весьма редко.

Таким образом, в качестве начального уровня на фазе подъема, при котором заканчивается перекрытие всех судои водопропускных отверстий, следует избрать уровень $Z_{\text{Крон}}(t=0) = 100$ см БС. Здесь не рассматривается вопрос о том, что в отдельных случаях окажется целесообразным закрывать отверстия при наступлении более низкого уровня ($Z_{\text{Крон}}(t=0) = 40 \div 60$ см БС), — чтобы избежать больших скоростей. Решение этого вопроса возможно лишь для каждого конкретного случая на стадии эксплуатации.

Возвратимся к анализу полученных данных о ходе уровня воды в огражденной акватории при формировании остаточных наводнений.

За использованный 83-летний период непрерывных наблюдений за уровнем воды у Кронштадта (1898–1980 гг.) отмечалось 98 наводнений с максимальным уровнем у Горного института более 160 см БС. Если исключить небольшие наводнения ($160 < Z_{\text{max}} < 180$ см БС), то число случаев почти равно числу лет. Примерно такая же картина наблюдается и для всего имеющегося 278-летнего периода наблюдений (1703–1980 гг.). Добавим, что по очевидным практическим соображениям все равно: закрывать ли отверстия, например, два раза в течение двух лет или же два раза в течение одного года. Учитывая отмеченно, вся совокупность из 83 случаев наводнений, за которые удалось найти нужные

для расчетов исходные данные по стоку, уровням и ветру, рассматривалась как совокупность из 83 лет.

По полученным в процессе расчетов данным построены эмпирические кривые обеспеченности основных характеристик остаточных наводнений: максимальных уровней у Горного института и Кронштадта [$P(Z^*_{\max \text{Гор.ин-т}})$ и $P(Z^*_{\max \text{Крон}})$] и продолжительности периода нахождения за закрытыми защитными сооружениями $P(T^*)$ — отдельно для случаев, когда Ленинград будет защищаться от всех наводнений с уровнем $Z_{\max \text{Гор.ин-т}} > 160$ и 180 см БС. Кривые обеспеченности обладают небольшой асимметрией: их экстраполяция в область редкой повторяемости не сопряжена с какими-либо трудностями. Координаты упомянутых кривых помещены в табл. 2.25.

Таблица 2.25

Координаты кривых обеспеченности $P(Z^*_{\max \text{Гор.ин-т}})$ и $P(T^*)$

	Обеспеченность, %				
	0,1	1	5	20	25
При защите от всех наводнений с уровнем $Z_{\max \text{Гор.ин-т}} > 160$ см БС					
Максимальный уровень остаточного наводнения ($Z^*_{\max \text{Гор.ин-т}}$), см БС	223	190	165	144	134
Продолжительность на- хождения за закрытыми сооружениями (T^*), ч	24	20	16	12	8
При защите от всех наводнений с уровнем $Z_{\max \text{Гор.ин-т}} > 180$ см БС					
Максимальный уровень остаточного наводнения ($Z^*_{\max \text{Гор.ин-т}}$), см БС	223	190	161	140	124
Продолжительность на- хождения за закрытыми сооружениями (T^*), ч	22	18	15	11	5

По табл. 2.25, в частности, видно, что максимальный уровень остаточного наводнения у Горного института редкой повторяемости для наблюдавшихся наводнений с $Z_{\max \text{ Гор.ин-т}} \geq 160$ см БС такой же, как и для наводнений с $Z_{\max \text{ Гор.ин-т}} \geq 180$ см БС. Объясняется это тем, что случаи с высоким уровнем в проектных условиях $Z^*_{\max \text{ Гор.ин-т}}$ приходится, как правило, на одни и те же большие наводнения.

Связь между предвычисленным максимальным уровнем $Z^*_{\max \text{ Гор.ин-т}}$ (см БС) и продолжительностью нахождения за закрытыми защитными сооружениями T^* (ч) довольно тесная, притом одинаковая для наводнений с $Z_{\max \text{ Гор.ин-т}} > 160$ и более 180 см БС:

$$Z^*_{\max \text{ Гор.ин-т}} = 3,9T + 105.$$

Приводимые ниже уравнения множественной линейной регрессии могут быть использованы для прогноза уровня $Z^*_{\max \text{ Гор.ин-т}}$ и продолжительности T^* при наличии соответствующих предсказанных величин Q , $V_{x \max}$ и

$T_{Z_{\text{Крон}}} > 100$:

— при защите от всех наводнений с уровнем $Z_{\max \text{ Гор.ин-т}} \geq 160$ см БС

$$\begin{aligned} Z^*_{\max \text{ Гор.ин-т}} &= 0,0072 + 1,59V_{x \max} + \\ &+ 1,22T_{Z_{\text{Крон}}} > 100 + 85, \end{aligned} \quad (2.42)$$

$$T^* = 0,00083Q + 0,17V_{x \max} + 0,58T_{Z_{\text{Крон}}} > 100 + 4,2; \quad (2.43)$$

— при защите от всех наводнений с уровнем $Z_{\max \text{ Гор.ин-т}} \geq 180$ см БС

$$\begin{aligned} Z^*_{\max \text{ Гор.ин-т}} &= 0,0070Q + 1,40V_{x \max} + \\ &+ 1,87T_{Z_{\text{Крон}}} > 100 + 83, \end{aligned} \quad (2.44)$$

и

$$T^* = 0,00037Q + 0,01V_{x \max} + 0,75T_{Z_{\text{Крон}}} > 100 + 3,6. \quad (2.45)$$

Здесь уровень $Z^*_{\max \text{ Гор.ин-т}}$ — в см БС, расход Q — в $\text{м}^3/\text{с}$, максимальная скорость ветра западного направления $V_{\text{хmax}}$ — в $\text{м}/\text{с}$, продолжительность T^* и $T_{Z_{\text{Крон}}} > 100$ в часах. Теснота зависимости оценивается совокупным коэффициентом корреляции $R = 0,86$ для уравнений (2.42) и (2.44), а также $R = 0,80$ для уравнений (2.43) и (2.45).

Из материалов регрессионного анализа (не приводятся) для наводнений с $Z_{\max \text{ Гор.ин-т}} > 160$ см БС, видно, что продолжительность периода нахождения за закрытыми вооружениями T^* почти всецело определяется ходом уровня в естественных условиях, прежде всего длительностью стояния высокого уровня у Кронштадта ($T_{Z_{\text{Крон}}} > 100$). На величину же максимума остаточного наводнения у Горного института $Z^*_{\max \text{ Гор.ин-т}}$, помимо хода уровня при наводнении, значительное влияние оказывает скорость ветра. Влияние расхода воды на обе характеристики сравнительно невелико (главным образом потому, что сам расход $Q = Q_{\text{Нева}} + Q_{\text{бок}}$ колеблется в небольшом пределе).

Используя описанную методику расчета хода уровней воды в огражденной акватории при остаточных наводнениях, можно решить еще одну важную задачу. А что, если, несмотря на двойную блокировку, случится авария и почему-либо не закроется самое большое судопропускное отверстие в Южных воротах (отверстие С-1) или даже все отверстия.

Запишем уравнение водного баланса Невской губы с нижней части р. Невы для часового интервала времени в случае, когда отверстия в защитных сооружениях открытые

$$\left(\frac{Q_{\text{соор.нач}} + Q_{\text{соор.кон}}}{2} \right) 3600 + (Q_{\text{Нева}} + Q_{\text{части}}) 3600 = W(Z_{\text{ср.кон}}) - W(Z_{\text{ср.нач}}) \quad (2.46)$$

Все обозначения известны. Расход воды через отверстие $Q_{\text{соор.}}$ есть функция уровня нижнего бьефа (т. е. Финского залива) ($Z_{\text{Ф.з.}}$) и падения, или напора (т. е. разности между уровнями верхнего и нижнего бьефов) ΔZ . Поэтому

$$Q_{\text{соор.}}(Z_{\text{Ф.з.нач}} \Delta Z_{\text{нач}}) + Q_{\text{соор.}}(Z_{\text{Ф.з.кон}} \Delta Z_{\text{кон}}) 3600 + (Q_{\text{Нева}} + Q_{\text{части}}) 3600 = W(Z_{\text{ср.кон}}) - W(Z_{\text{ср.нач}}) \quad (2.47)$$

Указанная зависимость имеется в материалах технического проекта защиты Ленинграда от наводнений для каждого отверстия и в целом для всех отверстий.

Расчет хода уровня для рассматриваемой аварийной ситуации выполнен на примере четырех самых больших наводнений за всю историю Петербурга—Ленинграда, случившихся в 1777, 1824, 1924 и 1955 гг. Условия расчета следующие:

— ход уровня Финского залива в нижнем бьефе защитных сооружений при наводнении получен путем увеличения на 11 % наблюдаемого (или восстановленного) ежечасного уровня у Кронштадта (точнее, путем увеличения подъема уровня над ординаром);

— расходы воды $Q_{\text{Нева}}$ и $Q_{\text{част}}$ за наводнения 1924 и 1955 гг. взяты из наблюдений; для наводнений 1777 и 1824 гг. приняты $Q_{\text{Нева}} = 3500 \text{ м}^3/\text{с}$ и $Q_{\text{част}} = 300 \text{ м}^3/\text{с}$;

— скорость и направление ветра для наводнений 1924 и 1955 гг. заимствованы из наблюдений; для наводнений 1777 и 1824 гг. принято, что ветер западный со скоростью 25 м/с.

Поскольку в уравнении (2.47) фигурируют две взаимосвязанные искомые величины — средний уровень губы $Z_{\text{ср.кон}}$ и напор на сооружении в конце часового интервала времени $\Delta Z_{\text{кон}}$, — то само уравнение решалось подбором. При этом почти горизонтальный продольный профиль Невской губы, соответствующий уровню $Z_{\text{ср}}$, каждый раз трансформировался с учетом ветровой денивелиации и находился уровень губы в верхнем бьефе защитных сооружений у Кронштадта и уровень р. Невы у Горного института.

Результаты расчета максимального уровня воды у Горного института (см БС) за указанные четыре выдающихся наводнения оказались следующими:

Годы	1824	1924	1777	1955
Наблюденный уровень	421	380	321	293
Не закрылись все отверстия	406	316	300	228
Не закрылось отверстие С-1	310	216	233	142

Как видно, даже в подобной маловероятной ситуации защитные сооружения выполняют свою функцию, сильно понижая максимум. Чем больше интенсивность повышения уровня воды на фазе подъема и слабее ветер, тем значительнее эффект срезки максимума, и наоборот.

Заметим еще, что максимальный уровень в огражденной акватории наступает спустя 2—3 ч после пика уровня Фин-

ского залива в нижнем бьефе защитных сооружений. Максимальный же расход воды через незакрывшееся отверстие С-1 — около 25 000 м³/с, через все незакрывшиеся отверстия — около 50 000 м³/с; средняя в поперечном сечении скорость течения 2–3 м/с.

На первых порах неизбежен какой-то период отладки всей системы оповещения и управления защитным комплексом, в который, как принято проектом, судо- и водопропускные отверстия будут закрываться сразу после получения прогноза об ожидаемом опасном подъеме уровня воды.

3. Сток воды

В настоящей главе, помимо основной темы — стока р. Невы, — рассматривается ряд других вопросов, а именно: приток воды в Ладожское озеро, распределение расхода воды по рукавам и каналам Невской дельты и пр.

3.1. Сток воды р. Невы в естественных условиях

Сток воды р. Невы начал систематически изучаться после 1900 г. За прошедшее время в различных створах реки между истоком и вершиной дельты всего измерено около 900 расходов воды. Ввиду незначительной боковой приточности (1—3 %) все измеренные расходы воды, независимо от местоположения гидрометрического створа, представляют собой однородную совокупность. Поэтому при установлении кривой $Q(Z)$ измеренные расходы воды относятся к наблюдаемым уровням в истоке реки у Петрокрепости, где практически уже не сказывается влияние нагонов и сгонов со стороны Финского залива. Примерно 70 % всех измерений приходится на створ Новосаратовка (27 км от устья) с площадью водосбора $F = 281\,000 \text{ км}^2$.

Несмотря на значительный разброс точек используемая с 1966 г. многолетняя кривая расходов $Q_{\text{Нева}}(Z)$ устойчивая, надежная. Причина разброса точек кроется главным образом в пониженной точности измерения расхода воды у Новосаратовки в условиях неустановившегося режима. Влияет также неучет времени добегающего от Петрокрепости до гидрометрического створа, бокового притока с частного бассейна, сгонно-нагонных колебаний уровня в истоке и пр. Попытка разделить точки на группы в зависимости от уклона водной поверхности, интенсивности изменения уровня и других характеристик неустановившегося режима не дала положительных результатов. Одной из предположительных причин разброса точек могут быть также расчистки русла. Так, в 1902—1908 гг. при создании судоходной прорези (Кошкинского фарватера) через песчано-каменистую отмель в юго-западной части Шлиссельбургской губы на протяжении 7 км было вынуто 1,1 млн. м^3 грунта, что равноценно увеличению площади поперечного сечения губы примерно на 180 м^2 . Ввиду незначительного возрастания площади по-

перечного сечения губы (1—3 %) зависимость между уровнем Ладожского озера и расходом р. Невы не изменилась. В этом нетрудно убедиться, сопоставляя связи средних месячных уровней Валаам — Петрокрепость за периоды 1881—1901 и 1909—1979 гг.

Заметим, что в разное время для подсчета стока р. Невы использовались различные кривые расходов. Но все кривые различаются несущественно (1—4 %), и в имеющиеся многолетние данные по стоку не требуется вводить коррективы.

В целом данные по стоку р. Невы обладают удовлетворительной точностью. Исключения составляют осенний переходный период и начальный период зимы. За отдельные дни и даже декады в эти периоды разница между вычисленным и фактическим расходом может достигать 15—20 %. Низкой точностью обладают также данные по зимнему стоку за те годы, когда расходы не измерялись. Главным образом это относится к ранним годам (1859—1910 гг.).

Средний расход воды р. Невы у Новосаратовки за 122-летний период наблюдений (1859—1980 гг., с учетом восстановленных пропусков за 1941—1943 гг.) составляет 2500 м³/с, чему при площади водосбора 281 000 км² соответствует модуль стока 8,9 л/(с · км²), или слой стока 281 мм/год. Объем годового стока в среднем 78,9 км³.

Указанный период включает серию лет с очень высокой и очень низкой водностью. Самыми многоводными были 1924 и 1879 гг. со средними годовыми расходами соответственно 3670 и 3470 м³/с и модульными коэффициентами $k = 1,46$ и $1,38$, а самыми маловодными — 1940 и 1941 гг. с расходами 1340 и 1470 м³/с и модульными коэффициентами $k = 0,52$ и $0,58$. Наступление такого маловодья, как в 1940 г., было подготовлено довольно длительным предшествующим периодом с низкой водностью (с 1937 г.). В меньшей мере это относится к году с очень большой водностью. Так, самому многоводному 1924 г. предшествовал только один 1923 г. с повышенной водностью ($k = 1,10$).

Режим стока р. Невы отличается высокой степенью зарегулированности как от года к году, так и в особенности внутри года. В частности, между средними годовыми расходами смежных лет коэффициент корреляции $r = 0,57$, тогда как на других равнинных реках обычно $r = 0,15 \pm 0,25$. На наиболее многоводный сезон (май—июль) приходится всего 25—35 % годового стока (обычно 70—80 %). Наконец, на долю месяца с наибольшим в году стоком (как правило, июнь) в среднем приходится 10—11 % годового стока, а на долю месяца с наименьшим стоком (январь—февраль) — 5—6 %. Отношения

Таблица 3.1

Месячные и годовые значения стока (верхняя строка — в м³/с, нижняя — в %) воды р. Невы и притока в Ладожское озеро за характерные годы (1859—1980)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
<p>Сток воды р. Невы у Новосаратовки</p>												
<p>1924 г. — самый многоводный</p>												
2870	2760	2920	3700	4280	4450	4390	4180	3980	3800	3590	3210	3670
6,3	6,3	6,6	8,4	9,7	10,1	10,0	9,5	9,0	8,6	8,2	7,3	100
<p>1927 г. — средний по водности</p>												
1660	1620	2440	2630	2920	3120	3150	3020	2980	2820	2360	1850	2540
5,4	5,3	8,0	8,6	9,6	10,2	10,3	9,9	9,6	9,3	7,7	6,1	100
<p>1940 г. — самый маловодный</p>												
747	770	921	1280	1790	1770	1540	1460	1520	1540	1400	1270	1340
4,6	4,8	5,7	8,0	11,1	11,0	9,6	9,1	9,4	9,6	9,2	7,9	100
<p>Приток воды в Ладожское озеро</p>												
<p>1899 г. — самый многоводный</p>												
3180	3080	2700	5520	6980	5090	3670	3120	3240	3230	3530	2180	3790
7,0	6,7	6,0	12,1	15,3	11,2	8,1	6,8	7,1	7,1	7,8	4,8	100
<p>1946 г. — средний по водности</p>												
1880	1850	1950	3700	5690	3490	2580	2070	1720	1450	1940	1600	2490
6,3	6,2	6,5	12,4	19,0	11,7	8,6	6,9	5,7	4,8	6,6	5,3	100
<p>1940 г. — самый маловодный</p>												
750	1070	1060	1970	1920	1290	1190	1260	1310	1340	1890	1600	1380
4,5	6,4	6,4	11,8	11,5	7,7	7,1	7,6	7,9	8,0	11,4	9,7	100

указанных величин в большинстве лет составляет 1,7–2,0, тогда как на других крупных реках оно равно 30–40. Доля месячного или сезонного стока в годовом стоке практически не зависит от водности года (табл. 3.1).

Чрезвычайно высокая степень зарегулированности режима р. Невы объясняется рядом причин. Главная из них — наличие в бассейне таких крупных озер, как Ладожское, Онежское, Сайма и Ильмень. Имеет также значение большая протяженность бассейна с севера на юг (около 1100 км), влажность климата, значительная роль грунтового питания.

Максимальные годовые расходы воды в Неве, как правило, наблюдаются в начале лета (июнь). В маловодные по весне годы с дождливым летом максимум расхода смещается на летние и даже осенние месяцы (август–октябрь). Минимальные годовые расходы большей частью приходятся на начало зимы, когда замерзает Шлиссельбургская губа, а также вследствие появления ледяного покрова и скоплений шуги из-за чего уменьшается высота слоя воды, переливающейся через песчано-каменистую отмель в истоке реки. В этот период расход воды в Неве уменьшается на 30–50 %.

За имеющийся период наблюдений (1859–1980 гг.) наибольший годовой максимум (4750 м³/с) отмечался в июне 1924 г., а самый низкий минимум при отсутствии льда (1250 м³/с) — в ноябре 1940 г., при наличии льда (540 м³/с) — в январе 1973 г.

Различные характеристики стока р. Невы за многолетний период помещены в табл. 3.2 и 3.3.

Таблица 3.2

Характерные расходы воды р. Невы у Новосаратовки,
1859–1980 гг.

Характерный расход воды	Наименьший		Средний		Наибольший	
	м ³ /с	год	м ³ /с	м ³ /с	год	
Средний годовой	1340	1940	2500	3670	1924	
Максимальный годовой	2050	1940	3400	4750*	1924	
Минимальный в период отсутствия льда	1250	1940	2500	3740	1879	
Минимальный зимний	540	1973	1540	2740	1904	

* Определен по многолетней кривой расходов воды.

Таблица 3.3

Число дней в году со средним суточным расходом ($\text{м}^3/\text{с}$)
 больше указанной величины,
 р. Нева — Новосаратовка, 1859—1941; 1943—1975 гг.

Характеристика	Число дней в году				
	30	90	180	270	355
Средний	3170	3040	2770	2000	1560
Наибольший	4420	4230	3780	3110	2770
Наименьший	2180	1980	1770	1020	611

Из табл. 3.3 видно, что обычно средний годовой расход воды в реке бывает превышен в продолжении 6,5 мес. В очень многоводные годы все 365 дней расход воды в реке больше среднего многолетнего ($2500 \text{ м}^3/\text{с}$). С наступлением маловодного периода случается, что несколько лет подряд расход бывает меньше среднего многолетнего.

Высокая степень зарегулированности водного режима р. Невы может создать впечатление, будто хозяйственная жизнь Ленинграда никоим образом не связана с водностью реки. В действительности эти связи сложные и многообразные, а именно:

— чем значительнее расход воды в Неве, тем выше уровень и, следовательно, больше глубина судового хода. Это очевидное положение относится лишь к лимитирующим участкам реки (Кошкинский фарватер, Ивановские пороги). Но с увеличением расхода воды возрастает и скорость течения (особенно в Ивановских порогах), что создает определенные трудности для судоходства;

— с уменьшением расхода воды ослабевают стоковые течения в Невской губе, расширяются прибрежные застойные зоны. А это ведет к ухудшению санитарного состояния губы и неблагоприятно сказывается на рыбном хозяйстве. С наступлением очень маловодного периода, каким был, например, 1939—1941 гг. резко ухудшается санитарное состояние некоторых малых рукавов невской дельты;

— чем больше расход воды, тем реальнее опасность образования мощного зажора льда на участке Володарский мост —

Понтонная в период замерзания реки. С зажорным подъемом уровня связано подтопление и затопление восточных районов Ленинграда;

— с увеличением расхода воды возрастает количество внутриводного льда и шуги, которые большими массами появляются в реке в начале зимы. Шуга и лед забивают решетки водозаборных сооружений, создавая перебои в водоснабжении;

— в многоводные годы ледяной покров на Неве торосистый, что причиняет неудобство для пешеходов, лыжников и пр.

3.2. Приток воды в Ладожское озеро в естественных условиях

Данные о притоке воды в Ладожское озеро широко используются при составлении различного рода прогнозов водного режима, расчетах баланса химических веществ и др.

Определение средних месячных расходов так называемого полезного притока воды в Ладожское озеро выполнено по уравнению водного баланса в предположении, что площадь водного зеркала озера в пределах наблюдаемой многолетней амплитуды колебания уровня принимается постоянной и равной 17680 км²

$$Q_{\text{пол.пр}} = Q_{\text{ст}} + 67\Delta Z, \quad (3.1)$$

где $Q_{\text{ст}} = Q_{\text{Нева}}$ — средний месячный расход воды р. Невы у Новосаратовки, м³/с; $\Delta Z = Z_{\text{кон}} - Z_{\text{нач}}$ — изменение уровня озера за месяц, см; коэффициент

$$67 = \frac{17680 \cdot 10^6}{30,5 \cdot 86400} \cdot \frac{1}{10^2}$$

имеет размерность м³/(с · см).

Массовые подсчеты притока $Q_{\text{пол.пр}}$ выполнены автором в Северо-Западном УГКС с целью разработки метода прогнозов уровня озера. Главное для правильного вычисления притока — это достоверное значение ΔZ . Поэтому изменение уровня ΔZ определялось как среднее по 5—7 гидрологичес-

ким постам на озере. Предварительно график хода уровня по каждому посту сглаживался для исключения сгонно-нагонных колебаний. Случаи, когда ΔZ по какому-либо посту резко отличалось от других постов, исключались как сомнительные. Средний годовой расход $Q_{\text{пол.пр}}$ вычислялся из средних месячных расходов и дополнительно с целью контроля по уравнению водного баланса озера для года

$$Q_{\text{пол.пр}} = Q_{\text{ст}} + 5,6\Delta Z, \quad (3.2)$$

где $Q_{\text{ст}} = Q_{\text{Нева}}$ — средний годовой расход р. Невы; ΔZ — изменение уровня Ладоги за год.

Некоторые итоговые данные по притоку воды в Ладожское озеро помещены в табл. 3.1 и 3.4. Заметим, что вычисленные значения $Q_{\text{пол.пр}}$ в неявном виде включают в себя испарение с водного зеркала озера, атмосферные осадки, выпадающие на поверхность озера, глубокий подземный приток в озеро и, наконец, сток с частного бассейна р. Невы между истоком и гидрометрическим створом (Новосаратовкой). Впрочем, все перечисленные дополнительные компоненты водного баланса невелики, и главную роль в приходной части баланса (90—95 %) играет сток впадающих рек (Вуоксы, Свири, Олонки, Видлицы и др.), а в расходной части — сток р. Невы. Добавим, что, какие бы изменения водного режима Ладоги не произошли в будущем (например, в случае отъёмов части стока), испарение, осадки и подземный приток останутся прежними, и при балансовых расчетах будут использоваться только данные о полезном притоке в озеро.

В целом данные по притоку в Ладожское озеро обладают удовлетворительной точностью, хотя за отдельные месяцы (главным образом в начале зимы) могут содержать значительные погрешности — до 15—20 %.

Средний многолетний (1859—1980 гг.) расход полезного притока воды в Ладожское озеро так же, как и средний расход р. Невы, равен $2500 \text{ м}^3/\text{с}$. Более детальное представление о структуре водного баланса озера дают данные табл. 3.5.

За последние 120 лет самыми многоводными по полезному притоку оказались 1899 и 1903 гг. со средними годовыми расходами 3790 и $3750 \text{ м}^3/\text{с}$, или модульными коэффициентами $k = 1,51$ и $1,50$. Что касается самого многоводного на р. Неве 1924 г., то в ряду средних годовых расходов полезного притока он занимает третье место. Наиболее маловодным по притоку были 1940 и 1941 гг. с расходами 1380 и

Таблица 3.4

Средние, максимальные и минимальные расходы воды за 1859—1980 гг., м³/с

Характеристика	Среднее	C _v	C _s	Обеспеченность, %									
				0,1	1	5	25	50	75	90	95		
Сток воды р. Невы у Новосаратовки													
Средний годовой	2500	0,17	0,00	3810	3490	3200	2780	2500	2220	1960	1800		
Максимальный годовой	3400	0,15	0,30	5220	4700	4280	3730	3370	3040	2770	2610		
Минимальный годовой	1550	0,30	0,45	3290	2780	2370	1840	1510	1220	980	849		
Минимальный за период, свободный ото льда	2500	—	—	4000	3650	3310	2820	2500	2220	1880	1680		
Минимальный средний месячный	1550	—	—	—	2820	2290	1820	1540	1320	1110	940		
Средний за июль	3050	—	—	—	3900	3650	3250	2950	2600	2300	2100		
Приток воды в Ладожское озеро													
Средний годовой	2500	0,19	0,38	4230	3740	3330	2800	2470	2160	1920	1780		
Средний за период апрель—июнь	3740	~ 0,18	0,54	6350	5570	4940	4160	3680	3260	2920	2750		

Таблица 3.5

Годовой водный баланс Ладожского озера
(средние многолетние значения за 1859—1980 гг.)

Приходные компоненты баланса	км ³ /год		Расходные компоненты баланса	м ³ /с	
	км ³ /год	м ³ /с		км ³ /год	м ³ /с
Атмосферные осадки	8,8	280	Испарение	6,1	190
Поверхностный приток	75,0	2370	Сток р. Невы	78,9	2500
Подземный приток	1,2	40			
Итого	85,0	2690	Итого	85,0	2690

1420 м³/с, или модульными коэффициентами 0,55 и 0,56. Наступление очень многоводного по притоку года, как и очень маловодного, лишь в небольшой мере связано с водностью предшествующего периода. Главным фактором является количество зимних и летне-осенних осадков данного года.

Для режима притока воды в Ладожское озеро, как и для режима стока р. Невы, свойственна большая степень зарегулированности. Так, отношение наибольшего в году месячного притока (обычно май) к наименьшему (февраль) в среднем составляет 2,5—3,0.

При оценке внутригодового распределения притока следует учитывать, что сток трех основных рек, впадающих в озеро, в последние годы искусственно регулируется. Так, на р. Волхов с 1926 г. действует Волховская ГЭС, подпор от которой распространяется до оз. Ильмень. Большую часть времени ГЭС осуществляет недельное и частично сезонное регулирование стока р. Волхова (исключения составляют фаза подъема и пик весеннего половодья, когда ГЭС не регулирует стока). В 1947 г. вступила в строй Тайнионкоская ГЭС в истоке р. Вуоксы, которая превратила оз. Сайма в водохранилище многолетнего регулирования. Наконец, с сооружением Верхне-Свирской ГЭС (1953 г.) начало осуществляться неполное годичное регулирование стока р. Свирь. В результате совокупного действия трех упомянутых ГЭС режим притока воды в Ладожское озеро претерпел некоторые

изменения в сторону еще большего выравнивания. В наибольшей мере это коснулось маловодных лет и в наименьшей мере многоводных (а, точнее, лет соответственно с низким и высоким стоянием уровней озер Онежского и Сайма). Несмотря на происшедшие изменения, с приемлемой для практических целей точностью можно полагать, что имеющиеся данные по полезному притоку в Ладожское озеро в целом однородные.

Как было показано, уравнение водного баланса Ладожского озера для месяца упрощенно выглядит так:

$$Q_{\text{пол.пр}} = Q_{\text{ст}} + 67\Delta Z,$$

где, напомним, изменение уровня озера за месяц (см)

$$\Delta Z = Z_{\text{кон}} - Z_{\text{нач}},$$

а $Q_{\text{пол.пр}}$ и $Q_{\text{ст}} = Q_{\text{Нева}}$ — соответственно месячные значения полезного притока в озеро и стока из озера ($\text{м}^3/\text{с}$). Кривая расходов $Q_{\text{ст}}(Z)$ (точнее, связь между уровнем Ладоги и расходом р. Невы (рис. 3.1) имеет малую кривизну). В пределах наблюдаемых месячных колебаний уровня озера ее можно считать прямой, и определять средний месячный расход воды по среднему месячному уровню

$$Q_{\text{ст}} \left(\frac{Z_{\text{нач}} + Z_{\text{кон}}}{2} \right) = Q_{\text{ст}}(Z_{\text{нач}} + 0,5\Delta Z). \quad (3.3)$$

Подставляя (3.3) в (3.1), получим

$$Q_{\text{пол.пр}} = Q_{\text{ст}}(Z_{\text{нач}} + 0,5\Delta Z) + 67\Delta Z. \quad (3.4)$$

Решение уравнения (3.4) методом конечных разностей при фиксированных значениях $Q_{\text{пол.пр}}$, равных 0, 500, 1000, ..., 7500 $\text{м}^3/\text{с}$, приводит к зависимости

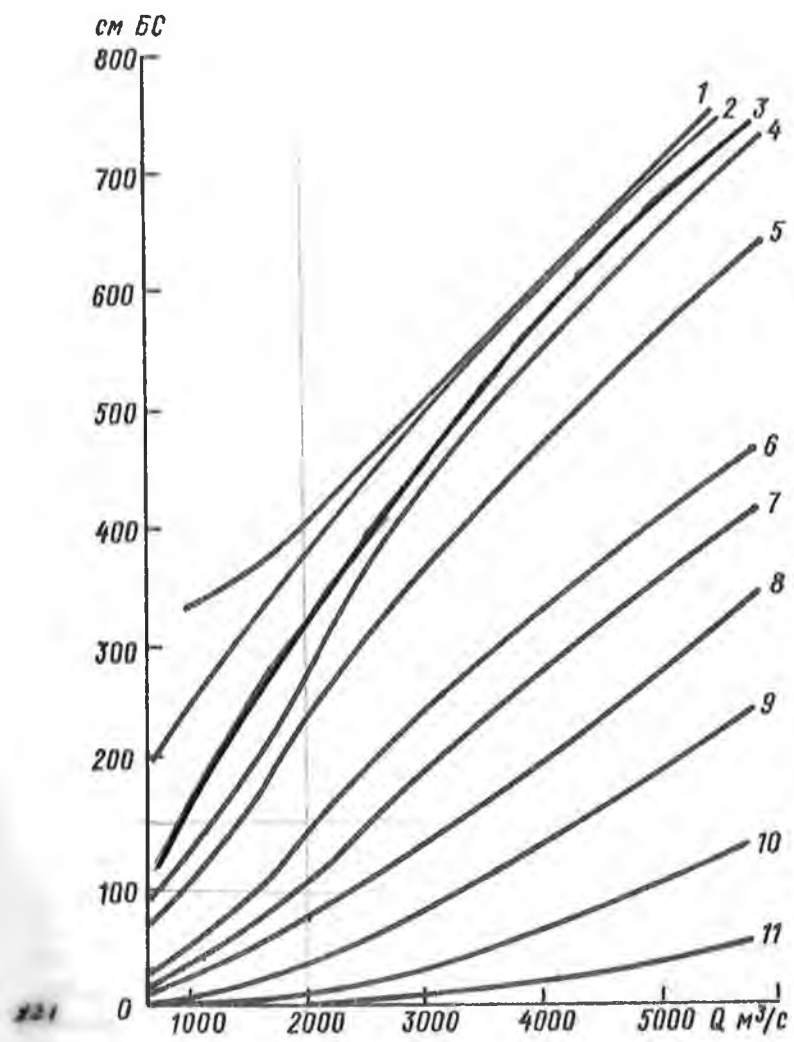


Рис. 3.1. Кривые расходов воды р. Невы.

1 — Сясьские Рядки, 2 — Пески, 3 — Петрокрепость, 4 — Черная речка, 5 — Островки, 6 — Ивановское, 7 — Саперная, 8 — Усть-Ижора, 9 — Новосаратовка, 10 — ф-ка Ногина, 11 — Горный институт.

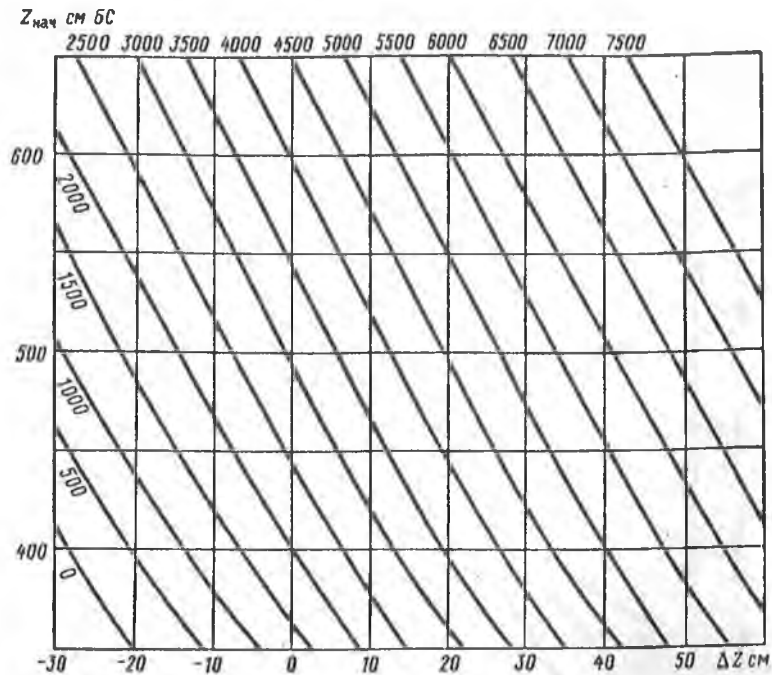


Рис. 3.2. Ладожское озеро. График зависимости $\Delta Z = f(Z_{\text{нач}}, Q_{\text{пол.пр}})$ для месячного интервала времени в период, свободный ото льда.
У линий — $Q_{\text{пол. пр}}$ в $\text{м}^3/\text{с}$.

$$\Delta Z = f(Z_{\text{нач}}, Q_{\text{пол.пр}}), \quad (3.5)$$

график которой для периода открытого русла представлен на рис. 3.2. Аналогичная зависимость была построена автором еще в 1952 г. и с тех пор применяется Северо-Западным УГКС для прогнозов хода уровня Ладожского озера. Указанная зависимость может быть также использована при расчете хода уровня озера в случае отъемов стока и отказа от строительства неевского регулирующего гидроузла.

В период закрытого русла соотношение между уровнем Ладожского озера и расходом р. Невы неоднозначное. Это не дает возможность представить уравнение (3.4) в виде одного графика. Если ввести переходный коэффициент $K_{\text{зим}} =$

$= Q_{\text{зим}}/Q_{\text{св}}$, то уравнение запишется следующим образом:

$$Q_{\text{пол.пр}} = K_{\text{зим}} Q_{\text{ст}} (Z_{\text{нач}} + 0,5\Delta Z) + 67\Delta Z \quad (3.6)$$

или, решая относительно изменения уровня

$$\Delta Z = \frac{Q_{\text{пол.пр}} - K_{\text{зим}} Q_{\text{ст}} (Z_{\text{нач}} + 0,5\Delta Z)}{67} \quad (3.7)$$

Уравнение (3.7) решается подбором после нескольких подстановок ΔZ .

Легко видеть: чтобы воспользоваться номограммой зависимости (3.4) (см. рис. 3.2), необходимо знать наперед расход $Q_{\text{пол.пр}}$ (заимствуется из прогноза или из материалов водохозяйственных расчетов). Чтобы воспользоваться выражением (3.7), необходимо, кроме того, знать коэффициент $K_{\text{зим}}$. Заметим, что попытка обобщать данные о коэффициентах $K_{\text{зим}}$ не привела к положительным результатам. Связь между коэффициентом $K_{\text{зим}}$ и обуславливающими факторами (уклоном водной поверхности в истоке реки, температурой воздуха, зазорным подъемом уровня на участке з-д „Большевик” — Ивановское и пр.) не выявляется. Ниже в виде справки приводятся:

— средние и крайние значения коэффициентов $K_{\text{зим}}$ за период 1901—1980 гг. Коэффициенты $K_{\text{зим}}$ установлены путем деления среднего месячного расхода р. Невы, заимствованного из гидрологического ежегодника, на расход, определенный по среднему месячному уровню Ладожского озера у с. Сясьские Рядки (рис. 3.1):

	XI	XII	I	II	III	IV
Наименьший . . .	0,71	0,52	0,47	0,48	0,53	0,71
Средний	0,95	0,77	0,64	0,63	0,69	0,89
Наибольший . . .	1,00	1,00	0,94	0,81	1,00	1,00

— типовой график хода коэффициентов $K_{\text{зим}}$ в случае, если кривая расходов р. Невы отнесена к уровню Ладожского озера у с. Сясьские Рядки (рис. 3.3). В переходные периоды коэффициент $K_{\text{зим}}$ на рис. 3.3 регламентируется в зависимости от ледовой обстановки на реке. Поскольку Нева

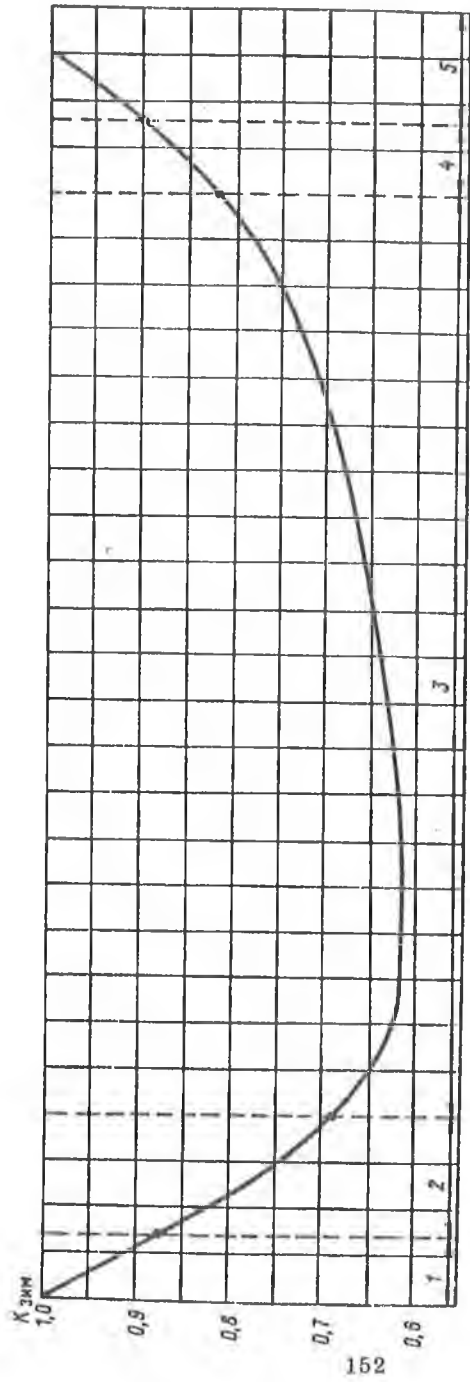


Рис. 3.3. Типовой ход коэффициента $K_{зим} = Q_{зим} / Q_{ст}$ при подсчете стока р. Невы по кривой $Q_{ст}(Z)$, отнесенной к уровню Ладожского озера у с. Сясьские Радки.

Ледовые фазы р. Невы у Петрокрепости: 1 — в период от начала ледохода у Петрокрепости до начала ледостава у з-да "Большевик", 2 — в период замерзания на участке з-д "Большевик" — Петрокрепость, 3 — в период вскрытия на участке Петрокрепость — Павлово, 4 — в период от начала вскрытия на участке Павлово — ф-ка Ногина до окончания густого озерного ледохода у Петрокрепости, 5 — в период среднего ледохода у Петрокрепости.

замерзает снизу вверх по течению и процесс замерзания сопровождается зазорами льда, то исток реки задолго до установления здесь ледяного покрова оказывается в подпоре. Намного раньше истока замерзают также мелководные участки Шлиссельбургской губы. Всем этим объясняется, почему коэффициент $K_{зим}$ резко уменьшается уже с появлением ледяного покрова на нижнем участке реки (ф-ка Ногина—з-д "Большевик"). Весной имеет место обратная картина. Нева вскрывается сверху вниз по течению. Живое сечение Шлиссельбургской губы на отмели перед истоком реки остается преуменьшенным из-за наличия здесь ледяного покрова, хотя в истоке реки уже произошло вскрытие.

3.3. Распределение расхода воды р. Невы по рукавам и каналам дельты

Вопросом о расходах воды в рукавах и каналах невской дельты занимались многие авторы. Наиболее обстоятельное исследование выполнила Г. В. Ардашева /4/, основное достоинство работы которой состоит в применении более обобщенной методики обобщения натуральных материалов, а именно:

— использовались все измеренные расходы воды — как синхронные в нескольких рукавах, так и одиночные. Независимо от места измерения расходы объединялись в группы и относились к какому-либо одному гидрометрическому створу. Обычно это был створ с наибольшим числом измерений или же створ в верхней части бесприточного участка;

— устанавливалась графическая зависимость расхода воды в рукаве или в канале от уровня у Петрокрепости, а не от расхода р. Невы выше дельты. Этим самым исключалась ошибка измерения общего расхода реки, которая по ряду причин весьма существенная;

— средние линии на графиках связи $Q(Z)$ проводились так, чтобы обеспечить увязку водного баланса, — например, чтобы сумма расходов Большой Невки и Малой Невки была равна расходу в истоке Большой Невки.

Полученные Г. В. Ардашевой выводы по основным рукавам невской дельты были в последующем уточнены и дополнены по ряду других водотоков Р. А. Нежиховским.

Средние многолетние расходы воды по нескольким десяткам рек и каналов невской дельты и их притокам помещены в табл. 3.6.

Из табл. 3.6 видно, что расход воды в Неве распределяется между основными рукавами дельты следующим образом.

Таблица 3.6

Средние многолетние расходы воды

Водоток (пункт)	Расход воды, м ³ /с
Водотоки системы р. Невы и Обводного канала	
р. Нева (Новосаратовка)	2500
Обводный канал (в истоке)	15,0
Водотоки системы рек Большой Невы и Малой Невы	
р. Большая Нева (мост Лейтенанта Шмидта)	1500
р. Малая Нева (Тучков мост)	475
р. Смоленка (исток)	3,0
р. Ждановка (исток)	14,0
Водотоки системы р. Большой Невки	
р. Большая Невка (исток)	475
р. Большая Невка (после отделения Малой Невки)	245
р. Большая Невка (после отделения р. Средней Невки)	63
р. Малая Невка (между реками Ждановкой и Карповкой)	224
р. Малая Невка (ниже впадения р. Ждановки)	239
р. Средняя Невка (исток)	144
р. Средняя Невка (ниже впадения р. Крестовки)	188
р. Карповка (исток)	2,0
р. Крестовка (исток)	10,0
Водотоки системы р. Фонтанки	
р. Фонтанка (исток)	34,0
р. Фонтанка (после отделения р. Мойки)	24,0
р. Фонтанка (выше Крюкова канала)	23,0
р. Фонтанка (между Крюковым каналом и кан. Грибоедова)	22,0
р. Мойка (между Лебяжьим каналом и кан. Грибоедова)	12,0
р. Мойка (между Ново-Адмиралтейским каналом и р. Пряжкой)	11,3
кан. Грибоедова (выше Крюкова канала)	3,1
кан. Грибоедова (ниже Крюкова канала)	3,4
Лебяжий канал (в устье)	1,4
Зимняя канавка (в устье)	2,0
Ново-Адмиралтейский канал (в устье)	1,0
Крюков канал (между р. Фонтанкой и кан. Грибоедова)	1,0
р. Пряжка (в устье)	4,0
кан. Круштейна (в истоке)	0,05
Водотоки системы р. Екатерингофки и Морского канала	
р. Екатерингофка (выше Обводного канала)	15,0
р. Екатерингофка (ниже Обводного канала)	30,0

Продолжение табл. 3.6

Водоток (пункт)	Расход воды, м ³ /с
Морской канал (выше Золотых ворот)	425
Реки, впадающие в Неву и Невскую губу, и их притоки	
р. Славянка (в устье)	1,8
р. Кузьминка (в устье)	0,9
р. Мурзинка (в устье)	0,2
руч. Утка (в устье)	0,1
р. Охта (Новое Девяткино)	3,0
р. Охта (устье)	7,2
р. Лубья (в устье)	1,6
Черная речка (в устье)	0,1
р. Волковка (проспект Славы)	0,5
Лиговский канал (ст. Дачное)	1,2
р. Каменка (исток)	0,3
р. Дудергофка (Красное село)	0,5
р. Оккервиль (Веселый поселок)	0,5

До стрелки Васильевского острова влево, в Обводный канал и Фонтанку, направляется 2 % воды, а вправо, в Большую Невку, — 19 %. Остальная вода распределяется между Большой Невой (60 %) и Малой Невой (19 %). Поток воды, направляющийся в Большую Невку, впоследствии делится на три потока — Малую Невку (8,9 %), Среднюю Невку (7,5 %) и Большую Невку (2,6 %). Таким образом, Большая Невка, отделив от себя Малую и Среднюю Невку, становится наименьшей из трех Невок.

Водный поток, выйдя из рукавов невской дельты, разделяется поначалу по фарватерам взморья так: Елагинский 10 %, Петровский 29 %, Галерный 11 %, Корабельный 26 %, Гребной 5 %, пролив между островами Белый и Канонерский 2 %, Морской канал выше Золотых ворот 17 %. В последующем около 1—2 % воды (30—50 м³/с) направляется из Морского канала через Золотые ворота к югу, омывая застойный юго-восточный угол губы. При подходе к о. Котлину 60 % воды идет в Северные ворота и 40 % — в Южные. В свою очередь, в Южных воротах основной поток (36 %) устремляется по узкой и глубокой ложбине, тянущейся вдоль

Морского канала, и лишь 4 % воды переливается через гребень Ломоносовской отмели.

Вообще говоря, распределение невской воды по рукавам дельты и фарватерам взморья не остается постоянным и зависит от многих причин: расхода и уровня воды в самой Неве, толщины ледяного покрова и пр., а главное от силы и направления ветра. Однако влияние этих причин сравнительно невелико и с приемлемой для практических целей точностью с ними можно не считаться, — по крайней мере для главных рукавов дельты в диапазоне уровня от —50 до 100 см БС и скорости ветра от 0 до 12 м/с. Что касается малых водотоков дельты, то здесь положение несколько иное. Замечено, что при значительных нагонах воды, сопровождающихся западным ветром, в них уменьшаются расходы воды, более того, возникает обратное течение, и вода перетекает из малых рукавов в большие. Впрочем, вопрос этот пока изучен недостаточно.

Важной дополнительной характеристикой водного режима могут служить данные о максимальных расходах воды в Северных и Южных воротах, которые наблюдаются при больших нагонах. Для оценки максимальных расходов воспользуемся уравнением водного баланса Невской губы за часовой интервал времени:

$$Q_{\text{Нева}} = Q_{\text{С.Ю.вор}} + \frac{W_{\text{кон}} - W_{\text{нач}}}{3600}, \quad (3.8)$$

где $Q_{\text{Нева}}$ — средний часовой расход воды ($\text{м}^3/\text{с}$) р. Невы в створе, находящемся вне пределов подпора от губы (т. е. у Новосаратовки); $Q_{\text{С.Ю.вор}}$ — результирующий средний часовой расход ($\text{м}^3/\text{с}$), или алгебраическая сумма двух разнонаправленных расходов в створе Северных и Южных ворот, — если направление течения с востока на запад (из губы в залив) считать за положительное, а с запада на восток (из залива в губу) за отрицательное; $W_{\text{нач}}$ и $W_{\text{кон}}$ — объем воды (м^3) в Невской губе и в р. Неве между указанными створами в начале и конце часового интервала времени. В уравнении (3.8) не фигурируют: боковой приток с частного бассейна, испарение с водной поверхности и атмосферные осадки, которые, за редким исключением, весьма малы. В пределах наблюдаемого обычно диапазона колебания уровня площадь водного зеркала Невской губы и р. Невы Ω прак-

тически постоянная, поэтому уравнение (3.8) принимает вид:

$$Q_{\text{Нева}} = Q_{\text{С.Ю.вор}} + \frac{\omega \Delta Z}{3600}, \quad (3.9)$$

где изменение среднего уровня губы приравнено полусумме изменений уровня в двух пунктах наблюдений за уровнем воды — Кронштадт и Невская устьевая станция. Площадь водного зеркала Невской губы к востоку от защитных сооружений и нижнего участка р. Невы в пределах подпора при уровне, близком к ординату, равна 396 км^2 . Таким образом,

$$Q_{\text{Нева}} = Q_{\text{С.Ю.вор}} + \frac{396 \cdot 10^6 \Delta Z}{3600 \cdot 10^2},$$

$$\text{т. е. } Q_{\text{С.Ю.вор}} = Q_{\text{Нева}} - 1100 \Delta Z, \quad (3.10)$$

где $Q_{\text{Нева}}$ и $Q_{\text{С.Ю.вор}}$ в $\text{м}^3/\text{с}$, ΔZ — в см/ч . Средняя скорость течения (м/с) в граничном (замыкающем) створе губы равна

$$v_{\text{С.Ю.вор}} = \frac{Q_{\text{Нева}} - 1100 \Delta Z}{\omega_{\text{С.Ю.вор}}(Z)}. \quad (3.11)$$

Здесь Z — уровень в середине часового интервала времени, а $\omega_{\text{С.Ю.вор}}(Z)$ — площадь поперечного сечения в створе как функция уровня в этом же створе. Рассмотрим 1,5–2,0-километровую полосу Северных и Южных ворот, ограниченную с запада створом защитных сооружений, а с востока так называемым лимитирующим сечением, проходящую по гребню Ломоносовской отмели и далее через восточную оконечность о. Котлин к мысу Лисий Нос. Координаты кривой площадей для типового поперечного сечения в пределах указанной полосы таковы:

Z см БС	-100	0	100	200	300
$\omega_{\text{С.Ю.вор}}$ м^2	30 000	44 900	59 000	74 500	89 800

Уравнение же кривой $\omega_{С.Ю.вор} (Z)$ —

$$\omega_{С.Ю.вор} = 150Z + 45\,000. \quad (3.12)$$

Следовательно,

$$v_{С.Ю.вор} = \frac{Q_{Нева} - 1100\Delta Z}{150(Z_{нач} + 0,5\Delta Z) + 45000}. \quad (3.13)$$

Используя уравнение (3.10) и (3.13), определены максимальные средние часовые расходы воды и соответствующие им скорости течения в упомянутом граничном створе за все случаи наводнений (1879—1980 гг.) с максимальным уровнем более 160 см БС у Горного института. По полученным данным построены кривые обеспеченности отдельно для фазы подъема и спада уровня (табл. 3.7).

Таблица 3.7

Максимальный расход воды и скорость течения
в Северных и Южных воротах Невской губы
при наводнениях с уровнем $Z_{\max \text{ Гор.ин-т}} > 160$ см БС

Характеристика	Обеспеченность, %			
	1	5	20	50
Фаза подъема уровня				
Максимальный средний часовой расход, воды $\text{м}^3/\text{с}$	105000	58000	39100	21700
Максимальная средняя часовая скорость течения, $\text{м}/\text{с}$	1,30	0,98	0,67	0,48
Фаза спада уровня				
Максимальный средний часовой расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$	79500	52000	34000	19000
Максимальная средняя часовая скорость течения, $\text{м}/\text{с}$	1,15	0,88	0,57	0,35

Как видно из табл. 3.7, во время больших нагонов через Северные и Южные ворота из Финского залива в Невскую губу и обратно перемещаются весьма значительные массы воды с расходом, который в десятки раз превышает расход р. Невы. Скорость течения при этом иногда близка к скорости, характерной для полугорных рек. Добавим еще, что поскольку уже при интенсивности изменения среднего уровня $\Delta Z \approx 8 \div 10$ см/ч поток в воротах становится однонаправленным, то приведенные в табл. 3.7 расходы и скорости на фазе подъема относятся к восточному направлению течения (из залива в губу), а на фазе спада — к западному направлению (из губы в залив).

3.4. Вопросы гидрологического обоснования проблемы отъемов части речного стока из Невского бассейна

Строительство комплекса защитных сооружений не имеет никакого отношения к режиму стока р. Невы и распределению неврской воды по рукавам дельты. Влияние агромероприятий в бассейне (вырубки и посадки лесов, осушение болот и т. д.) пренебрежимо мало. Режим стока р. Невы может измениться лишь при реализации в отдаленном будущем мероприятий по территориальному перераспределению речного стока.

Отъемы части речного стока из неврского бассейна с подачей его на волжский склон возможно осуществить по трассе Волго-Балтийского водного пути им. Ленина (сокращенно Волго-Балт). Вода забирается из Онежского озера и пятью мощными насосными установками, расположенными на р. Вытегре, поднимается на высоту 80 м (с отметки 33 до отметки 113 м БС). Далее вода самотеком попадает в водораздельный канал, р. Ковжу, Белое озеро, р. Шексну и, наконец, в Рыбинское водохранилище.

Научными и проектными организациями рассмотрены два возможных варианта отъемов стока в размере 3,5 и 7,5 км³/год. При отъеме 3,5 км³/год к существующим гидроузлам на р. Вытегре пристраиваются насосы мощностью 150 м³/с. При отъеме 7,5 км³/год Волго-Балт реконструируется, а производительность насосов доводится до 375 м³/с, кроме того, в истоке р. Невы возводится регулирующий гидроузел.

Подчеркнем здесь весьма важное обстоятельство. Судьба отъемов стока из неврского бассейна предопределяется гидро-

биологическими условиями (прежде всего, степенью трофности Ладожского озера), но отнюдь не гидрологическим режимом. Тем не менее данные о возможных изменениях гидрологического режима будут всегда служить основой для гидробиологических прогнозов.

При указанных отъемах стока не произойдет изменения площадей водного зеркала Онежского и Ладожского озер. Сохранится термический и ледовый режим озер. Поэтому средний многолетний сток р. Невы сократится в точности на среднюю величину отъема, а именно:

Отъемы стока, км ³ /год	0	3,5	7,5
Сток р. Невы, км ³ /год.	78,9	75,4	71,8
м ³ /с	2500	2390	2280

С отъемом части речного стока уменьшится поступление воды в Ладожское озеро. Без неевского гидроузла это приведет к понижению среднего многолетнего уровня озера, именно:

Отъемы стока, км ³ /год	0	3,5	7,5
Уровень, см БС	484	472	458

Цифры эти установлены по связи среднего годового расхода р. Невы со средним годовым уровнем Ладожского озера (связь не приводится). Понижение уровня Ладоги неблагоприятно скажется на народном хозяйстве (главным образом судоходстве), которое за сотни лет приспособилось к естественному режиму и диапазону колебания уровня. В некоторой мере это относится и к верхней части р. Невы.

При оценке допустимых отъемов стока будем исходить из того, что на р. Неве, как и в целом на Волго-Балте, гарантированная (на 95 %) судоходная глубина (4 м) и ширина (85—90 м) отнесены к следующим проектным уровням:

Ладожское озеро — Сясьские Рядки	410 см БС
р. Нева — Петрокрепость	315 см БС
р. Нева — Ивановское	150 см БС,

чему соответствует расход воды в Неве около 2000 м³/с. За шестимесячный навигационный период (май—октябрь) суммарный сток составит

$$\frac{2000 \cdot 6 \cdot 30,5 \cdot 86400}{10^9} = 31,6 \text{ км}^3.$$

Таковы требования судоходства. С точки зрения санитарии необходимо, чтобы расход воды в зимний период маловодного года 95 %-ной обеспеченности не был меньше наблюдаемого ($1200 \text{ м}^3/\text{с}$), чему за шестимесячный зимний период соответствует объем стока

$$\frac{1200 \cdot 6 \cdot 30,5 \cdot 86400}{10^9} = 18,9 \text{ км}^3.$$

Суммарный же потребный годовой сток будет равен $31,6 + 18,9 = 50,5 \text{ км}^3/\text{год}$. Таким образом, в средний по водности год избыток водных ресурсов составляет $78,9 - 50,5 = 28,4 \text{ км}^3/\text{год}$, что во много раз превосходит намечаемые отъемы стока.

Очевидно, что с наступлением маловодья и минимальный навигационный расход воды в летне-осенний период ($2000 \text{ м}^3/\text{с}$), и минимальный санитарный расход в зимний период ($1200 \text{ м}^3/\text{с}$) могут быть гарантированы либо путем полного прекращения отъемов стока, либо путем многолетнего регулирования. Последний путь предпочтителен. Очевидно и то, что принятое выше условие о поддержании минимального санитарного расхода в зимний период не исчерпывает вопроса об экологических последствиях рассмотрения вариантов отъемов стока. Дело в том, что по мере возрастания биогенной нагрузки будет расти степень трофности Ладожского озера и Невской губы. Как это повлияет на качество воды и условия обитания гидробионтов — пока неясно!

Вообще-то, наличие значительных регулирующих емкостей в Ладожском и Онежском озерах позволяет выбрать любой режим отъемов стока и в то же время осуществить глубокое многолетнее регулирование режима стока рек Свири и Невы. Но для этого потребовалось бы значительно повысить уровни Ладожского и Онежского озер, точнее, увеличить многолетнюю амплитуду колебания их уровней, что по условиям затопления прибрежной территории недопустимо.

С учетом всего изложенного правилами регулирования стока предусматривается (Союзгипроводхоз, Ленгидропроект, ГГИ):

— поддержание уровня режима Ладожского и Онежского озер по диапазону и продолжительности близким к естественному. В частности, сработка Ладожского озера в период, свободный ото льда, ограничивается отметкой 380 см

БС, а в зимний период — 356 см БС (в естественных условиях соответственно 373 и 348 см БС);

— сохранение таким же, как в естественных условиях, годового стока р. Невы обеспеченностью $P \geq 95\%$;

— поддержание (с гарантией 95 %) в период открытого русла минимального навигационного расхода р. Невы ($2000 \text{ м}^3/\text{с}$), а в зимний период санитарного расхода ($1200 \text{ м}^3/\text{с}$);

— некоторое уменьшение стока р. Свири при высоком уровне Ладожского озера (если это не грозит затоплением побережья Онежского озера).

Водохозяйственные расчеты с соблюдением указанных правил пока что выполнены весьма упрощенно, в предположении, что насосные установки на р. Вытегре работают с такими расходами ($\text{м}^3/\text{с}$):

Месяцы	V—X	IV, XI	XII—III
Отъемы $3,5 \text{ км}^3/\text{год}$	150	110	50
Отъемы $7,5 \text{ км}^3/\text{год}$	375	200	50

(кроме маловодных лет, когда отъемы сокращаются).

Несмотря на эти и другие упрощения, уже сейчас можно составить довольно ясное представление об ожидаемых изменениях водного режима Ладожского озера и р. Невы при реализации мероприятий по отъемам речного стока.

Очевидно, что приток воды в Ладожское озеро уменьшится на столько же, насколько сократится сток р. Свири. В частности, при отъемах $7,5 \text{ км}^3/\text{год}$ приточный расход в озеро уменьшится на $200\text{--}250 \text{ м}^3/\text{с}$. Само по себе это не может привести к перестройке системы течений. Как известно, в период, свободный ото льда, в озере преобладает циклоническая система течений против хода часовой стрелки. Причины существования подобной системы течений следующие: а) преобладание западных и юго-западных ветров; б) различие плотности воды в прибрежной мелководной и центральной глубоководной частях озера (из-за неодинаковой температуры воды); в) впадение крупных притоков (Волхова, Свири, Вуоксы). Указанными течениями охватывается поверхностный слой воды толщиной $25\text{--}50 \text{ м}$ и скоростью течения $2\text{--}4 \text{ см}/\text{с}$. Примем толщину слоя 35 м , скорость течения $3 \text{ см}/\text{с}$, радиус озера 75 км , и тогда окажется, что в обороте находится расход воды около $80\,000 \text{ м}^3/\text{с}$. Ожидаемое уменьшение количества движения, сообщаемое водной массе озера потоком свирской воды, ничтожно мало — около $0,5\%$.

Для судоходства и других отраслей народного хозяйства важным является вопрос об уровне режиме Ладожского озера. В новых условиях режим уровня озера по амплитуде и продолжительности будет близким к естественному. Все же произойдут некоторые изменения, а именно:

— максимальный годовой уровень озера в диапазоне обеспеченности $20\% < P < 80\%$ повысится на 10–20 см. Максимум редкой повторяемости сохранится прежним;

— минимальный годовой уровень озера в диапазоне обеспеченности $20\% < P < 80\%$ повысится на 10–25 см, в остальном диапазоне — на 5–10 см;

— уровень озера в целом будет менее изменчивым, чем в настоящее время.

Отъемы стока в сочетании с регулированием стока существенно повлияют на водный режим р. Невы. Согласно принятой схеме регулирования в годы с обеспеченностью $P \geq 95\%$, объем годового стока останется почти без изменения. Сравнительно мало сократится сток и в очень многоводные годы (на 5–10%). Наиболее значительное уменьшение стока (на 20–25%) произойдет в годы со средней водностью. Что же касается лет с экстремальной водностью (самого маловодного водохозяйственного 1940–41 г., самого многоводного 1924–25 г.), то здесь положение такое ($\text{км}^3/\text{год}$):

Отъемы стока, $\text{км}^3/\text{год}$	1940–41 г.	1924–25 г.
0	42,3	116
7,5	54,5	98,8

Перераспределение стока р. Невы внутри года в дополнение с многолетним регулированием имеет своим главным следствием увеличение минимального среднего месячного расхода воды 95%-ной обеспеченности с $940 \text{ м}^3/\text{с}$ в естественных условиях до $1300 \text{ м}^3/\text{с}$ при отъемах $7,5 \text{ км}^3/\text{год}$. В экологическом отношении это имеет весьма существенное положительное значение.

Дополнительные данные о водном режиме Ладожского озера и р. Невы в естественных и измененных условиях (отъемы 0 и $7,5 \text{ км}^3/\text{год}$) помещены в табл. 3.8 и на рис. 3.4 и 3.5. Заметим, что кривые обеспеченности той или иной характеристики режима не всегда построены по одинаковому

Таблица 3.8

**Координаты кривых обеспеченностей различных характеристик
водного режима Ладожского озера и р. Невы**

Отъемы стока, км ³ /год	Обеспеченность, %				
	10	25	50	75	95
Максимальный средний месячный уровень воды Ладожского озера, см БС					
0	570	535	500	460	410
7,5	578	545	515	480	430
Минимальный средний месячный уровень воды Ладожского озера, см БС					
0	490	465	435	395	355
7,5	497	475	450	425	365
Годовой сток р. Невы у Новосаратовки, км³/год					
0	95,9	87,6	78,9	69,9	56,7
7,5	94,5	76,5	67,8	60,0	50,4
Максимальный средний месячный расход воды р. Невы у Новосаратовки, м³/с					
0	3700	3400	3100	2700	2250
7,5	3300	2860	2520	2300	2120
Минимальный средний месячный расход воды р. Невы у Новосаратовки, м³/с					
0	2120	1820	1540	1320	940
7,5	2000	1730	1450	1300	1300
Средний месячный расход воды р. Невы у Новосаратовки за июль, м³/с					
0	3500	3250	2950	2600	2100
7,5	3400	2850	2550	2250	2150

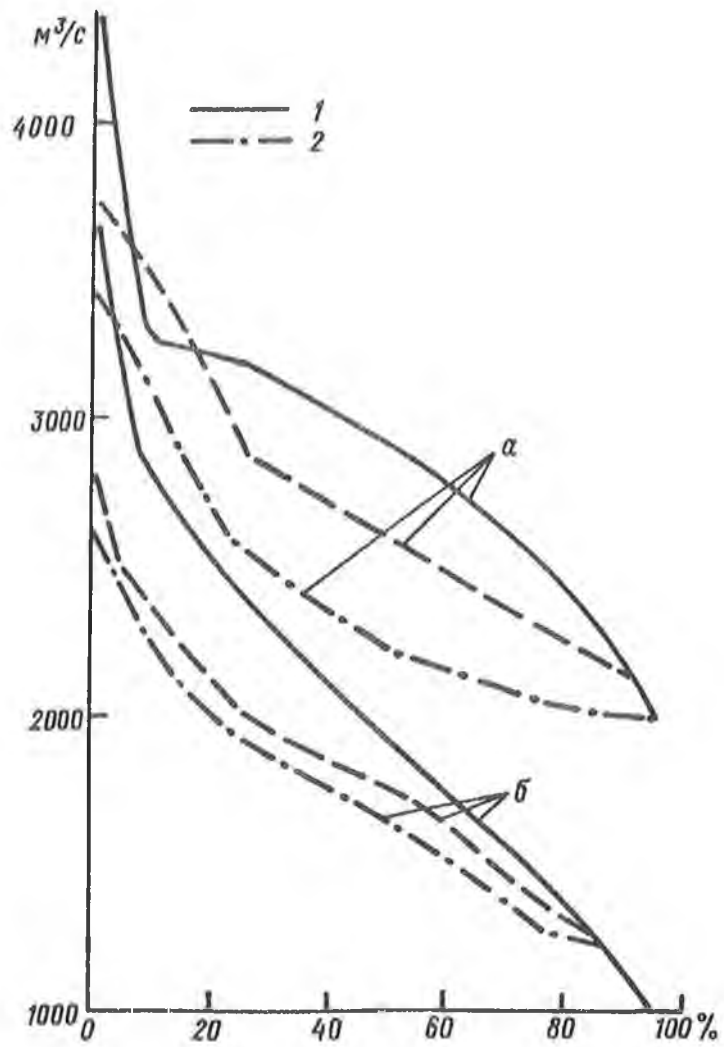


Рис. 3.4. Кривые продолжительности средних месячных расходов воды р. Невы у Новосаратовки в естественных условиях (1) и при отъемах стока $7,5 \text{ км}^3/\text{год}$ (2) и $3,5 \text{ км}^3/\text{год}$ (3), 1914 — 1978 гг.
 а — период открытого русла (апрель—октябрь), б — зимний период (ноябрь—март).

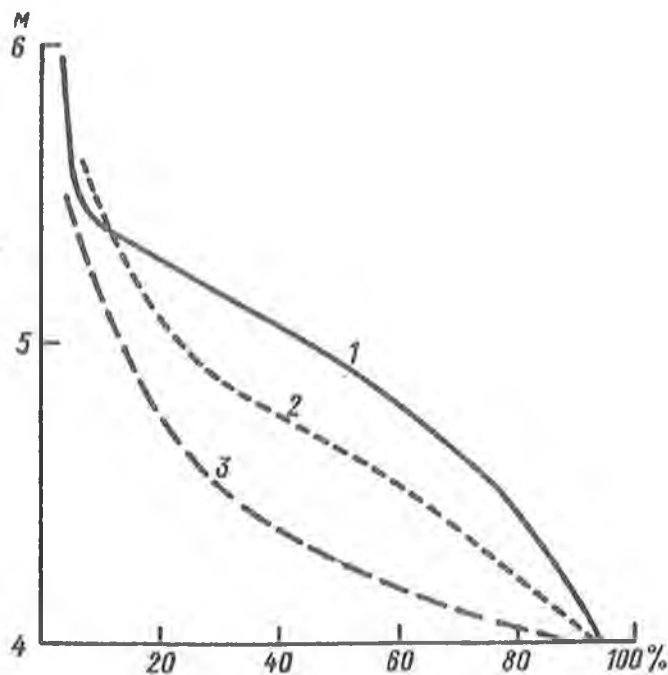


Рис. 3.5. Кривые продолжительности минимальных глубин в навигационный период на лимитирующем участке р. Невы (в Ивановских порогах, 1914—1974 гг.) в естественных условиях (1) и при отъемах стока $3,5 \text{ км}^3/\text{год}$ (2) и $7,5 \text{ км}^3/\text{год}$ (3).

периоду наблюдений. Тем не менее для начального этапа проработок данные табл. 3.8 можно считать сравнимыми.

Вкратце об ожидаемом изменении уровня режима р. Невы в случае отъемов части стока.

Разумеется, с отъемами части речного стока понизятся уровни воды по всей Неве от регулирующего сооружения до устья. Исключение составляет период навигации в очень маловодные годы, когда $Q_{\text{Нева}} \leq 2000 \text{ м}^3/\text{с}$. В этот период водность реки сохраняется прежней. С понижением уровня воды уменьшаются и судоходные глубины. Воспользовавшись "елочкой" кривых расходов (см. рис. 3.1) с учетом средних месячных расходов в естественных и проектных условиях из табл. 3.8, нетрудно установить, как именно понизятся уровни. Более всего в навигационный период упадут уровни в нижнем бьефе регулирующего гидроузла (на $0,4\text{--}0,6 \text{ м}$). По мере продвижения вниз по реке различие между уровнями в

естественных и измененных условиях быстро уменьшается и вблизи устья становится едва заметным. В целом несущественно уменьшаются и судоходные глубины на реке (самое большое в верхней части реки на 0,3—0,6 м при преобладающей глубине 6—9 м). На Ивановских же порогах (т. е. на лимитирующем участке реки) около половины всего навигационного времени ($25\% < P < 75\%$) минимальная глубина составит:

Отъемы стока, км ³ /год	0	7,5
Глубина, м	5,0—5,7	4,8—5,5

Несколько слов о гидрологическом обосновании неевского регулирующего гидроузла, если в отдаленном будущем будет принято решение о его строительстве.

При низком уровне Ладожского озера (350—380 см БС) расход воды в Неве составляет 1300—1800 м³/с, что меньше гарантированного судоходного попуска (2000 м³/с) на 200—700 м³/с. В начале зимы расход воды при указанном уровне озера сокращается на одну треть (850—1150 м³/с), что также меньше требуемого санитарного попуска (1200 м³/с). Отсюда легко заключить, что в случае отъемов стока потребуются увеличить пропускную способность истока реки. Есть еще одно важное обстоятельство, которое приводит к тому же выводу. С возведением неевского регулирующего гидроузла в 2,1 км ниже о-ва Орешек (напор 0,7—1,0 м) уменьшится перепад между озером и рекой, а, следовательно, сократится и пропускная способность истока.

Гидравлические особенности истока р. Невы своеобразные. Шлиссельбургская губа и участок реки вблизи о-ва Орешек представляют собой как бы систему из двух затопленных водосливов с широким порогом. Один из водосливов мелководный с преобладающими отметками дна 2,5—2,8 м БС (это собственно песчано-каменистая отмель), другой водослив глубоководный с отметками дна 0—1 м БС (это судоходный Кошкинский фарватер). При среднем уровне озера в безледоставный период у о. Орешек по Кошкинскому фарватеру следует около 35 % суммарного расхода, а в 2 км от острова — около 15 %, хотя по площади поперечного сечения фарватер занимает соответственно 12 и 4 %. Скорость течения на фарватере в два-три раза больше, чем на отмели. С понижением уровня озера доля расхода, идущего по фарватеру, еще более возрастает и при очень низком уровне (350—380 см БС) у о. Орешек составляет по-видимому 45—50 %. Добавим, что, при прочих равных условиях, в зимний период

4012

на Кошкинский фарватер приходится заметно большая доля расхода, чем в безледоставный период. Из всего изложенного нетрудно заключить, что пропускную способность истока р. Невы надлежит увеличивать только лишь путем расчисток Кошкинского фарватера. Последнее совпадает с интересами водного транспорта.

В последующем на основе натуральных наблюдений и лабораторных экспериментов будет установлено оптимальное соотношение между объемами землечерпательных работ по углублению и расширению в различных частях Кошкинского фарватера. Несомненно, однако, что с точки зрения гидрологии предпочтительно углублять фарватер. Благодаря этому в зимний период по фарватеру будут подтягиваться теплые (глубинные) озерные воды, что приведет к уменьшению толщины ледяного покрова или даже полному его исчезновению. Систематические ледовые авиаразведки и данные промеров ледяного покрова подтверждают правильность подобной рекомендации. В суровую зиму толщина льда на Кошкинском фарватере заметно меньше, чем в остальных районах Шлиссельбургской губы. В обычную зиму фарватер то замерзает, то вскрывается, наконец, в мягкую зиму фарватер почти не замерзает.

В заключение этого раздела осветим вопрос о повторяемости и продолжительности маловодных периодов на р. Неве. Пока что экологи не определили, какой ущерб причиняется гидробионтам Невской губы при наступлении маловодья. Несомненно, однако, следующее: чем ниже водность, тем меньше должна быть длительность маловодного периода, и наоборот. В связи с отмеченным выбраны три пороговых значения расхода воды р. Невы, а именно:

- минимальный средний месячный расход воды 95 %-ной обеспеченности в естественных условиях — $940 \text{ м}^3/\text{с}$;
- то же, в проектных условиях при отъемах $7,5 \text{ км}^3/\text{год}$ и наличии неевского регулирующего гидроузла — 1200 и $1300 \text{ м}^3/\text{с}$;
- расход $2030 \text{ м}^3/\text{с}$.

Статистические данные о продолжительности и числе периодов, когда средний месячный расход $Q_{\text{Нева}}$ непрерывно был меньше указанных пороговых значений, помещены в табл. 3.9. Из таблицы видно, что на р. Неве очень маловодные периоды ($Q_{\text{Нева}} < 940 \text{ м}^3/\text{с}$) сравнительно короткие (2–3 мес). По-видимому, это свойство нужно сохранить и в будущем при отъемах и регулировании стока для расходов $Q_{\text{Нева}} < 1200 \text{ м}^3/\text{с}$ и $Q_{\text{Нева}} < 1300 \text{ м}^3/\text{с}$. Несколько иное положение с пороговым значением расхода $Q_{\text{Нева}} = 2030 \text{ м}^3/\text{с}$.

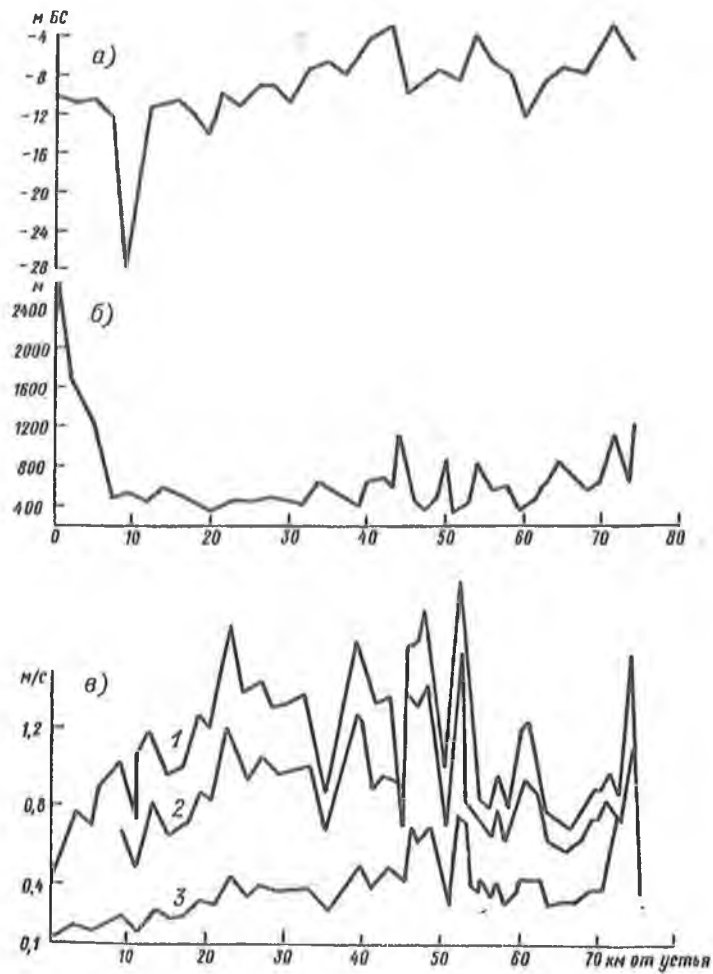


Рис. 3.6. График изменения по длине р. Невы основных морфометрических и гидравлических характеристик.

а — отметка дна фарватера, б — ширина, в — средняя в поперечном сечении скорость течения в безледоставный период. 1 — при наибольшем наблюдаемом расходе воды ($3700 \text{ м}^3/\text{с}$), 2 — при среднем многолетнем расходе ($2500 \text{ м}^3/\text{с}$), 3 — при наименьшем наблюдаемом расходе ($1250 \text{ м}^3/\text{с}$).

Таблица 3.9

Число маловодных периодов различной продолжительности,
р. Нева — Новосаратовка, 1859—1978 гг.

Q _{Нева} м ³ /с	Продолжительность периода, мес								Всего периодов
	1	2	3	4	5	6	7	8—21	
≤ 940	1	2	2	1					6
≤ 1200	4	4	6	4					18
≤ 1300	5	5	11	5	2	1			29
≤ 2030	6	8	21	36	17	6	7	3	98

Маловодных периодов с таким верхним пределом очень много. Их продолжительность сравнительно невелика (обычно 3—4 мес). Однако могут быть и весьма продолжительные маловодные периоды — до 21 месяца (с сентября 1939 г. по май 1941 г.). Отсюда очевидно, что с экологической точки зрения, учитывая все возрастающую опасность евтрофирования Невской губы, нужно в первую очередь стремиться к тому, чтобы предотвратить наступление весьма продолжительных маловодных периодов.

В заключение этого раздела на рис. 3.6 изображены обобщенные данные об изменении по длине р. Невы основных морфометрических и гидравлических характеристик. Данные получены на основании приложения 2 и рис. 3.1 путем соответствующих графических построений и расчетов.

4. Ветровое волнение

Ветровое волнение — важная характеристика гидрометеорологического режима Невской губы. Высотой и длиной волны предопределяются габариты и конструкция проектируемых гидротехнических сооружений. Частое и продолжительное волнение способствует аэрации водных масс и улучшает условия жизнедеятельности бактерий. Передаваемая на дно волновая энергия вызывает взмучивание и перемещение грунта и т. д.

Основным источником сведений о режиме ветрового волнения в Невской губе послужили материалы специальных наблюдений, в частности аэрофото- и теодолитных съемок, выполненных рядом организаций в 1973—1976 гг. Используются также данные многочисленных многолетних наблюдений (1947—1976 гг.) за волнением на сети гидрометеорологических станций и постов Северо-Западного УГКС.

Мелководье, сложный рельеф дна в прибрежной зоне, наличие многочисленных препятствий в Северных и Южных воротах, а главное частая смена силы и направления ветра — все это создает неупорядоченную систему волн в Невской губе. Как правило, в одно и то же время наблюдаются волны различной высоты, крутизны и длины.

Ветровое волнение в губе довольно быстро нарастает по мере усиления ветра и почти столь же быстро затухает с его ослаблением. При неизменном направлении ветра ход высоты волны всего на 1—2 ч отстает от хода скорости ветра.

Невская губа — беспокойный водоем. Так, в период, свободный ото льда, около 90 % времени наблюдается волнение и лишь 10 % времени — штиль. В частности, у головы дамб Морского канала повторяемость различных высот волн (1959—1962 гг.) следующая /11/:

Высота волны, м	0,0—0,05	0,06—0,25	0,26—0,50	0,51—1,0	> 1,0
Повторяемость, %	6	77	14	2,7	0,3

Впрочем, продолжительность периода с очень сильным волнением невелика и редко превышает 8—12 ч, но иногда достигает 3—4 сут подряд.

Существенно, что ветровое волнение из Финского залива почти не проникает в Невскую губу. Этому препятствует Ломоносовская отмель, о. Котлин, а также формы, рьяжи, банки и другие препятствия в Северных и Южных воротах.

Волнение развивается главным образом в самой губе.

В табл. 4.1 приводятся сведения о наибольшей высоте ветровой волны 1 %-ной обеспеченности по различным районам. Данные получены либо путем расчета известным методом (по работе /24/), либо на основании связи высоты волны со скоростью ветра. Указана самая высокая волна из 100 волн; средняя же высота волны примерно в 2,0—2,5 раза меньше. Как в Шлиссельбургской, так и в Невской губах с повышением уровня воды возрастает высота волны, в особенности в прибрежных районах. Это связано главным образом с увеличением глубины. В частности, с повышением уровня воды в Невской губе продвигающаяся из Финского залива ветровая волна все в меньшей степени разрушается о разного рода препятствия в Северных и Южных воротах. В первом приближении можно считать, что при очень высоком уровне воды повторяемость 1 раз в 100—200 лет высота волны больше указанной в табл. 4.1 в 1,3 раза в центральных районах губы и в 1,5 раза в прибрежных районах.

Таблица 4.1

Наибольшая высота ветровой волны

Водный объект	Район, участок	Высота волны, м
Шлиссельбургская губа Ладожского озера (бухта Петрокрепость)	Центральные районы, Кошкинский фарватер	2,0—3,0
То же	Отмели губы	1,5—2,0
р. Нева	Остров Орешек — пос. Марьино	1,0—1,2
”	пос. Марьино — Литейный мост	0,4—0,6
”	Литейный мост — Невские ворота Морского торгового порта	0,7—1,0
Невская губа	Центральные части губы	1,6—1,8
То же	Прибрежные зоны (0,5—1,5 см от берега), отмели невского бара, отмели вокруг острова Котлин, Ломоносовская отмель	0,5—1,0

Водный объект	Район, участок	Высота волны, м
Северные ворота	Центральная часть	1,0—1,5
Южные ворота	Морской канал	2,0—2,5

Поскольку, как отмечалось, ветровое волнение развивается в основном в самой Невской губе, то с возведением защитных сооружений режим волнения практически не изменится. Исключение составляет узкая (600—800 м) полоса к востоку от створа сооружения в пределах так называемой ветровой и волновой тени /1/.

Соотношение между параметрами ветровых волн (высотой, периодом, длиной) меняется в зависимости от скорости и направления ветра, глубины, местоположения пункта наблюдений и пр. В целом для Невской губы можно принять следующее соотношение между максимальной высотой волны (h_{\max}), средним периодом ($\tau_{\text{ср}}$) и средней длиной ($\lambda_{\text{ср}}$):

h_{\max} м	0,5	1,0	2,0	3,0
$\tau_{\text{ср}}$ с	1,5	2,5	4,0	5,5
$\lambda_{\text{ср}}$ м	5	10	25	47

Замечено, что осенью, когда вода теплее окружающего воздуха, обычно система волн в губе менее упорядоченная, чем весной, когда, напротив, вода холоднее воздуха. Причина в том, что в осенний период в отличие от весеннего часто наблюдается неустойчивая стратификация воздуха, а это усиливает степень турбулизированности воздушного потока.

4012

5. Ледовый режим

Ледовый режим р. Невы и Невской губы весьма своеобразный и сложный, что определяется главным образом неустойчивостью погодных условий и высокой водностью реки в начале зимы. Немалое влияние на ледовый режим уже оказала и еще окажет хозяйственная деятельность человека.

5.1. Ледовый режим р. Невы

Процесс замерзания р. Невы начинается с появлением сала. Затем наступает длительный (30—40 дней) период осеннего ледохода. При этом состав сплывающего по реке ледяного материала очень разнообразный: сало, обломки заберегов, озерные и речные льдины, рыхлая шуга, всплывший на поверхность донный лед и пр. Озерные и речные льдины обычно тонкие (4—6 см), но очень твердые и острые.

Продолжительный осенний ледоход поначалу завершается ледоставом в воронке Большой Невы. Затем постепенно замерзают и вышерасположенные участки реки. Первые 4—7 км от устья покрываются как за счет собственного, или речного, так и ладожского льда. Вышерасположенные участки реки в одни годы замерзают с участием ладожского льда, в другие годы — без него. В первом случае река замерзает намного быстрее, чем во втором. Ладожский же лед перестает поступать по разным причинам: а) вследствие замерзания Шлиссельбургской губы при тихой морозной погоде; б) из-за встречного западного ветра, который отгоняет плавучий лед в глубь озера; в) в связи с появлением ледовых перемычек в верхней половине реки. На последнем вопросе остановимся несколько подробнее.

Нева, как и всякая река со значительной поверхностной скоростью течения, замерзает снизу вверх по течению. От устья до Ивановских порогов, в пределах нижней половины реки, эта последовательность замерзания выдерживается всегда, замерзание же верхней половины реки в отдельные годы может происходить иначе. При густом ладожском ледоходе в сужениях и в местах со слабым течением создаются скопления плавучего льда, которые схватываются морозом, при этом возникают ледовые перемычки. Резкое уменьшение ледотранспортирующей способности реки происходит отчасти из-за сокращения расхода воды (из-за появления ледяного

покрова на отмели перед истоком) и отчасти за счет подпора от нижерасположенных зажорных скоплений льда и шуги. Перемычки чаще всего образуются в маловодные годы в сужении у Красных Сосен (12 км от истока). С появлением перемычки прекращается доступ озерного льда, и замерзание нижерасположенного участка реки затягивается надолго — на две-три недели. Напротив, выше перемычки река замерзает за 1—2 дня, если, конечно, продолжается ладожский ледоход и сохраняется морозная погода.

Обычно Нева замерзает скачкообразно. Кромка ледяного покрова то продвигается вверх по течению, то останавливается и смещается вниз (из-за колебания температуры воздуха, изменения густоты озерного ледохода, наконец, увеличения или уменьшения расхода воды). В отдельные годы на ограниченном участке реки (3—5 км) кромка сдвигается вверх и вниз по 5—7 раз. Такова общая закономерность. Что же касается всего диапазона условий замерзания, то он очень широкий. В маловодные годы в случае наступления сильных морозов река на всем протяжении замерзает за 2—3 дня (зимы 1921-22, 1941-42 г.). Бывает и наоборот. Так, зимой 1935-36 г. кромка льда продвинулась вверх на 35 км, достигнув района Усть-Ижоры, затем снова опустилась до устья. И уж совсем исключительной за последние два столетия оказалась зима 1960-61 г., когда река дважды замерзала на всем протяжении. В пределах Ленинграда (0—32 км от устья) замерзание длится от 2—3 до 15—20 сут.

Рукава и каналы невской дельты замерзают неодновременно. Те малые реки и каналы, куда спускаются теплые сточные воды, первый раз встают на 8—12 дней позже Невы, затем они неоднократно то покрываются неподвижным льдом, то освобождаются от него. Прочие рукава с каналами обычно замерзают на 2—3 дня раньше Невы.

Представляют определенный интерес средние многолетние (1952—1968 гг.) данные о стоке льда р. Невы в осенний период (млн. м³).

	Ладожский лед	Невский лед	Сумма
За период до установления ледяного покрова в устье реки	1,1	4,9	6,0
От установления ледяного покрова в устье до полного замерзания реки	4,8	6,0	8,8
Всего	5,9	10,9	14,8

Около 80 % льда (от объема 8,8 млн. м³) размещается на участке Литейный мост — Ивановское (13—45 км от устья). При средней ширине реки на этом участке 420 м и пористости 0,8 это соответствует начальной толщине слоя 0,9 м.

Замерзание р. Невы путем продвижения снизу вверх по течению кромки ледяного покрова сопровождается образованием зажоров льда (рис. 5.1). Зажорное скопление состоит из крупно- и мелкобитых льдин, комьев шуги, частиц внутриводного льда. Длина тела зажора 2—16 км, толщина 1—8 м, объем 2—25 млн. м³ льда. Поверхность ледяного покрова в месте зажора неровная, торосистая.

На Неве в отличие от других рек, на которых наблюдаются зажоры льда (реки со значительной поверхностной скоростью течения), нет постоянных мест образования зажоров. Весь участок реки от Охтинского моста до Ивановских порогов из года в год является зажорным. Скопление же льда, или зажорная пробка, в данном году возникает там, где из-за ослабления морозов кромка льда двигалась медленно, происходило торшение и случались подвижки. Зажоры льда бывают и в верхней части реки (выше Ивановских порогов), но из-за крутых высоких берегов они здесь не вызывают наводнений. Опасность их в другом — в резком сокращении (иногда до 600—800 м³/с) расхода воды в Неве, поскольку исток реки оказывается в подпоре от зажора. При этом уровни воды ниже места зажора сильно падают, оголяются выведенные в реку водозаборы. Известны случаи, когда вследствие значительного падения уровня воды в нижнем бьефе зажора г. Кировск и ряд промышленных предприятий длительное время находились на голодном водном пайке.

За свою историю Петербург—Ленинград пережил свыше 80 зажорных (зимних) наводнений, случившихся на 22-километровом участке от Охтинского моста до Понтонной (13—35 км от устья). При больших зажорных наводнениях повторяемостью 1 раз в 20 лет и реже подвергается затоплению и подтоплению прибрежная территория (в Ленинграде, Колпине, Понтонной и др.) площадью 250—300 га, часть которой плотно застроена; на этой территории находятся десятки промышленных предприятий.

Процесс зажорообразования протекает под воздействием трех основных, непрерывно меняющихся по времени природных факторов, а именно: 1) расхода воды; 2) количества и физико-механических свойств ледяного материала, подносимого течением к кромке; 3) температуры воздуха (тепловпотерь с водной поверхностью).

Чем больше расход воды, тем больше и скорость течения.

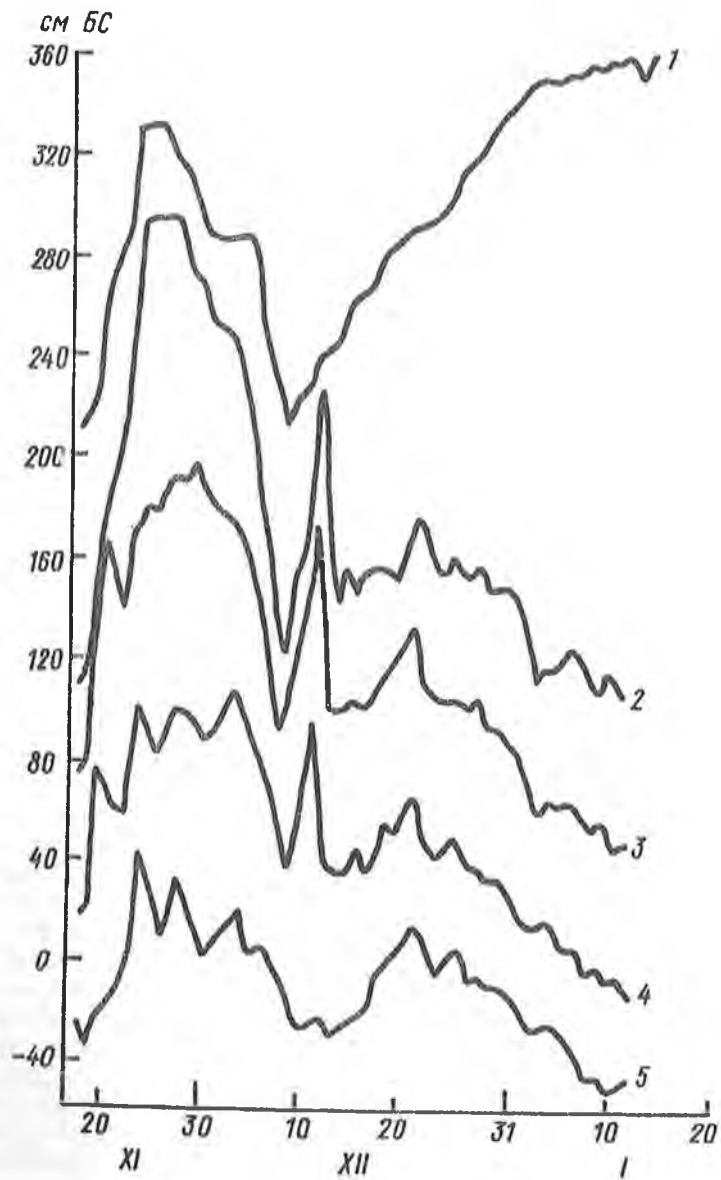


Рис. 5.1. Ход уровней воды р. Невы при зажоре льда зимой 1946-47 г.
 1 — Ивановское, 2 — Усть-Ижора, 3 — Усть-Славянка, 4 — ф-ка Ноги-
 на, 5 — Горный институт.

А вследствие значительной скорости течения лед и шуга заносится под кромку, происходит торошение, случаются подвижки и пр. Зависимость максимального зажорного уровня воды у з-да "Большевик" от среднего месячного уровня Ладожского озера в ноябре представлена на рис. 5.2. Подобные зависимости выявлены для ряда других пунктов р. Невы и широко используются в Северо-Западном УГКС при прогнозах зажорных максимумов с заблаговременностью 1,0–1,5 мес. Заметим, что уровень озера за ноябрь служит здесь косвенной характеристикой расхода воды, который будет иметь место в период формирования зазора льда.

Ход уровня воды при зажоре льда от года к году неодинаков. Но есть и нечто типичное. Уровень в данном пункте повышается до тех пор, пока к нему не подойдет снизу кромка льда. После того как кромка минует этот пункт, вода здесь начинает спадать (повторный подъем возможен лишь при подвижках). Схема перестроения продольного профиля водной поверхности реки для этого случая показана на рис. 5.3 а.

Формирование зазора льда во многом зависит от колебаний температуры воздуха и от того, сколько ледяного материала поступает из озера и что это за материал.

Пусть ладожский лед почему-либо не поступает в Неву. При температуре воздуха, близкой к нулю ($+1...-3^{\circ}\text{C}$), льда на реке не образуется. Происходит размыв зазора, кромка остается на месте, и уровни по всей реке медленно понижаются (рис. 5.3 б). При слабоморозной погоде ($-4...-6^{\circ}\text{C}$) льда, образующегося на реке и подносимого затем к кромке, хватает лишь для того, чтобы компенсировать размыв зазора. Уровни выше и ниже кромки остаются неизменными. При умеренно морозной погоде ($-7...-10^{\circ}\text{C}$) поступление льда к кромке явно преобладает над выносом льда, и кромка продвигается вверх по реке, создавая при этом зажорный подъем уровня; продольный профиль водной поверхности реки перестраивается по уже известной схеме (рис. 5.3 а). Наконец, при сильном морозе ($-11...-13^{\circ}\text{C}$ и ниже) кромка быстро продвигается вверх по течению, и зазора не возникает.

Пусть теперь ладожский лед поступает в Неву. При температуре воздуха $-2...-4^{\circ}\text{C}$ на самой реке образуется мало шуги и внутриводного льда, и в формировании зазора принимают участие только ладожские льдины; их не хватает для возникновения сколько-нибудь мощного зазора; кромка остается на месте или медленно продвигается вверх по реке, создавая небольшой подъем воды. При температуре воздуха $-4...-6^{\circ}\text{C}$ на реке уже образуется довольно много шуги и

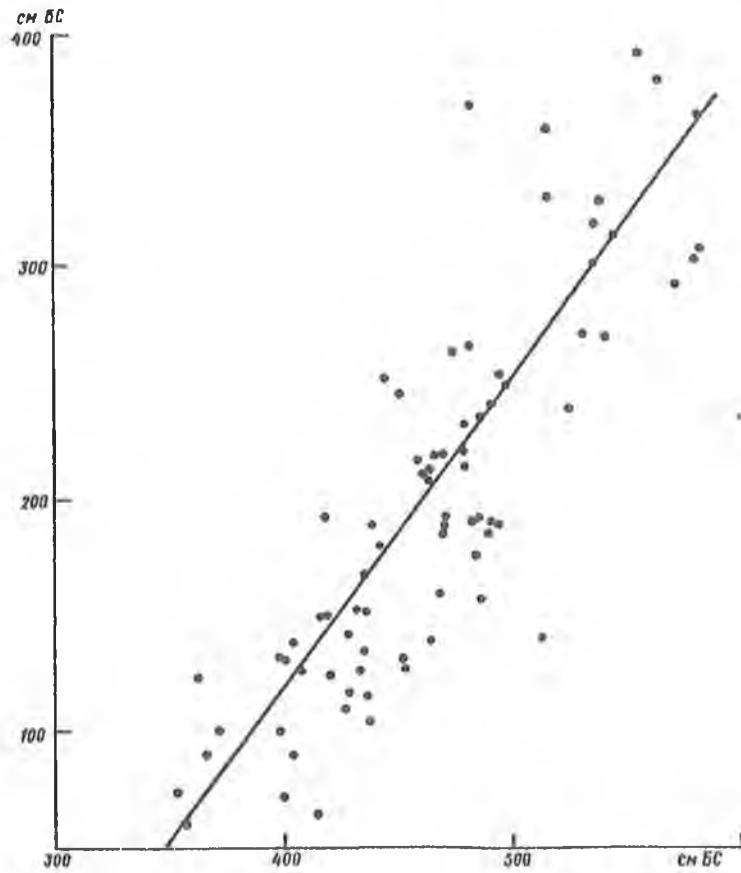


Рис. 5.2. Зависимость максимального зажорного уровня воды р. Невы у з-да "Большевик" (ось ординат) от среднего уровня Ладожского озера у с. Сяьские Рядки за ноябрь (ось абсцисс), 1890–1977 гг.

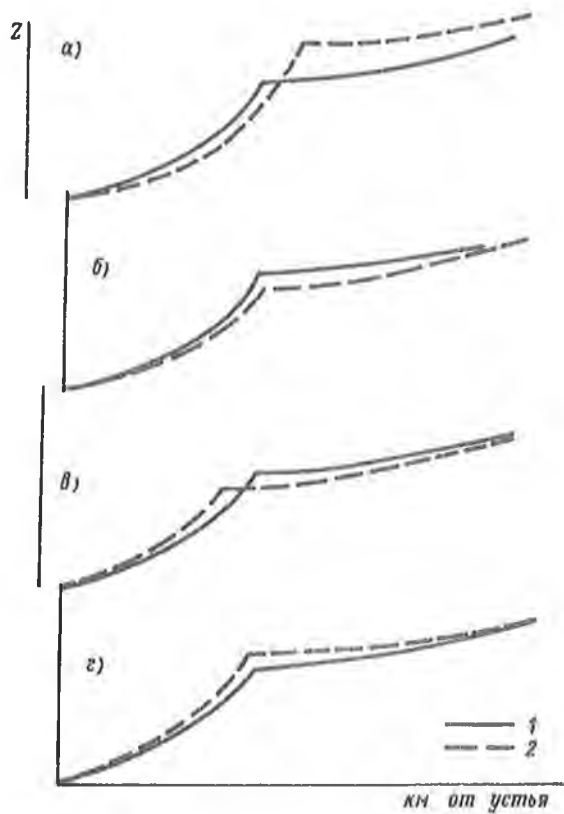


Рис. 5.3. Схема перестроения продольных профилей водной поверхности р. Невы при зажоре льда.

1 — продольный профиль в начальный момент, 2 — то же спустя 2—4 ч.

внутриводного льда, однако ладожские льдины и невский лед при такой температуре смерзаются плохо; в результате возникает мощный зажор. Наконец, при температуре воздуха $-7...-9^{\circ}\text{C}$ и ниже ледового материала много, смерзается он прочно, кромка быстро продвигается вверх по реке, и зажор не возникает.

Таким образом, самая благоприятная температура воздуха для формирования зазора льда на Неве: без ладожского льда $-7...-10^{\circ}\text{C}$, при ладожском ледоходе $-4...-6^{\circ}\text{C}$. В первом случае удельная скорость продвижения кромки ледяного покрова вверх по реке составляет примерно $0,3-0,5 \text{ км}/(\text{сут} \cdot ^{\circ}\text{C})$, во втором — $1,0-1,5 \text{ км}/(\text{сут} \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Неотъемлемой составной частью процесса зажорообразования являются подвижки льда. При каждой подвижке кромка смещается вниз по реке, тело зажора уплотняется и делается короче, происходит скачок уровня. Большей частью подвижка охватывает небольшой участок реки (до 200—300 м), и скачок уровня не превышает 5—10 см. Таких подвижек в отдельные годы бывает по несколько десятков. Однако известны случаи грандиозных подвижек десятков миллионов кубометров льда на участке длиной 8—12 км, что приводит к смещению кромки вниз по течению на 6—10 км, скачку уровня на 1,0—1,5 м и навалом льда на берега высотой 3—5 м (зимы 1935-36 и 1953-54 гг.).

Подвижка, как отмечалось, сопровождается резким повторным подъемом уровня воды.

Существенно, что наибольшей величины этот повторный подъем достигает на ограниченном участке реки (т. е. до подвижки) и новым (т. е. после подвижки) местоположением кромки. Во всех пунктах, находящихся выше прежнего положения кромки, уровень чаще всего падает, реже остается неизменным (рис. 5.3 в).

Крупная подвижка возникает при сочетании необходимого и достаточного условий. Необходимое условие выражается в ослаблении смерзшихся скоплений льда и шуги во время оттепели и вообще при переходе от сравнительно низкой температуры воздуха к сравнительно высокой. Температура воздуха в момент перехода обычно до $-5...-7^{\circ}\text{C}$, но может быть и $-10...-13^{\circ}\text{C}$ (зимы 1903-04 и 1935-36 гг.). Достаточное условие создается при поступлении к кромке больших масс ледяного материала. Давление этих масс и приводит к подвижке.

В качественном отношении процесс зажорообразования хорошо изучен. Тем не менее количественные зависимости для целей краткосрочных прогнозов выявить пока не удастся. Главная трудность в оценке сил сопротивления смерзшихся скоплений льда и шуги вблизи кромки, а также в более или менее точном определении расхода воды в р. Неве.

Обычно поверхность ледяного покрова на Неве почти повсеместно неровная, бугристая. В местах же зажоров поверхность реки представляет собой хаотическое скопление торосов, поставленных на поперек льдин и пр. По такому льду трудно пройти и совсем невозможно проехать. Дороги в этих местах приходится прокладывать пешнями, засыпая и утрамбовывая ямы снегом. В последующем острые грани льдин обламываются и обтаивают, а углубления заполняются снегом и талой водой. К концу зимы поверхность

становится более или менее ровной.

Первоначально неподвижным льдом покрывается вся река, но уже через несколько дней в ее истоке у Петрокрепости и в Ивановских порогах у Отрадного появляются полыньи. Образование первой полыньи связано с поступлением по Кошкинскому фарватеру относительно теплой озерной воды, а второй — с быстрым течением. Полынья в истоке реки замерзает к середине или к концу зимы; в мягкую же зиму она сохраняется постоянно, ее длина составляет от 2 до 7 км. Полынья в Ивановских порогах никогда не замерзает; в мягкую зиму ее длина 5—15 км, в очень суровую — всего 200—300 м.

Кроме полыней естественного происхождения, на Неве еще имеются искусственные полыньи, приуроченные к местам сброса теплых промышленных вод; наибольшие из них находятся у выпусков тепловых электростанций ГРЭС № 5 и 8. Термические полыньи в самом Ленинграде, как правило, имеют вид промоин — узких полос чистой воды вдоль берегов. Добавим, что участок Большой Невы от устья до моста Лейтенанта Шмидта часто взламывается ледоколами. Образуется длинная, иногда на всю ширину реки полынья: верхний край ее в мягкую зиму постепенно отступает вверх по течению до Кировского моста и даже до Рыбацкого.

Сведения о максимальной толщине ледяного покрова в конце зимы помещены в табл. 5.1. Самый мощный ледяной покров наблюдался в блокадную зиму 1941-42 г.

Таблица 5.1

Наибольшая толщина ледяного покрова (см)
за зимний период

Водный объект, район	Характеристика зимы		
	мягкая	обычная	суровая
Шлиссельбургская губа Ладожского озера (исключая Кошкинский фарватер)	25—35	55—65	100—110
р. Нева вне пределов Ленинграда	20—30	45—60	65—85
р. Нева в пределах Ленинграда	15—25	35—45	60—80
Прибрежные районы Невской губы	30—40	50—70	80—100
Центральные районы Невской губы	20—30	30—40	60—80

Продолжение табл. 5.1

Водный объект, район	Характеристика зимы		
	мягкая	обычная	суровая
Отмели неевского бара	10—20	20—30	40—60
Фарватеры неевского бара	0—5	10—20	20—30

Ледяной покров реки задолго до вскрытия настолько ослабевает (из-за проталин, промоин и пр.), что переправа по нему сопряжена с риском. В начале же зимы пешая переправа по льду может начинаться спустя несколько дней после замерзания.

Рассмотрим далее процесс вскрытия р. Невы. В целом Нева вскрывается сверху вниз по течению. Разрушение ледяного покрова начинается с истока реки и вдоль Кошкинского фарватера, затем на основных фарватерах взморья и далее на остальной части реки. В настоящее время обычная последовательность вскрытия нередко нарушается работой ледоколов, а также сбросом в реку больших масс сточных вод. В результате, в мягкую зиму, а иногда даже в умеренную, нижний участок реки до Охтинского моста освобождается ото льда на 5—15 дней раньше остальной реки.

Как правило, в течение 3—5 дней после вскрытия Нева освобождается от собственного льда — это период речного ледохода; по реке плывут большие неправильной формы льдины грязно-серого цвета. После этого в течение 4—6 дней река бывает свободна ото льда. Затем вскрывается Ладожское озеро, и начинается озерный ледоход, который продолжается в среднем 8—12 дней. Таким образом, в целом от вскрытия до окончательного очищения реки ото льда проходит 15—25 дней. В одни годы этот период сокращается до 2—3 дней, в другие — растягивается на 40—45 дней.

Из Ладожского озера в Неву лед поступает и небольшими льдинами, и крупными полями размером до 300 x 300 м и толщиной до 0,6—0,7 м. Путь от Петрокрепости до воронки Большой Невы озерный лед проходит за 18—20 ч. За это время он усиленно тает и до устья доходит всего около 4 % льда (табл. 5.2).

Продолжительность озерного ледохода сильно колеблется

Таблица 5.2

Средние многолетние значения стока льда р. Невы
в весенний период 1947–1970 гг., млн. м³

Пункты	Ладожский лед	Невский лед	Сумма
Петрокрепость	156	0	156
Новосаратовка	72	12	84
Горный институт	6	19	25

по годам — от 2–3 до 30–40 дней. Соответственно колеблется и сток льда за весенний период — от 25 до 650 млн. м³. В Неву поступает не более 1–2 % общего количества ладожского льда и только в отдельные годы 4–5 %.

Основные рукава невской дельты вскрываются на 4–6 дней раньше главной реки. Ледяной покров здесь тает на месте, и речного ледохода почти не бывает.

Вскрытие Невы изредка сопровождается заторами льда двух видов, один из которых связан с характерной для Невы последовательностью вскрытия от истока к устью. Принормальным течением ладожский лед останавливается у верхней границы еще не вскрывшегося участка реки, происходит торошение. Затопы эти небольшие, кратковременные и опасных подъемов уровня не создают (не более 1,5–1,7 м). Другой вид затопов связан со взломом ледяного покрова Ладожского озера сильным северо-восточным ветром и нагоном этого льда на песчано-каменистую отмель перед истоком реки. Подобные затопы льда бывают сравнительно редко — 1 раз в 10–15 лет. Единственное из следствия — уменьшение расхода воды в Неве и падение уровней по всей реке, но больше всего вблизи истока (на 0,4–0,6 м). Один из наиболее мощных затопов подобного вида произошел весной 1858 г. По описанию А. П. Андреева /32/ "... русло реки так сузилось, что похоже было на маленькую речку".

Со временем ледовый режим р. Невы может измениться лишь в результате изъятия части речного стока. Если эти изъятия не более 3,5 км³/год, то они приведут к весьма незначительному (4–5 %) уменьшению водности реки, а, следовательно, и скорости течения. Каких-либо изменений в сроках замерзания и вскрытия, а также в повторяемости и

высоте зажорных максимумов не ожидается. Иначе обстоит дело, если изъятия стока будут составлять $7,1 \text{ км}^3/\text{год}$ и более. При этом предусматривается строительство регулирующего гидроузла в истоке реки у Петрокрепости. Сток ладожского льда прекратится. Появится возможность управлять расходом воды в реке.

В нижней части р. Невы в пределах Ленинграда осеннее ледообразование длится в среднем 14 дней (от 20/XI до 4/XII). В этот период обычно бывает четыре оттепели, когда лед на самой реке не образуется, но заносится из Ладоги. Весной от вскрытия до полного очищения проходит 20 дней, из них четыре дня с собственным (речным) ледоходом, восемь дней без льда и еще восемь дней с ладожским ледоходом. Таким образом, с возведением неевского регулирующего гидроузла и прекращением стока ладожского льда навигация на реке удлинится в среднем на 12—20 дней (в отдельные годы от 3—4 до 25—30 дней).

Как отмечалось, замерзание р. Невы происходит путем последовательного перемещения кромки ледяного покрова снизу вверх по течению и сопровождается зажорами льда. Какой расход воды нужно подавать в Неву через регулирующей гидроузел, чтобы предотвратить опасность больших зажорных подъемов уровня воды? Для ответа на поставленный вопрос необходимо располагать зависимостью между максимальным зажорным уровнем, с одной стороны, и расходом воды и температурой воздуха (теплопотерями), с другой, за годы, когда река замерзает без ладожского льда. Из-за низкой точности данных о расходе воды в зажорный период, трудности количественной оценки сопротивления уже смерзшихся масс льда и шуги вблизи кромки, малого числа лет, когда река покрывалась собственным льдом, — по всем этим причинам упомянутую зависимость выявить не удастся. Тем не менее на основании анализа имеющихся материалов натуральных наблюдений можно рекомендовать следующие расходы воды, при поддержании которых есть почти полная гарантия того, что на участках Охтинский мост — Понтонная максимальные зажорные уровни не превысят опасных значений (например, у з-да "Большевик" 260 см БС), а именно:

Температура воздуха, °С . . .	—4...—6	—6...—8	—8...—10
Расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$	1400—1600	1600—1800	1800—2000

Продолжительность периода с сокращенным расходом — от 5 до 20 сут.

5.2. Ледовый режим Невской губы

В предзимний период водные массы Невской губы в прибрежных мелководных районах довольно быстро охлаждаются. Ледообразование здесь начинается с появления первичных форм льда в виде сала и шуги спустя 1—2 дня после устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C . В дальнейшем они распространяются вдоль южного берега с востока на запад, а вдоль северного берега — с запада на восток (рис. 5.4, табл. 5.3). При маловетренной морозной погоде сало и шуга быстро превращаются в забереги, которые затем скачкообразно продвигаются к центру губы. В течение двух-трех дней вся губа покрывается неподвижным льдом (например, 1923, 1937, 1957 гг.). Иначе происходит замерзание в ветреную слабоморозную погоду. Неокрепшие забереги часто взламываются. Замерзание губы растягивается на две-три недели. В отдельные годы взламывается даже сплошной ледяной покров, и тогда от появления заберегов до окончательного замерзания проходит 2,0—2,5 мес. В среднем в 5 годах из 10 губа замерзает один раз на зиму, в 3 годах — два раза, в 2 годах — три-четыре раза.

В процессе замерзания губы определенную роль играет невский лед. Поступление готового ледяного материала ускоряет замерзание, особенно на взморье. И все же губа замерзает в основном за счет собственного льда. В этом легко убедиться, сопоставляя две цифры: при начальной толщине ледяного покрова 5 см объем льда на акватории губы равен $380 \times 10^6 \times 0,05 = 19$ млн. м^3 ; сток же льда в устье реки до ее замерзания в среднем составляет 1,1 млн. м^3 .

В период формирования ледяного покрова в Невской губе вершина Финского залива в одни годы бывает покрыта тонким молодым льдом до линии маяк Шепелев — мыс Флотский, в другие — она почти свободна ото льда. Схема замерзания вершины Финского залива (включая Невскую губу) представлена на рис. 5.4.

Нередко в начале зимы, пока лед не достигнет толщины 15—20 см, отмечаются подвижки и торошение. Происходит это преимущественно при ветрах западных румбов, которые сопровождаются подъемом воды. С повышением уровня ледяной покров отрывается от берегов, в нем возникают сквозные трещины. Ветер довершает картину разрушения. В местах подвижек и навалов льда образуются торосы высотой до 5—7 м (у берегов и фаргов, на отмелях и пр.). Подобный случай разрушения ледяного покрова в губе, например, имел место 19—20/XII 1973 г.

Таблица 5.3

Средние многолетние даты ледовых явлений

Водный объект	Пункт	Осенние ледовые явления			Весенние ледовые явления		
		появление сала и заберегов	начало ледохода ¹	начало ледостава ²	начало ледохода (вскрытие)	очистение ото льда	
Шлиссельбургская губа	Осиновец	18.XI	22.XI	3.I	15.IV	7.V	
Ладожского озера	Петрокрепость	14.XI	17.XI	21.XII	4.IV	3.V	
р. Нева	Ивановское	18.XI	19.XI	24.XII	8.IV	2.V	
"	Ф-ка им. Ногина	18.XI	21.XI	3.XII	11.IV	30.IV	
"	Невская устье-вая станция	23.XI	29.XI	5.XII	10.IV	21.IV	
Невская губа	Лисий Нос	7.XI	24.XI	5.XII	24.IV	30.IV	
"	Ломоносов	12.XI	10.XII	19.XII	20.IV	28.IV	
"	Кронштадт	19.XI	29.XI	30.XII	23.IV	30.IV	

Примечание. Для Невской губы: ¹ — дата образования устойчивого припая льда, ² — дата окончательного заморзания.

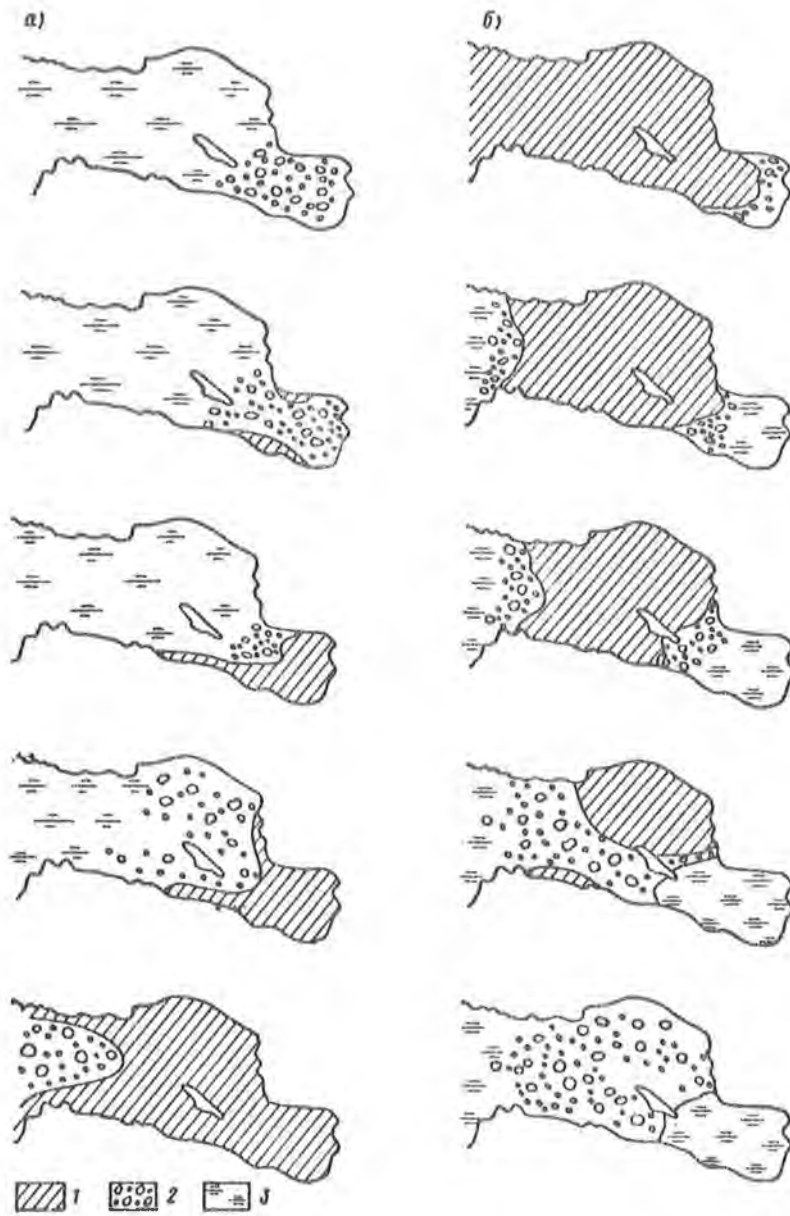


Рис. 5.4. Схема замерзания (а) и вскрытия (б) вершины Финского залива.

1 — ледостав, 2 — шавучий лед, 3 — чистая вода.

По толщине ледяного покрова Невскую губу можно разделить на четыре района — прибрежный, центральный, отмели и фарватеры неевского бала. В прибрежной зоне шириной 1 — 3 км толщина ледяного покрова самая большая — в конце зимы обычно 51—70 см. Самый тонкий и непрочный лед находится на фарватерах неевского бара (в обычную зиму 11—20 см). Подобное распределение толщины льда связано с поступлением теплых бытовых и производственных сточных вод, а также со скоростью течения. Более подробные сведения о толщине ледяного покрова в различные зимы помещены в табл. 5.1. Наибольшая зафиксированная толщина льда к концу зимы 90—95 см (зимы 1939-40 и 1941-42 гг.), а к моменту вскрытия — 65—70 см (табл. 5.2).

Ледяной покров Невской губы обычно ровный. Верхний слой льда мутно-белого цвета, непрозрачный, состоит в основном из снежного льда. Нижние слои льда свинцово-серого цвета и довольно прозрачные. В малоснежную зиму при сильных ветрах ледяной покров губы оголяется. Из-за колебания температуры воздуха в нем появляются многочисленные неглубокие трещины, а на стыке льда, примерзшего к грунту, и льда, находящегося на плаву, — сквозные щели. Образование сквозных береговых щелей может также произойти вследствие нагонов воды. Замечено, что между вдающимися в губу мысами то же располагаются сквозные щели. Щели то сужаются под действием нажимных ветров, то расширяются до размеров больших разводий при отжимных ветрах. Вдоль береговых щелей нередко можно видеть сплошную гряду торосов, возникших при сильных нажимных ветрах.

К концу зимы кромка припая в вершине Финского залива большей частью располагается в 30—60 км к западу от о. Котлин. Однако в очень теплые зимы кромка припая не выходит за пределы Северных и Южных ворот. Именно в такие зимы чаще всего и случаются значительные нагонные подъемы воды. Максимальная толщина ледяного покрова в Невской губе при зимних наводнениях достигала (1924—1976 гг.): в декабре 20—30 см, в январе 30—40 см, в феврале и марте 40—55 см.

В последние 10—15 лет на Финском заливе осуществляется круглогодичная навигация, и ледяной покров в Морском канале и на части акватории Морского торгового порта время от времени взламывается ледоколами.

Весной разрушение ледяного покрова в Невской губе начинается с образования разводий вдоль берегов. Под действием теплого воздуха, талой воды и солнечной радиации ле-

дяной покров теряет прочность, его толщина уменьшается. Затем возникают проталины и промоины, в первую очередь в местах, где лед загрязнен (Ломоносов, Кронштадт, Морской торговый порт) и в местах сброса теплых бытовых и производственных сточных вод (фарватеры неевского бара). Подготовительный период обычно длится 10—15 дней и заканчивается чаще всего во второй декаде апреля. Вскрытие губы начинается спустя 3—5 дней после очищения ото льда р. Невы. Фронт вскрытия в губе скачкообразно распространяется с востока на запад и от центра к берегам (рис. 5.4 б). У южного и северного берегов губы взлом ледяного покрова задерживается в среднем на 5—10 дней от начала вскрытия губы (после теплой зимы на 2—5 дней, после очень холодной — на 15—20 дней).

Независимо от суровости зимы вскрытие Невской губы происходит раньше, чем в прилегающих районах Финского залива. Кромка припая в пределах вершины залива одновременно движется с востока на запад и с запада на восток (рис. 5.4 б). Восточная кромка припая подходит к Северным и Южным воротам на 2—7 дней позже западной. Сохраняющийся припай в воротах препятствует выносу плавучего льда из губы в залив. Льдины тают на месте. Незначительный вынос льда через Морской канал в залив наблюдался лишь в исключительно мягкую зиму 1960-61 г., когда ледяной покров в Южных воротах был взломан во время наводнения в ночь с 30 на 31/III 1961 г.

По визуальным наблюдениям весной сразу после взлома припая около половины всех льдин имеют размеры менее 500 м. Площадь некоторых льдин может достигать 2 км² (2 x 1 км), а скорость их дрейфа при сильном ветре до 0,30 м/с.

Плавучий лед в губе держится от 5—8 до 15—20 сут. Окончательное очищение ото льда обычно происходит в конце апреля. После исчезновения собственного льда в губу приносится некоторое количество ладожского льда, который быстро тает, не доходя до о. Котлина. Диапазон колебания стока речного и озерного льда по годам от 1,1 до 154 млн. м³ при среднем значении 25 млн. м³ (табл. 5.2). Льдины в губе дрейфуют со скоростью, которая примерно в 50 раз меньше скорости ветра. Чем сплоченнее плавучий лед, тем при прочих равных условиях меньше скорость его движения.

При оценке ледового режима Невской губы на перспективу необходимо учесть полыньи у выпусков централизованных очистных сооружений Ленинграда. Размеры полыньи здесь будут зависеть от многих сильно варьирующих факто-

ров, расхода воды, скорости и направления ветра, теплопотерь с водной поверхности, температуры сточной воды и пр. Поэтому расчет длины и площади полыньи выполнен ГГИ при двух крайних ситуациях.

С и т у а ц и я 1. Невская губа покрыта сплошным ледяным покровом: расход воды $Q_{\text{Нева}} = 2500 \text{ м}^3/\text{с}$; система течений чисто стоковая; коэффициент турбулентной диффузии $0,05 \text{ м}^2/\text{с}$; теплопотери с открытой водной поверхности $4,19$ и $29,31 \text{ т Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, соответствует температуре воздуха -2 и $15 \text{ }^\circ\text{C}$.

С и т у а ц и я 2. Невская губа покрыта крупно- и мелкобитым льдом: расход воды $Q_{\text{Нева}} = 1200 \text{ м}^3/\text{с}$; система течений суммарная; коэффициент турбулентной диффузии $5 \text{ м}^2/\text{с}$; теплопотери с водной поверхности те же, что в предыдущей ситуации.

Метод расчета заключался в совместном решении уравнения турбулентной диффузии и уравнения теплового баланса. Излагать метод здесь не имеет смысла. Укажем лишь, что при обеих ситуациях температура выпускаемой сточной воды принималась равной $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Предполагалось, что положение нижней кромки полыньи совпадает с положением нулевой изотермы. Заметим, что обе ситуации едва ли возможны в реальных условиях. Тем не менее они дают некоторое представление о диапазоне колебания рассматриваемого явления. Очевидно, что при заданных теплопотерях с водной поверхности длина полыньи в ситуации 1 близка к минимальной, а в ситуации 2 — к максимальной. Судя по материалам расчетов, большую часть времени ($80-90 \%$) длина полыньи будет колебаться в следующих пределах:

— у юго-западного выпуска — от 2 до 7 км (при расположении выпуска в створе пос. Стрельна вблизи ковша Морского канала);

— у северного выпуска от 2 до 10 км (при расположении выпуска у пос. Ольгино в $1,5-2,0$ км от берега);

— у южного, или центрального выпуска от 1 до 3 км (при расположении выпуска у о. Белый в Корабельном фарватере).

Приведенные данные расчетов нуждаются в уточнении на основе специально поставленных натурных наблюдений вблизи недавно вступившей в строй первой очереди Центральной станции аэрации.

6. Минерализация и соленость воды

Минерализация и соленость воды самым непосредственным образом влияют на условия обитания гидробионтов. В особенности это относится к Невской губе. Время от времени из Финского залива в Невскую губу вторгаются солоноватые морские воды, что помимо прочего неблагоприятно отражается на коммунальном и промышленном водоснабжении.

За многие тысячелетия почвы неевского бассейна хорошо промыты частыми дождями и обильными снеговыми водами. Поэтому как ладожская, так и нельская вода очень бедны солями. Средняя минерализация воды (с учетом главных ионов) составляет всего 61,3 мг/л, еще около 0,5 мг/л приходится на прочие ионы. В то же время благодаря обилию лесов и болот вода содержит довольно много растворенных органических веществ (цветность 30—40°, перманганатная окисляемость 8—10 мг О/л, бихроматная окисляемость 20—30 мг О/л).

Очевидно, что средние за многолетний период концентрации солей в нельской воде и в Ладожском озере практически одинаковы. В противном случае должно происходить накопление или обеднение солями озерной воды. Солевой баланс Ладожского озера можно представить следующим образом (взяты средние многолетние значения за 1968—1980 гг.):

Приход:	млн. т/год	мг/л
Атмосферные осадки	0,09	10,0
Поверхностный приток	4,64	61,9
Подземный приток	0,10	83,3
Всего (среднее)	4,83	61,3
Расход:		
Сток р. Невы	4,83	61,3

Если общее количество воды и солей, поступающих в Ладожское озеро с поверхностным притоком (соответственно 75,0 км³/год и 4,64 млн. т/год) принять за 100 %, то между впадающими реками оно распределится следующим образом:

	По объему воды, %	По количеству солей, %
р. Волхов	24	53
р. Свирь (вместе с реками Паша и Оять)	30	20
р. Вуокса	25	16
Прочие реки	21	11

Таким образом, основным источником поступления солей в Ладожское озеро является р. Волхов. Заметим, что содержание биогенных веществ в этой реке еще больше (около 60 %).

По составу растворенных минеральных веществ ладожская и невская вода относится к гидрокарбонатному классу, кальциевой группе с реакцией, близкой к нейтральной (рН \approx 7). Вода мягкая: общая жесткость 0,60 ммоль/л, устранимая жесткость 0,45 ммоль/л.

Химический состав невской воды изменяется в течение года, хотя и не очень значительно; как правило, изменение концентрации какого-либо вещества в ту или другую сторону от его среднего значения составляет 0,7—1,4. Сказывается громадное регулирующее влияние озер бассейна. (Напомним, что в них заключен объем воды, который в 17 раз превышает годовой сток Невы). В табл. 6.1 приводится ионный состав за март (минерализация невской воды самая большая в году) и за июнь (минерализация самая малая), а также в целом за год.

Таблица 6.1

Средние многолетние значения концентрации главных ионов в воде р. Невы за 1968—1978 гг., мг/л

Ионы	Март	Июнь	Год
Гидрокарбонаты, HCO_3^-	44,0	20,0	28,5
Сульфаты, SO_4^{2-}	11,0	8,0	9,4
Хлориды, Cl^-	9,0	5,5	6,3
Кальций, Ca^{2+}	12,0	8,0	9,6
Магний, Mg^{2+}	3,5	2,0	2,7
Натрий и калий, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$	6,0	3,0	4,2
Нитраты, NO_3^-	0,8	0,2	0,6
Сумма	86,3	46,7	61,3

6. Минерализация и соленость воды

Минерализация и соленость воды самым непосредственным образом влияют на условия обитания гидробионтов. В особенности это относится к Невской губе. Время от времени из Финского залива в Невскую губу вторгаются солоноватые морские воды, что помимо прочего неблагоприятно отражается на коммунальном и промышленном водоснабжении.

За многие тысячелетия почвы неевского бассейна хорошо промыты частыми дождями и обильными снеговыми водами. Поэтому как ладожская, так и невятская вода очень бедны солями. Средняя минерализация воды (с учетом главных ионов) составляет всего 61,3 мг/л, еще около 0,5 мг/л приходится на прочие ионы. В то же время благодаря обилию лесов и болот вода содержит довольно много растворенных органических веществ (цветность 30–40°, перманганатная окисляемость 8–10 мг О/л, бихроматная окисляемость 20–30 мг О/л).

Очевидно, что средние за многолетний период концентрации солей в невятской воде и в Ладожском озере практически одинаковы. В противном случае должно происходить накопление или обеднение солями озерной воды. Солевой баланс Ладожского озера можно представить следующим образом (взяты средние многолетние значения за 1968–1980 гг.):

Приход:	млн. т/год	мг/л
Атмосферные осадки	0,09	10,0
Поверхностный приток	4,64	61,9
Подземный приток	0,10	83,3
Всего (среднее)	4,83	61,3
Расход:		
Сток р. Невы	4,83	61,3

Если общее количество воды и солей, поступающих в Ладожское озеро с поверхностным притоком (соответственно 75,0 км³/год и 4,64 млн. т/год) принять за 100 %, то между впадающими реками оно распределится следующим образом:

	По объему воды, %	По количеству солей, %
р. Волхов	24	53
р. Свирь (вместе с реками Паша и Оять)	30	20
р. Вуокса	25	16
Прочие реки	21	11

Таким образом, основным источником поступления солей в Ладожское озеро является р. Волхов. Заметим, что содержание биогенных веществ в этой реке еще больше (около 60 %).

По составу растворенных минеральных веществ ладожская и невская вода относится к гидрокарбонатному классу, кальциевой группе с реакцией, близкой к нейтральной ($\text{pH} \approx 7$). Вода мягкая: общая жесткость 0,60 ммоль/л, устранимая жесткость 0,45 ммоль/л.

Химический состав невской воды изменяется в течение года, хотя и не очень значительно; как правило, изменение концентрации какого-либо вещества в ту или другую сторону от его среднего значения составляет 0,7–1,4. Сказывается громадное регулирующее влияние озер бассейна. (Напомним, что в них заключен объем воды, который в 17 раз превышает годовую сток Невы). В табл. 6.1 приводится ионный состав за март (минерализация невской воды самая большая в году) и за июнь (минерализация самая малая), а также в целом за год.

Таблица 6.1

Средние многолетние значения концентрации главных ионов в воде р. Невы за 1968–1978 гг., мг/л

Ионы	Март	Июнь	Год
Гидрокарбонаты, HCO_3^-	44,0	20,0	28,5
Сульфаты, SO_4^{2-}	11,0	8,0	9,4
Хлориды, Cl^-	9,0	5,5	6,3
Кальций, Ca^{2+}	12,0	8,0	9,6
Магний, Mg^{2+}	3,5	2,0	2,7
Натрий и калий, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$	6,0	3,0	4,2
Нитраты, NO_3^-	0,8	0,2	0,6
Сумма	86,3	46,7	61,3

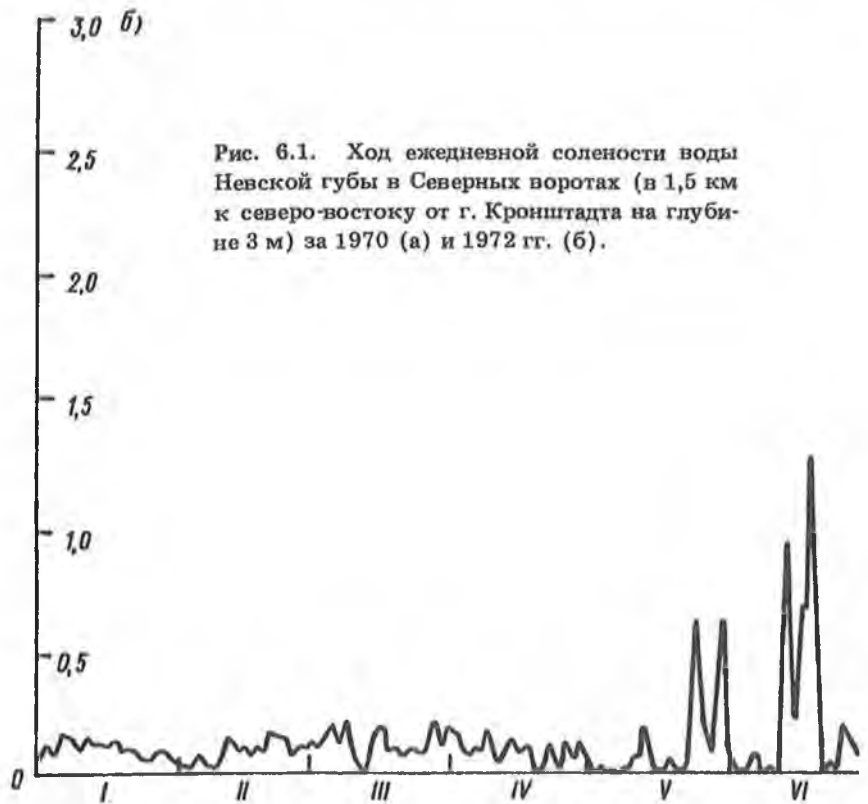
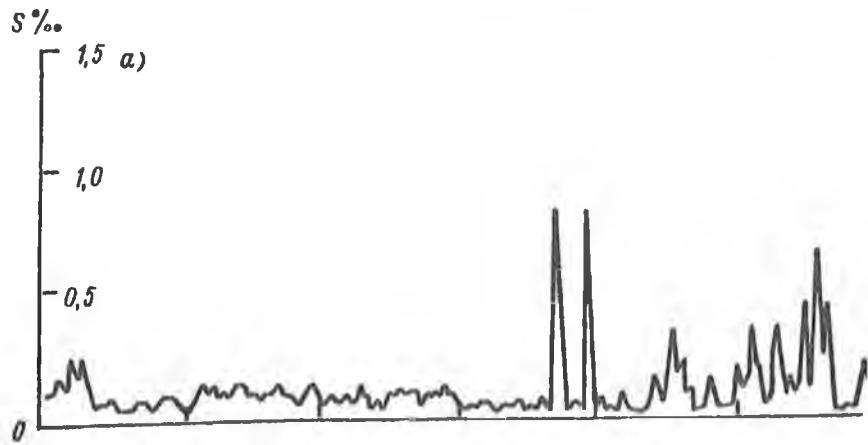
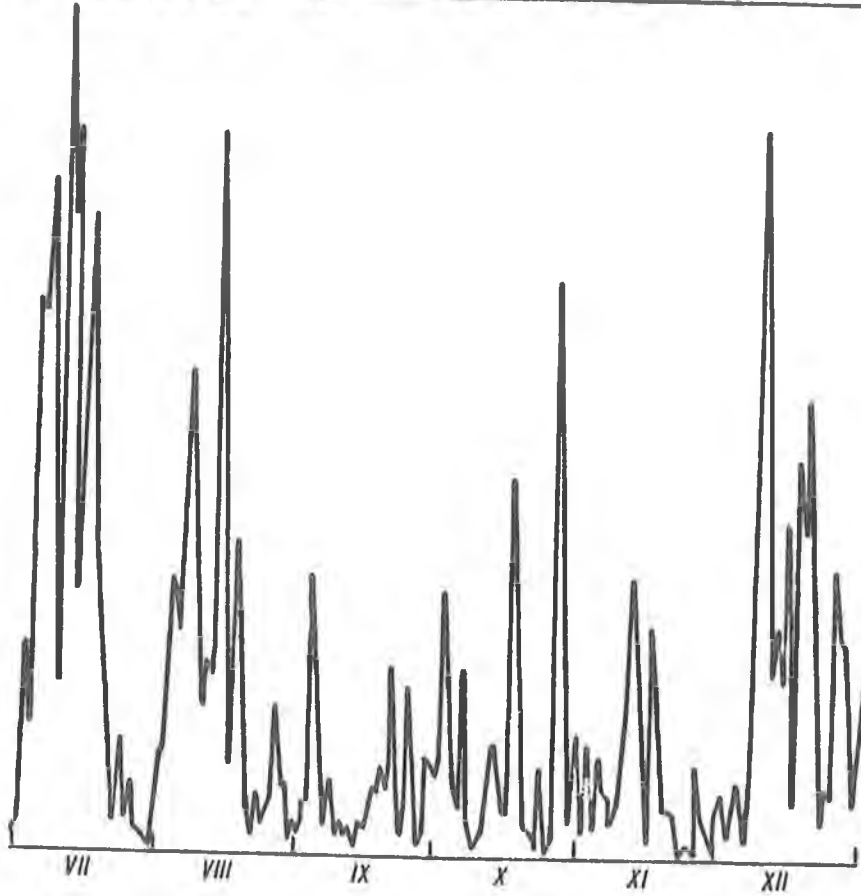
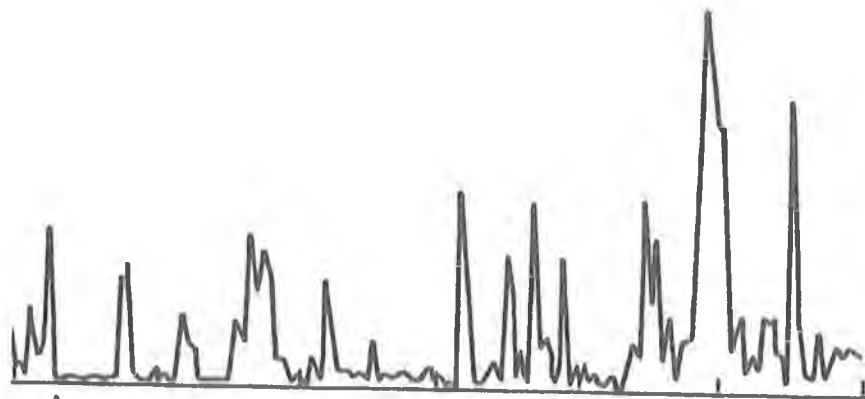


Рис. 6.1. Ход ежедневной солености воды Невской губы в Северных воротах (в 1,5 км к северо-востоку от г. Кронштадта на глубине 3 м) за 1970 (а) и 1972 гг. (б).



Приведенное в табл. 6.1 содержание главных ионов относится к р. Неве выше Ленинграда. В пределах Ленинграда качество невской воды изменяется в худшую сторону из-за сброса в нее сточных вод, содержащих органические и токсические вещества. Далее в Невской губе уже преобладает процесс самоочищения. Впрочем, концентрация главных ионов повсюду остается практически неизменной.

Рассмотрим далее режим солености воды, который имеет важное значение для Невской губы.

Невская губа, будучи частью солоноватого Финского залива, все же остается пресноводным водоемом (вследствие преобладания направленного с востока на запад стокового течения). Тем не менее эпизодически по дну Морского канала и Северного фарватера из залива в губу вторгаются солоноватые морские воды. Концентрация солей NaCl в них иногда достигает 4–6 ‰, что в 6–9 раз превышает норму для источников централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения (660 мг/л, или 0,66 ‰). (Заметим, что в водах Финского залива между соленостью S (‰) и содержанием в ней хлора Cl (‰) имеется довольно тесная линейная зависимость:

$$S = 1,8Cl + 0,03. \quad (6.1)$$

В соответствии же с действующими правилами для источников хозяйственно-питьевого водоснабжения предельная допустимая концентрация (ПДК) по хлору 0,35 ‰. Следовательно, по солености она равна 0,66 ‰).

Соленость воды в Невской губе в гораздо большей степени, чем любая другая характеристика гидрологического режима, отражает те крупномасштабные явления, которые протекают на акватории Финского залива и даже всего Балтийского моря. На эти явления накладываются сложные процессы смешения, переноса и диффузии пресных речных и солоноватых морских вод, обладающих различной плотностью. Всем этим и определяется чрезвычайно большая изменчивость солености воды как во времени, так и в пространстве. В качестве примера на рис. 6.1 представлен график колебания ежедневной солености воды за 1970 и 1972 гг. на глубине 3 м в точке, находящейся вблизи южного откоса Северного фарватера в 1,1 км к северу-востоку от Кронштадта. Из рисунка видно, что 1970 г. является типичным в отношении режима колебания солености воды, для 1972 г. харак-

терна повышенная соленость.

Для режима солености воды в Финском заливе характерна некоторая периодичность: серия лет с пониженной соленостью сменяется серией лет с повышенной соленостью. Одна из причин этого — колебание водности впадающих в него рек (Невы, Луги, Нарвы и др.). Подтверждением сказанного может служить наличие довольно тесной обратной связи между средней за период май—октябрь соленостью воды в различных пунктах залива со средним годовым расходом воды р. Невы у Новосаратовки. Сильное опресняющее влияние стока впадающих рек прослеживается и на внутригодовом ходе солености воды в открытых районах Финского залива. Минимум солености здесь приходится на весенний период, а максимум — на конец зимы; в год с низкой водностью соленость изменяется в меньшей степени, чем в год с высокой водностью. Словом, — все в полном соответствии с режимом колебания речного стока.

В целом соленость воды в вершине Финского залива мористее о. Котлин падает с запада на восток, поскольку в том же направлении снижается влияние неевского и вообще речного стока. Пресная вода, как наиболее легкая, распространяется преимущественно на поверхности с востока на запад; солоноватые же воды, будучи более тяжелыми, остаются на глубине или смещаются в восточном направлении. Этим объясняется, почему соленость воды в Финском заливе повсеместно возрастает от поверхности ко дну. Преобладающее значение солености воды в заливе таково: у о. Гогланд на поверхности 4,0—4,5 ‰, у дна 5,0—6,5 ‰, у плавмаяка "Ленинград" — соответственно 1,5—2,0 и 4,0—5,0 ‰.

По мере продвижения с запада на восток вдоль Финского залива главную роль начинает играть система стоковых, градиентных, ветровых и иных течений в зоне смешения пресных речных и солоноватых морских вод. Солоноватые воды в виде наклонного клина большей частью располагаются сразу же за о. Котлин на глубинах до 15—30 м. В его верхнем 5-метровом слое соленость невелика (< 2 ‰), а на дне довольно значительная (4—6 ‰). Клин солоноватых морских вод имеет причудливое очертание в плане и по глубине. Положение его неустойчивое. В летнюю пору изогалина $S = 3$ ‰ удалена от Кронштадта в поверхностном горизонте на 50—100 км, в 10-метровом горизонте на 10—50 км. Морские воды как бы отжимаются мощным стоковым течением неевской воды. В период интенсивной циклонической деятельности (октябрь—декабрь) распределение солености по глубине в вершине Финского залива обычно достигает гомогалин-

ности, — вследствие хорошего конвективного и ветрового перемешивания. Граница раздела пресных и солоноватых вод еще более удаляется на запад. Зимой приток речных вод резко сокращается, и клин солоноватых вод смещается на восток, приближаясь вплотную к о. Котлин.

Как отмечалось, воды р. Невы заполняют мелководную Невскую губу, превращая ее в мелководный бассейн. Исключение составляют Морской канал и Северный фарватер с глубинами соответственно 12—14 и 7—9 м. Время от времени по указанным ложбинам в губу вторгаются солоноватые воды. Это имеет место преимущественно в период с мая по ноябрь при сгонных ветрах северо-восточного, восточного и юго-восточного направлений. По наблюдениям на плавмайке "Ленинград" и другим пунктам видно, что почти всегда при продолжительном ветре восточных румбов в слое 0—10 м возникает течение, направленное на запад-юго-запад, а в слое 10—20 м компенсационное течение на северо-восток и юго-восток, причем в нижнем слое соленость возрастает на 1—3 ‰, а температура падает на 2—4 °С; в поверхностном слое отмечается обратная картина.

Проникающие в Невскую губу при сгонах солоноватые воды, движущиеся по дну Морского канала, обычно достигают лишь траверза Петродворца, но иногда распространяются до Золотых ворот и даже до акватории Морского торгового порта (рис. 6.2). Число случаев (%), когда во время ежеквартальных гидрохимических съемок (ведутся с 1967 г.) соленость воды в Морском канале превышает ПДК = 0,66 ‰, составляет:

	На поверхности	На глубине 5 м	На глубине 10 м
У Кронштадта	$\frac{5}{18}$	$\frac{27}{99}$	$\frac{41}{150}$
У входа в дамбы	$\frac{4}{15}$	$\frac{15}{55}$	$\frac{19}{70}$

(в числителе — количество случаев в %, в знаменателе — число дней в году).

Ежеквартальные гидрохимические съемки выполняются, как правило, при маловетренной погоде и близком к ординату уровню воды. Поэтому приведенные данные по Морскому каналу дают лишь некоторое представление о повторяемости случаев вторжения солоноватых вод. Иная картина наблюдается у Северного фарватера. Здесь вблизи фарватера по

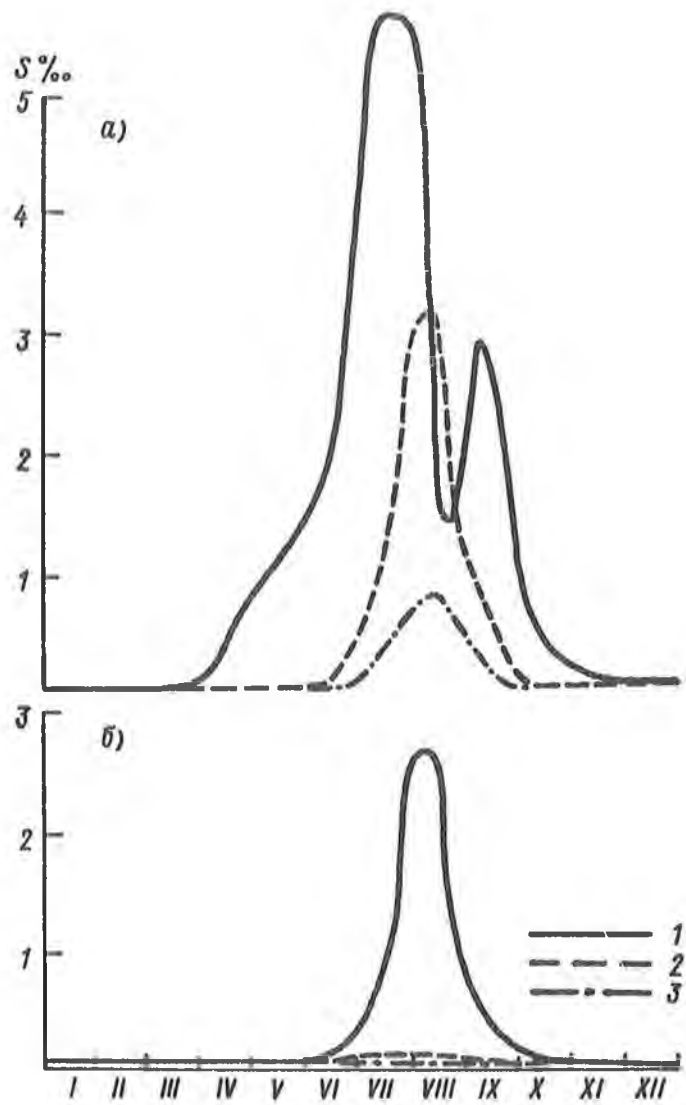


Рис. 6.2. Ход средней декадной солености воды Невской губы в Морском канале на глубине 10 м у Кронштадта (а) и у входа в дамбы (б).
1 — 1939 г., 2 — 1949 г., 3 — 1955 г.

действующему кронштадтскому крибу в течение ряда лет ежедневно определялась соленость воды. Результаты статистической обработки материалов наблюдений приведены в табл. 6.2, из которой видно, что в указанном месте ежегодно бывает 40 дней, когда соленость воды превышает ПДК (0,66 ‰). Если учесть, что зимой при наличии ледяного покрова и ранней весной случаи превышения ПДК крайне редкие, то легко установить, что в остальное время года соленость воды превосходит ПДК примерно каждый пятый день. По-видимому, в самом Северном фарватере на той же глубине повторяемость случаев превышения ПДК несколько меньше. Проникающая по фарватеру солоноватая вода заполняет полузамкнутую впадину, окаймляемую 5-метровой изобатой, где расположен криб. Мощное стоковое течение сравнительно быстро вымывает солоноватую воду из фарватера, во впадине же солоноватая вода задерживается. Нередко она поступает в упомянутую ложбину также из Морского канала по узкому подводному каньону, который огибает о. Котлин с востока и соединяет Морской канал с Северным фарватером.

Вторжение солоноватых вод в Невскую губу происходит лишь при стечении ряда благоприятных гидрометеорологических условий. К числу необходимых условий относится близкое расположение клина солоноватых вод к о. Котлин, а также наличие четко выраженного скачка плотности в зоне смещения речных и морских вод. Достаточные условия создаются при более или менее устойчивых и сильных сгонных ветрах. В период сгона благодаря обратному уклону водной поверхности в придонных слоях развиваются компенсационные течения в направлении, противоположном стоковому течению. Всем этим объясняется, почему вторжение солоноватых вод находится ближе всего к о. Котлин).

На рис. 6.3 представлен ход уровня воды и солености на различных глубинах в Морском канале против Петродворца за период с января по август 1937 г., когда вторжения солоноватых вод в губу были частыми и сильными.

Существенно, что при больших нагонах, в том числе наводнениях, повсеместно вода в губе остается пресной. Это подтверждается как многолетними наблюдениями на береговых станциях, так и экспедиционными обследованиями, выполненными до и после наводнений 1929 и 1975 гг. с максимальными уровнями у Горного института соответственно 258 и 281 см БС.

Расход солоноватых морских вод в Морском канале относительно невелик (обычно 50—100 м³/с, иногда 300—

Таблица 6.2

Число дней с различной соленостью воды
(средние многолетние значения, 1940—1942; 1967—1977 гг.)
Невской губы в Северных воротах
(в 1,5 км к северо-востоку от г. Кронштадта на глубине 3 м)

Период	Интервал ПДК, ‰						
	≤ 0,5	0,5—1,0	1,1—2,0	2,1—3,0	3,1—4,0	4,1—5,0	> 5
Зима (XII—III)	93,6	16	10	1	0,3	0,1	0
Весна (IV—V)	53,5	4	3	0,3	0,2	0,0	0
Лето (VI—VIII)	60,9	16	9	3,4	2,0	0,5	0,2
Осень (IX—XI)	63,5	17	8	2	0,8	0,1	0,1
Год	271,5	53	30	6,7	2,8	0,7	0,3

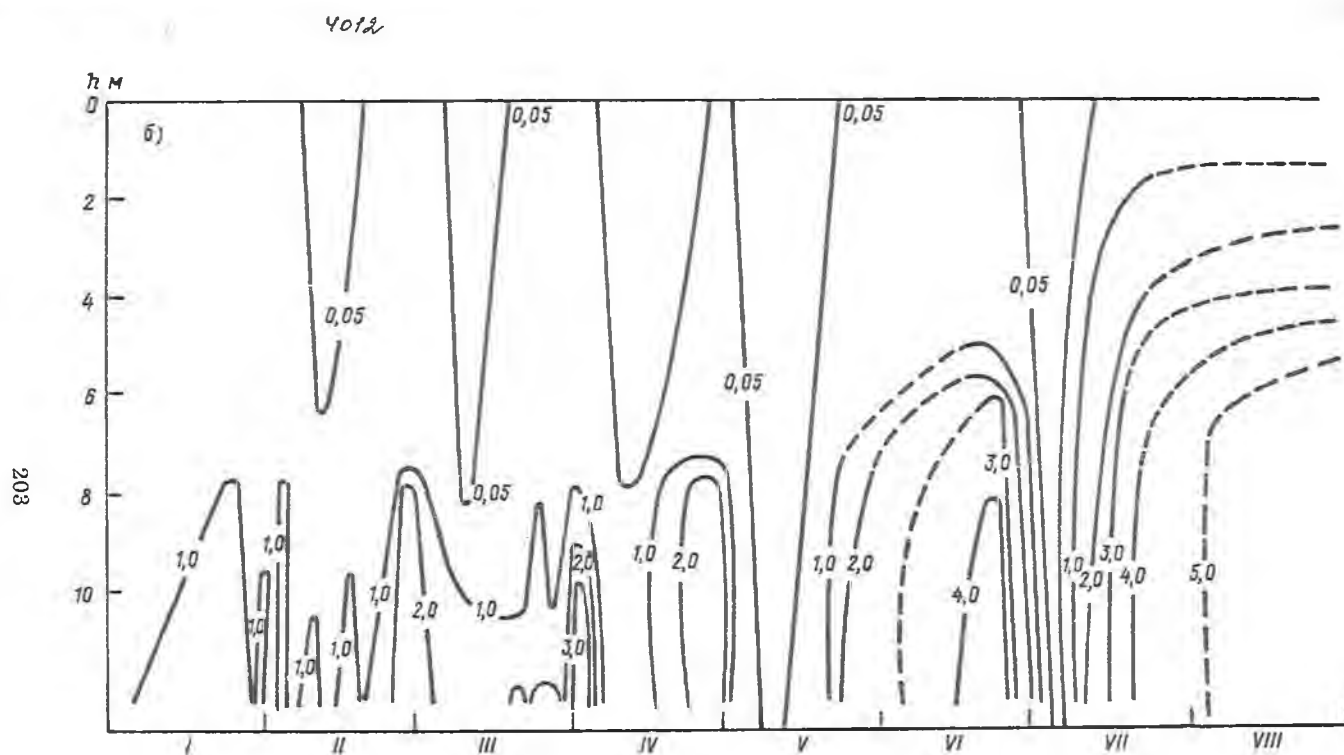
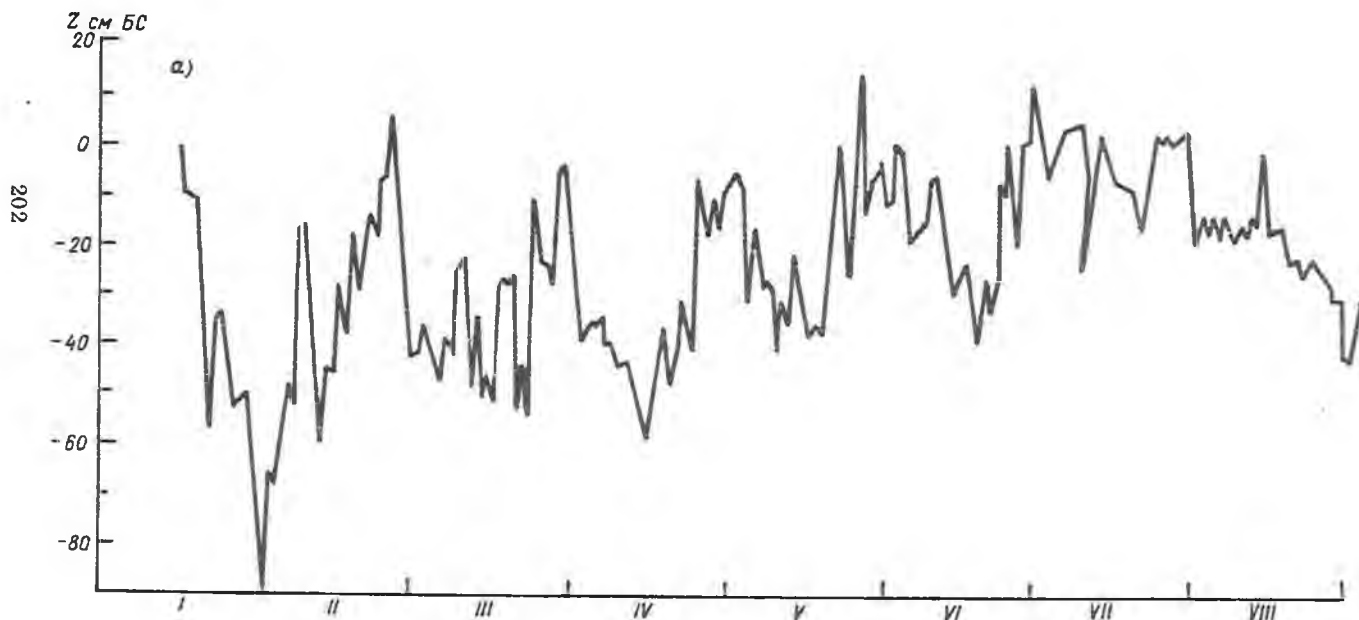


Рис. 6.3. График колебания среднего суточного уровня воды Невской губы у г. Кронштадта (а) и ежедневной солености в Морском канале на различной глубине (б) за январь—август 1937 г.
Цифры у изолиний — соленость воды, ‰.

400 м³/с), и выход этих вод за бровки канала — явление довольно редкое. Известны, однако, случаи массового выхода солоноватых вод в забровковое пространство, особенно в южную часть губы со слабым стоковым течением. Иногда это происходит через Золотые ворота, а иногда непосредственно из канала. Соленость воды на Южно-Лахтинской отмели и в районе Стрельны может при этом возрасти до 2,5—2,7 ‰.

По ориентировочным подсчетам ежегодно в Невскую губу через Морской канал и Северный фарватер вторгается около 2 км³ солоноватой морской воды с соленостью $S > 1$ ‰, т.е. 0,7 % суммарного поступления со стороны моря.

В заключение отметим, что неоднократные попытки установить количественные зависимости между соленостью и расходом воды, с одной стороны, и обуславливающими факторами, с другой, не дали положительных результатов. Сложная природа явления остается до конца не познанной. По-видимому, преобладающее влияние имеют плотностные течения, наблюдения же за плотностью воды не производятся.

Переходя к проектным условиям, оценим вначале возможные изменения минерализации ладожской, а, следовательно, и невской воды.

С изъятием части речного стока сократится поступление различных солей в Ладожское озеро, но уменьшится и сток воды из озера. В настоящее время в средний по водности год в озеро поступает 4,83 млн. т солей (стр. 192). С отъемом стока воды из бассейна р. Свири в размере, например, 15 км³/год приток солей в озеро составит (при минерализации свирской воды 36 мг/л)

$$4,83 - \frac{15 \cdot 10^9 \cdot 36}{10^6 \cdot 10^6} = 4,83 - 0,54 = 4,29 \text{ млн. т/год,}$$

а минерализация воды в истоке р. Невы

$$\frac{4,29 \cdot 10^6 \cdot 10^9}{(78,9 - 15,0) \cdot 10^9 \cdot 10^3} = \frac{4290}{64} = 67 \text{ мг/л}$$

против 61 мг/л в 1968—1976 гг. Увеличение минерализации (67 — 61 = 6 мг/л) незначительное. Вода в р. Неве по-прежнему останется слабоминерализованной. Этот вывод тем

более относится к варианту отъема стока в размере 7,5 км³/год.

При оценке режима солености воды в проектных условиях будем различать две ситуации: 1 -- осуществляются переброски стока, защитные сооружения не возводятся; 2 -- осуществляются переброски стока, защитные сооружения возводятся.

С и т у а ц и я 1. С изъятием части невского стока повысится соленость воды в зоне смешения речных и морских вод. Клин солоноватых морских вод приблизится к о. Котлин. Частота вторжения солоноватых вод в губу несколько возрастет. Из табл. 6.3 видно, как именно изменится соленость воды у плавмаяка "Ленинград" (в 11 км к северо-западу от о. Котлин). Помещенные в табл. 6.3 значения соле-

Таблица 6.3

Средняя соленость воды (‰) за период май—октябрь у плавмаяка "Ленинград" на глубине 10 м

Отъемы стока, км ³ /год	Обеспеченность годового стока р. Невы, %			
	25	50	75	90
0	2,4	2,7	3,0	3,4
7,5	2,6	3,0	3,3	3,4

ности S ‰ установлены по зависимости $S = f(Q_{\text{Нева}})$ (не приводится), уравнение которой

$$S = 5,25 - 1,03 \frac{Q_{\text{Нева}}}{10^3}, \quad (6.2)$$

при известных средних годовых расходах $Q_{\text{Нева}}$ различной обеспеченности в естественных условиях (отъемы 0 км³/год) и при изъятии стока в размере 7,5 км³/год. Таким образом, у плавмаяка "Ленинград" с отъемом стока 7,5 км³/год соле-

ность воды возрастет в среднем на 0,3 ‰.

Для Северных и Южных ворот, и вообще для Невской губы зависимость между соленостью воды и расходом р. Невы $S = f(Q_{\text{Нева}})$ имеет иной вид, чем для Финского залива. Точки располагаются в треугольной области (рис. 6.4). Нижняя огибающая совпадает с осью абсцисс ($S = 0$); верхняя огибающая представляет собой наклонную линию, ее уравнение, например,

для Морского канала у Кронштадта на глубине 10 м

$$S_{\max} = 8,50 - 0,13 \frac{Q_{\text{Нева}}}{10^3}, \quad (6.3)$$

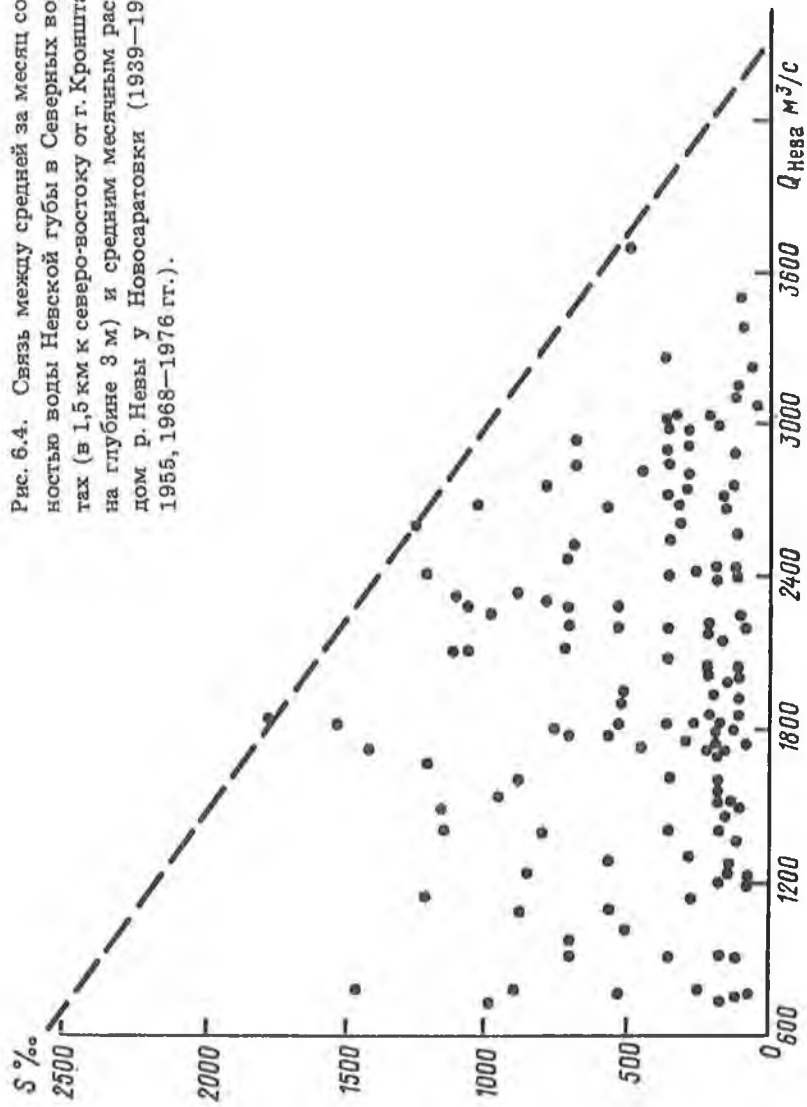
для Северного фарватера в районе Кронштадтского крива на глубине 3 м

$$S_{\max} = 2,90 - 0,64 \frac{Q_{\text{Нева}}}{10^3}. \quad (6.4)$$

Аналогичным образом выглядит зависимость между числом дней за сезон, когда соленость воды превышает ПДК = 0,66 ‰, и средним за сезон расходом воды р. Невы. Чем больше расход воды, тем меньше диапазон колебания солености S и числа дней превышения ПДК. В пределе при очень большом расходе р. Невы проникновение солоноватых морских вод в Невскую губу должно почти вовсе прекратиться. Для Морского канала у Кронштадта на глубине 10 м, согласно уравнению (6.3), это произойдет при расходе $6550 \text{ м}^3/\text{с}$, а для Северного фарватера в районе крива на глубине 3 м, согласно (6.4), при расходе $4540 \text{ м}^3/\text{с}$.

Чтобы оценить повторяемость различных значений солености воды, было прибегнуто к построению условной кривой обеспеченности отношений S/S_{\max} , т. е. $P(S/S_{\max})$ (кривая не приводится). Безусловная же кривая обеспеченности $P(S)$ получена умножением ординат условной кривой $P(S/S_{\max})$ на величину S_{\max} при заданном расходе $Q_{\text{Нева}}$. В частности, при отъеме $7,5 \text{ км}^3/\text{год}$ средний многолетний расход $Q_{\text{Нева}} = 2280 \text{ м}^3/\text{с}$, и для Морского канала у Кронштадта на глубине 10 м, согласно уравнению (6.3), фик-

Рис. 6.4. Связь между средней за месяц солесностью воды Невской губы в Северных воротах (в 1,5 км к северо-востоку от г. Кронштада на глубине 3 м) и средним месячным расходом р. Невы у Новосаратовки (1939—1942, 1955, 1968—1976 гг.).



сированное предельное значение $S_{\max} = 5,5 \text{ ‰}$.

Расчеты, выполненные по описанной методике, показывают, что с изъятием стока в количестве $7,5 \text{ км}^3/\text{год}$ число дней в году, при солености, превышающей ПДК ($0,66 \text{ ‰}$), возрастет следующим образом:

— в Морском канале у Кронштадта на глубине 10 м — со 150 до 160 дней;

— в Морском канале у входа в дамбы на глубине 10 м — с 70 до 80 дней;

— в Северном фарватере в районе крива на глубине 3 м — с 40 до 49 дней.

Некоторое увеличение солености воды в вершине Финского залива будет сопровождаться уменьшением концентрации растворенного кислорода (в основном в придонных слоях). Все вместе взятое приведет к частичному сокращению площадей, где нерестятся рыбы наиболее ценного пресноводного комплекса (судак, лещ, окунь, щука, корюшка и пр.). Заметим, что рыбы указанного комплекса обычно нерестятся в районах, где соленость в придонных слоях не более $1,5\text{--}2,0 \text{ ‰}$.

С и т у а ц и я 2. С возведением комплекса сооружений по защите Ленинграда от наводнений положение существенным образом изменится. Поперечное сечение Финского залива в створе сооружений уменьшится с 64000 до 9610 м^2 . Средняя скорость течения в створе при расходе воды р. Невы, равном $2500 \text{ м}^3/\text{с}$, соответственно возрастет с 4 до 26 см/с , в южном судопропускном отверстии на Морском канале — с 10 до 28 см/с , в северном водопропускном отверстии на Северном фарватере — с 7 до 36 см/с . В периоды сгонов с устойчивым низким уровнем $-30, -60 \text{ см БС}$, когда солоноватые воды обычно проникают в губу, скорость течения в южном судоходном отверстии будет еще больше ($30\text{--}40 \text{ см/с}$). При таких скоростях течения в случаях сгонов, как показывают натурные наблюдения (1968—1976 гг.), на Морском канале придонные компенсационные течения в сторону губы бывают крайне редко, и соленость воды обычно не превышает $0,3\text{--}0,5 \text{ ‰}$.

Следовательно, с возведением защитных сооружений существенно уменьшится поступление солоноватых морских вод из Финского залива в Невскую губу, но количественную оценку пока дать затруднительно.

Выводы

Приводимые ниже выводы касаются в основном тех изменений, которые произойдут с водным, ледовым и отчасти химическим режимом р. Невы и Невской губы при переходе от естественных к измененным условиям, т. е. при возведении комплекса сооружений по защите Ленинграда от наводнений и при отъемах части речного стока из неевского бассейна в южные засушливые районы страны.

1. Невская губа представляет собой мелководный водоем, часть единой водной системы: Ладожское озеро — р. Нева — Невская губа — Финский залив. В то же время, благодаря наличию в Северных и Южных воротах многочисленных естественных и искусственных преград в виде отмелей, фортов, banquetов, ряжей и пр., гидрологический режим Невской губы определяется главным образом воздействием р. Невы и в меньшей мере влиянием Финского залива.

2. Водохозяйственный комплекс Невской губы чрезвычайно сложный. По губе пролегают оживленные трассы речного и морского флота. Она служит приемником загрязненных сточных вод и источником коммунального и промышленного водоснабжения. В губе находятся нерестилища проходных и полупроходных рыб; здесь активно ведется рыбный промысел. Берега губы испытывают большую рекреационную нагрузку. Добываемый в подводных карьерах грунт используется для намыва низких прибрежных территорий. Наконец, губа постепенно превращается во внутригородской водоем; ее берега обрамляются набережными и эспланадами, застраиваются жилыми и общественными зданиями и пр.

3. Хозяйственная деятельность человека, если не считать качества воды, пока оказала малое влияние на р. Неву и Невскую губу. Положение заметно изменится после реализации проекта защиты Ленинграда от наводнений, проекта переброски части речного стока из неевского бассейна на волжский склон, наконец, проекта строительства централизованных и локальных очистных сооружений.

4. Водный режим р. Невы отличается высокой степенью зарегулированности стока (главным образом благодаря наличию в бассейне таких крупных озер, как Ладожское, Онежское, Сайма и Ильмень). С реализацией намеченных мероприятий по изъятию части стока, включающих и строительство неевского регулирующего гидроузла, распределение стока

станет еще более равномерным. В частности, минимальный средний месячный расход воды 95 %-ной обеспеченности увеличится с 940 м³/с в естественных условиях до 1300 м³/с при отъемах 7,5 км³/год.

5. Уровенный режим Невской губы со временем не претерпит изменений, кроме случаев больших подъемов воды, сопровождающихся наводнением. При угрозе наводнения отверстия в защитном комплексе будут закрываться, и тогда в огражденной акватории Невской губы за счет стока р. Невы и воздействия западного ветра на водную поверхность будут наблюдаться так называемые остаточные наводнения, которые, однако, не представляют опасности для Ленинграда. В частности, в устье р. Невы у Горного института максимальный уровень остаточного наводнения повторяемостью 1 раз в 100 лет составляет 190 см БС.

Максимальные уровни Финского залива перед защитными сооружениями будут выше, чем в естественных условиях: например, в нижнем бьефе сооружения для максимума повторяемостью 1 раз в 1000 лет -- на 45 см. Указанное повышение максимальных уровней не вызовет затоплений Сестрорецка, Зеленогорска, Соснового Бора и других населенных пунктов на берегах залива.

6. В естественных условиях ветровые волны из Финского залива почти не проникают в Невскую губу. Этому препятствуют отмели, форты, ряжи и другие преграды в Северных и Южных воротах. Ветровое волнение развивается в самой губе. Подобное положение сохранится и после постройки защитных сооружений. Ожидается ослабление волнения лишь в пределах ветровой тени от сооружения в полосе шириной 500--800 м.

7. Замерзание Невской губы обычно происходит от берегов к центру губы. К концу зимы ледяной покров бывает самым мощным у берегов (обычно 50--70 см) и самым тонким на фарватерах неевского бара (10--20 см). Весной фронт вскрытия в Финском заливе продвигается одновременно в двух противоположных направлениях -- с востока на запад и с запада на восток. В Северных и Южных воротах длительное время сохраняется припай, поэтому лед из губы в залив, как правило, не выносятся.

Из-за сброса больших масс теплых сточных вод в зимний период у выпусков централизованных очистных сооружений будут иметь место полыньи. Большую часть времени (80--90 %) длина полыньи будет изменяться от 2 до 10 км у северного выпуска и от 1 до 3 км -- у южного.

8. Время от времени по дну Морского канала и Северного

фарватера в Невскую губу вторгаются солоноватые морские воды. Это происходит преимущественно в летне-осенний период при продолжительных и сильных сгонах. Отъемы стока приведут к более частому вхождению солоноватых вод. В частности, в Морском канале у Кронштадта на глубине 10 м в случае отъемов стока $7,5 \text{ км}^3/\text{год}$ число дней в году, когда соленость $S > 0,66 \text{ ‰}$, увеличится со 150 до 160. С постройкой же защитных сооружений частота вхождения солоноватых вод резко сократится.

9. Проблема отъема части стока из Невского бассейна в ее начальной стадии совпадает с интересами одних отраслей народного хозяйства (водный транспорт, борьба с наводнениями) и не совпадает с интересами других отраслей (гидроэнергетика, рыбное хозяйство). Чтобы смягчить отрицательные последствия и усилить положительный эффект необходимо на последующих стадиях научных исследований разработать детальные правила управления водными ресурсами неевского бассейна (при отъемах $7,5 \text{ км}^3/\text{год}$ и наличии неевского регулирующего гидроузла в истоке реки), а именно:

- сохранить без изменения гарантированный (на 95 %) навигационный расход воды р. Невы, равный $2000 \text{ м}^3/\text{с}$;

- увеличить минимальный средний месячный расход воды р. Невы 95 %-ной обеспеченности с $940 \text{ м}^3/\text{с}$ в естественных условиях до $1300 \text{ м}^3/\text{с}$ в новых (для поддержания благоприятных санитарных условий в рукавах неевской дельты и в Невской губе в наиболее критический маловодный период);

- не уменьшать водность р. Невы в очень маловодные годы с объемом стока $W < 50 \text{ км}^3/\text{год}$ (т. е. с обеспеченностью 95 % для сохранения биологической продуктивности восточной части Финского залива);

- для ликвидации зажорных наводнений в Ленинграде сократить расход воды в р. Неве в период замерзания до следующих размеров:

Температура воздуха, °С . . .	-4...-6	-6...-8	-8...-10
Расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$	1400—1600	1600—1800	1800—2000

- придать зарегулированному гидрографу стока р. Невы за безледоставный период очертание растянутого плавного половодья с максимумом в июле—августе, когда дельта Невы и Невская губа испытывают самую большую рекреационную нагрузку;

- в общем сохранить естественный диапазон колебания уровней Ладожского и Онежского озер, но уменьшить повторяемость и продолжительность стояния очень высоких уровней

ней, которые сопровождаются наводнениями на побережье указанных озер.

Приведенные выше рекомендации в части выработки правил управления водными ресурсами относятся к самому трудному в экологическом отношении варианту отъема стока в размере $7,5 \text{ км}^3/\text{год}$ и наличии неевского регулирующего гидроузла в истоке реки. Его реализация требует дополнительных исследований и станет возможной лишь после выполнения намеченных крупных водоохранных мероприятий в неовско-ладожском бассейне;

10. От дальнейшего наращивания отъема стока из неовского бассейна (сверх $7,5 \text{ км}^3/\text{год}$) и переброски его на волжский склон по трассе Волго-Балта следует воздержаться, главным образом из-за невозможности предвидеть все отрицательные экологические последствия. Кроме того, со временем может оказаться более целесообразным подача части стока в бассейн Днепра через р. Ловать и верховье р. Западной Двины или в Верхнюю Волгу через реки Мсту и Тверцу. Этим самым будет решена и проблема осушения обширной сильно заболоченной Приильменской низменности.

Список литературы

1. Агалаков С. С. Защита Ленинграда от наводнений.—Труды Гидропроекта, 1977, № 56, с. 143—156.
2. Агалаков С. С., Григорьев Ю. А., Складнев М. Ф. Комплекс сооружений защиты г. Ленинграда от наводнений. Научные исследования по обоснованию комплекса.—Известия ВНИИГ, 1979, т. 132, с. 3—11.
3. Анапольская Л. Е. Режим скоростей ветра на территории СССР.—Л.: Гидрометеиздат, 1961. —200 с.
4. Ардашева Г. В. Распределение расхода воды р. Невы по рукавам и каналам ее дельты.—Труды ГГИ, 1971, вып. 193, с. 32—40.
5. Бельский Н. И. Синоптические условия ленинградских наводнений.—Труды ГОИН, 1954, вып. 27, с. 43—80.
6. Берг В. А. Наводнение в устье р. Невы 23 сентября 1924 г.—В кн.: Исследование р. Невы и ее бассейна. Л., 1929, вып. 4, с. 32—44.
7. Браславский А. П. Расчет ветровых волн.—Труды ГГИ, 1952, вып. 35 (85), с. 94—158.
8. Воронков П. П., Скакальский Б. Г., Зубарева В. И. Основные черты формирования химического состава вод Ладожского озера.—Труды ГГИ, 1978, вып. 249, с. 5—47.
9. Гейнц Е. А. Нивелировка Васильевского острова и Петербургской стороны 1890 и 1891 гг. (Сравнение нулей водомерных реек на Большой Неве и марок наводнений 7 ноября 1824 г.).—СПБ, 1908. —56 с.
10. Гидрохимия и гидрооптика Ладожского озера.—Труды Лаборатории озераведения АН СССР, 1967, р. 23. —217 с.
11. Гидрология устьевой области Невы /Под ред. С. С. Байдина.—М.: Гидрометеиздат, 1965 г. —383 с.
12. Гиппинг А. И., Кунин А. А. Карты и планы Невы и Ниеншанца.—СПБ, 1909. —26 с.
13. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей (Изд. 4-е).—М.: Наука, 1965. —400 с.
14. Дерюгин К. М. Гидрологический очерк Невской губы.—Труды ГОИН, 1947, вып. 1 (47), с. 63—82.
15. Дерюгин А. Г., Лазаревская В. И. Сток льда р. Невы.—Труды ГГИ, 1971, вып. 184, с. 94—105.
16. Драбкин В. В., Померанец К. С. Зимние наводнения в Ленинграде и их исследование эмпирическим и гидродинамическим методами.—Вестник ЛГУ, 1978, № 12, вып. 2, с. 128—139.
17. Заварина М. В. Расчетная скорость ветра на высотах нижнего слоя атмосферы.—Л.: Гидрометеиздат, 1971. —164 с.
18. Знаменский В. А. Лабораторные исследования гидродинамического и санитарного состояния Невской губы.—Труды ГГИ, 1966, вып. 136, с. 129—146.

19. Знаменский В. А. Гидрологические процессы и их роль в формировании качества воды.—Л.: Гидрометеиздат, 1981. —248 с.
20. Иванов К. Е., Колокольцева Н. А. Динамика ледостава и зажоров льда на реке Неве.—Труды ГГИ, 1950, вып. 6, с. 140—195.
21. Караушев А. В. Сгонно-нагонные явления на водохранилищах и озерах.—Л.: Гидрометеиздат, 1960. —215 с.
22. Караушев А. В. Проблемы динамики естественных водных потоков.—Л.: Гидрометеиздат, 1960. —390 с.
23. Каратыгин П. Л. Летопись Петербургских наводнений 1703—1879 гг.—СПб., 1889. —87 с.
24. Кривошей М. И., Рождественский В. Г., Тарасова Р. Б. Расчет ветровых волн на водохранилищах.—Труды ГГИ, 1977, вып. 246, с. 113—122.
25. Ляхницкий В. Е. Исследования устья реки Невы и вершины Финского залива в отношении поргостроения, произведенные в 1919—1922 гг.—Труды отдела водного строительства. Материалы по проектированию, 1923, т. 65. —273 с.
26. Межзональное перераспределение водных ресурсов (гидрологические расчеты и прогностические оценки) /Под ред. А. А. Соколова и И. А. Шикломанова.—Л.: Гидрометеиздат, 1980. —376 с.
27. Мирзаев А. Я. Выбор оптимальной площади сечения в проекте защиты Ленинграда от наводнений.—Известия ВНИИГ, 1979, т. 132, с. 47—52.
28. Моносов М. Л., Бессан Г. Н., Садков В. М. Влияние сгонно-нагонных колебаний уровня на режим солености Невской губы.—Сб. работ ЛГМО, 1981, вып. 12, с. 137—142.
29. Мордухай-Болтовской А. А. Уровни некоторых ленинградских наводнений XVIII и начала XIX веков.—Изв. ГГИ, 1932. № 4, с. 14—35.
30. Моносов М. Л., Моносов Л. М., Павлихин Н. В. Ледовые условия в период зимних наводнений в Ленинграде.—Сб. работ ЛГМО, 1981, вып. 12, с. 102—108.
31. Нежиховский Р. А. Гидрологические расчеты и прогнозы при эксплуатации водохранилищ.—Л.: Гидрометеиздат, 1976. —192 с.
32. Нежиховский Р. А. Река Нева, Изд. 3-е.—Л.: Гидрометеиздат, 1973. —201 с.
33. Нежиховский Р. А. Расчет максимальных уровней воды р. Невы и Невской губы редкой повторяемости.—Труды ГГИ, 1971, вып. 193, с. 3—31.
34. Нежиховский Р. А., Ардашева Г. В. Расчет максимальных зазорных уровней р. Невы.—Труды ГГИ, 1970, вып. 179, с. 164—169.
35. Нежиховский Р. А. Река Нева и Невская губа.—Л.: Гидрометеиздат, 1981. —110 с.
36. Николаев В. С. Параметры ветровых волн в вершине Финского залива.—Сб. работ ЛГМО, 1981, вып. 12, с. 66—70.
37. Носков В. Г. О моделировании наложений максимального уров-

ня сейш, ветрового нагона и длинной волны в Невской губе.—Метеорология и гидрология, 1978, № 11, с. 109—111.

38. Помыткин Б. А. Сейшевые колебания уровня Балтийского моря и их влияние на наводнение в дельте р. Невы.—Изв. ВГО, 1977, т. 109, с. 143—150.

39. Практические рекомендации по расчету ветровых сгонов и нагонов на водохранилищах. Валдай: Отпечатано на множит. аппарате. ГГИ, 1969. —40 с.

40. Пясковский Р. В., Померанец К. С. Наводнения: математическая теория и предсказание.—Л.: Гидрометеиздат, 1982. —176 с.

41. Расплетина Г. Ф., Ульянова Д. Э., Шерман Э. Э. Гидрохимия Ладожского озера.—Труды Лаборатории озероведения АН СССР, 1967, т. 23, с. 160—172.

42. Рождественский А. В. Оценка точности кривых распределения гидрологических характеристик.—Л.: Гидрометеиздат, 1977. —272 с.

43. Руководство по гидрологическим расчетам при проектировании водохранилищ.—Л.: Гидрометеиздат, 1983. —284 с.

44. Руководство по определению расчетных гидрологических характеристик.—Л.: Гидрометеиздат. —111 с.

45. Указания по определению расчетных гидрологических характеристик, СН-435-72.—Л.: Гидрометеиздат, 1972. —17 с.

46. Фрейдзон А. И., Бельский Н. И., Попков А. А. Примеры расчета подъема уровня воды в устье Невы.—Труды ГОИН, 1960, вып. 56, с. 65—79.

47. Фрейдзон А. И. О расчете высоты подъемов в устье Невы.—Труды ГОИН, 1962, вып. 69.

48. Шугрин С. М. Численный расчет неустановившегося движения воды в системах речных русел или каналов.—Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук, 1969, № 3, вып. 1. —25 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Координаты кривых площадей поперечных сечений р. Невы (площадь, м²)

Расстояние от устья, км	Отметки водной поверхности, см БС										
	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
-2,5	14200	21300	28200	35300	42200	49200	56700	64000	71200	78400	85700
0	8850	10100	11300	12600	13800	15400	17800	20600	23300	26100	28800
2	5760	6560	7360	8160	8960	10100	13100	17700	22300	26900	31500
4	6610	7290	7960	8640	9310	10200	13000	17400	21600	26100	30500
6	4920	5510	6100	6700	7300	7800	10300	14700	19100	23500	27900
8	4220	4420	4640	4840	5040	5240	5440	5640	5860	6060	6260
10	6140	6380	6600	6840	7060	7300	7520	7740	7980	8200	8440
12	3600	3800	4000	4200	4400	4600	4800	5000	5200	5400	5600
14	4540	4780	5020	5280	5540	5800	6040	6300	6540	6800	6840
16	4060	4320	4660	4840	5100	5360	5600	5860	6120	6400	6640
18	3240	3440	3620	3820	4000	4200	4400	4560	4760	4940	5140
20	3520	3660	3800	3940	4100	4240	4400	4530	4680	4820	4960
22	2260	2420	2600	2760	2940	3100	3280	3460	3620	3800	3960
24	2980	3180	3380	3580	3780	3980	4180	4380	4180	4780	5000
26	2500	2700	2900	3100	3300	3500	3700	3900	4100	4300	4500
28	2740	2960	3180	3380	3600	3800	4020	4220	4440	4640	4860
30	2640	2840	3040	3220	3440	3640	3840	4040	4240	4440	4640
32	2560	2720	2900	3040	3220	3400	3560	3720	3900	4040	4200
34	3940	4220	4500	4780	5060	5340	5600	5900	6180	6460	6740
36	2400	2620	2880	3140	3380	3620	3880	4120	4380	4620	4860

Продолжение приложения 1

Расстояние от устья, км	Отметки водной поверхности, см БС										
	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
38	1840	2000	2140	2300	2460	2620	2780	2940	3100	3260	3420
40	2700	2740	2790	3020	3400	3720	4020	4320	4620	4920	5220
42	1960	2200	2450	2750	3050	3320	3620	3920	4220	4520	4820
43	2130	2370	2610	2860	3100	3350	3600	3900	4100	4350	4600
44	2170	2640	3100	3620	4150	4690	5230	5770	6310	6850	7390
45	1200	1360	1520	1730	1930	2080	2300	2500	2700	2900	3100
46	1510	1640	1770	1910	2050	2200	2340	2500	2660	2800	2960
47	1230	1350	1470	1630	1790	1850	2100	2150	2260	2400	2520
48	1630	1760	1910	2050	2200	2410	2500	2660	2840	3000	3140
49	2930	3080	3240	3400	3570	3760	3940	4160	4400	4600	4820
50	1880	2170	2500	2860	3220	3610	4000	4400	4800	5200	5620
51	1150	1220	1300	1380	1470	1570	1680	1780	1900	2020	2140
52	2220	2380	2540	2700	2810	3040	3230	3460	3520	3700	3860
53	2540	2700	2850	3080	3290	3390	3490	3660	3840	4020	4200
54	1540	1860	2210	2560	2950	3300	3700	4100	4500	4860	5260
55	2560	2820	3090	3360	3640	3920	4210	4510	4800	5100	5400
56	1910	2110	2320	2540	2760	2990	3230	3500	3740	4000	4240
57	3210	3420	3630	3850	4070	4290	4520	4720	4940	5160	5400
58	2180	2390	2610	2840	3070	3310	3550	3900	4100	4340	4600
59	1910	2050	2200	2350	2510	2670	2830	3050	3180	3340	3500
60	1970	2090	2220	2350	2480	2630	2770	2920	3060	3220	3360
61	2050	2200	2360	2520	2680	2840	3020	3260	3340	3540	3700

Продолжение приложения 1

Расстояние от устья, км	Отметки водной поверхности, см БС										
	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
62	2960	3180	3390	3610	3840	4070	4310	4560	4800	5050	5250
63	2980	3210	3440	3680	3920	4160	4410	4650	4900	5150	5410
64	2440	2690	2960	3230	3510	3800	4110	4480	4800	5140	5480
65	2450	2750	3060	3370	3690	4020	4370	4730	5060	5470	5870
66	2330	2580	2840	3100	3370	3650	3940	4240	4600	4920	5250
67	2040	2280	2520	2770	3030	3290	3560	3840	4160	4450	4750
68	2040	2230	2430	2640	2860	3080	3310	3540	3800	4040	4270
69	1930	2150	2370	2600	2830	3070	3320	3570	3880	4160	4440
70	1140	1380	1630	1880	2140	2400	2670	2950	3240	3540	3840
71	862	1170	1490	1820	2150	2490	2840	3200	3600	3970	4350
72	369	544	769	1080	1500	1980	2500	3020	3640	4200	4750
73	360	480	600	800	980	1180	1390	1600	1900	2200	2500
74	400	600	800	1100	1400	1700	2100	2500	2850	3200	3600
74,5	170	270	360	480	600	720	1000	1600	2400	3300	4400

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Максимальные уровни воды р. Невы у Горного института
при подъемах 150 см и более над ординаром*

Год	Дата	Уровень, см БС	Год	Дата	Уровень, см БС
1703	30, 31.VIII	211	1752	5.XI	204
1705	15, 16.X	161		6.XI	234
1706	20.IX	262		8.XI	204
1715	16.XI	211		22.XII	234
1721	16.XI	265	1754	18, 19.V	173
	21.XI	211	1756	10.X	242
1723	13.X	272	1757	27.X	204
	19.XI	211	1758	29.XI	166
1724	12.XI	211	1759	17.X	206
1725	16.XI	216	1760	19.X	181
1726	29.IX	161	1762	8.XI	199
	12.XI	270		21.XII	199
1727	2.X	161	1763	19.X	219
1728	14.VIII	161		9.XII	183
1729	14.X	161	1764	17.XI	168
	23.X	237		29.XI	244
1732	26.IX	161		3.XII	244
1733	17.IX	161	1765	8.IX	166
	9.X	161		5, 7.XII	189
	11.XI	161	1766	30.XI	163
	23.XII	161	1767	27.VI	176
1735	9.III	161		10.X	186
1736	21.IX	261		20.X	168
	24.XII	161		17.XI	171
	30.XII	161	1771	5.XI	166
1737	8.I	161		10.XI	173
	17.XII	161		19.XI	163
1740	23.IX	177	1773	11.I	178
1741	14.I	161		9.VIII	181
	15.X	161		25.X	196
1743	12.XII	161	1775	26.VI	178
	13.XII	161	1777	27.VIII	173
	17.XII	161		21.IX	321
1744	28.VIII	234		6.X	168
	21.IX	211		27.X	178
1752	2.XI	280	1781	28.X	201

4012

Продолжение приложения 2

Год	Дата	Уровень, см БС	Год	Дата	Уровень, см БС
1788	7.X	211	1866	16.XI	161
	10.X	237		19.XI	163
1797	13.IX	161	1868	13.XII	161
	5.XII	161	1869	13.IX	176
1801	6.XI	161		18.X	168
1802	28.IX	224		30.X	168
1822	4.II	254	1872	23.V	181
1824	19.XI	421		7.XI	183
1835	6.II	178	1873	1.XI	242
1839	11.IX	181		11.XI	>161
1840	18.IX	161	1874	2.VIII	161
1841	11.X	171		5.IX	201
1843	13.X	196		13.IX	176
	17.XII	168		30.X	161
1847	25.X	171		1.XI	178
1848	21.XI	183		10.XI	252
1851	26.X	171		8.XII	237
	1.XI	194	1878	20.IX	144
1852	X	>161	1879	4.IX	165
1854	5.IX	183		5.IX	221
	5.X	194		23.X	189
	27.X	196	1880	7.VI	163
1857	8.XII	168	1881	15.XI	174
1859	10.VIII	161	1882	7.I	167
1863	27.I	161	1883	8.X	157
	28.I	196	1884	29.X	187
	6.V	189		9.XII	161
	20.X	227	1885	11.VI	167
	14.XI	183		5.XII	162
	9.XII	194	1886	18.XII	155
	23.XII	163	1887	2.XII	173
	26.XII	161	1888	30.X	198
1864	22.VIII	161	1889	19.XII	159
1865	31.V	224	1890	29.VIII	252
	1.VI	161		30.IX	168
	12.VII	186		3.X	193
1866	31.I	229	1891	III	101
	7.X	166	1892	20.IX	(77)
	15.XI	181	1893	X	159

Продолжение приложения 2

Год	Дата	Уровень, см БС	Год	Дата	Уровень, см БС
1894	2.XI	130	1918	24.VIII	224
1895	14.XI	237		22.XI	165
	17.XI	164	1919	25.XI	161
1896	8.X	209	1920	25.VII	135
	7.XI	174	1921	4.X	211
1897	16.XI	243		22.X	193
1898	15.IX	169		2.XI	163
	8.XII	240	1922	24.XI	228
1899	20.XI	179	1923	25.XI	187
	23.XI	181	1924	23.IX	380
	26.XI	164	1925	3.I	225
	27.XI	168		9.X	170
1900	22.XII	151	1926	26.XII	137
1901	17, 25.XI	150	1927	2.XI	188
1902	15.VIII	132	1928	10.II	180
1903	8.II	166	1929	15.X	258
	25.XI	269	1930	21.III	197
1904	28.XII	136		13.XI	163
1905	9.IX	162	1931	21.X	203
	11.IX	210	1932	8.I	239
1906	29.I	146		21.VIII	170
1907	25.VIII	134	1933	5.VIII	177
1908	8.IX	116		11.VIII	208
1909	21.XII	181	1933	12.X	191
1910	12.I	164	1934	4.X	169
1911	6.XI	171	1935	8.X	239
1912	3.X	177	1936	24.XII	160
1913	18.III	175	1937	9.IX	237
	30.XI	173	1938	14.IX	233
	1.XII	180		25.XI	189
	5.XII	185	1939	13.XI	151
1914	27.I	213	1940	15.XI	167
	30.IV	209	1941	16.IX	102
1915	14.XII	130	1942	25.X	174
1916	13.X	201		24.XI	216
	16.X	174	1943	17.XI	157
1917	27.IX	199	1944	1.IX	170
	28.XI	181	1945	10.X	126
	30.XI	244	1946	15.VIII	130

Продолжение приложения 2

Год	Дата	Уровень, см БС	Год	Дата	Уровень, см БС
1947	18.I	137	1967	14.X	171
1948	3.X	212		18.X	245
	22.X	216		19.X	177
	23.X	196	1968	30.X	172
1949	28.X	189	1969	11.XI	167
1950	29.IX	173	1970	14.XI	119
1951	2.XII	175	1971	22.XII	162
	7.XII	195	1972	14.XII	151
1952	26.VIII	169	1973	10.X	179
1953	2.XII	157		20.XII	240
1954	14.X	222	1974	17.XI	242
	12.XI	198	1975	6.I	216
1955	15.X	293		11.I	164
	30.XI	182		29.IX	281
1956	24.X	146		23.XII	176
1957	25.X	170		31.XII	187
1958	18.V	168	1976	1.I	163
1959	26.X	157		8.I	167
1960	1, 9.XII	102	1977	7.IX	231
1961	31.III	189	1978	15.XI	204
	7.XII	171		19.XI	187
1962	13.IX	175		20.XI	204
1963	17.XI	203		22.XI	200
1964	14.XII	214	1979	13.IX	198
1965	8.VIII	105	1980	30.XII	167
1966	8.VIII, 12.IX	145			

* За период непрерывных наблюдений по самописцу (1878–1980 гг.) указаны также все годовые максимумы Z_{\max} (даже если $Z_{\max} < 150$ см над ординаром).

Оглавление

Предисловие	4
1. Общие сведения	5
1.1. Бассейн р. Невы	5
1.2. Ладожское озеро	8
1.3. Река Нева	9
1.4. Невская губа	12
1.5. Финский залив и Балтийское море	16
1.6. Климат	17
2. Уровни воды	19
2.1. Общие сведения о режиме уровней воды р. Невы и Невской губы	19
2.2. Максимальные годовые уровни воды Финского залива и устья р. Невы	28
2.3. Минимальные годовые уровни воды Финского залива и устья р. Невы	75
2.4. Максимальные и минимальные зимние уровни воды Финского залива и устья р. Невы	78
2.5. Максимальные и минимальные уровни воды р. Невы	81
2.6. Ход уровней воды при нагонах и сгонах	89
3. Сток воды	139
3.1. Сток воды р. Невы в естественных условиях	139
3.2. Приток воды в Ладожское озеро в естественных условиях	144
3.3. Распределение расхода воды р. Невы по рукавам и каналам дельты	153
3.4. Вопросы гидрологического обоснования проблемы отъемов части речного стока из неевского бассейна	159
4. Ветровое волнение	171
5. Ледовый режим	174
5.1. Ледовый режим р. Невы	174
5.2. Ледовый режим Невской губы	186
6. Минерализация и соленость воды	192
Выводы	209
Список литературы	213
Приложения	216

МОНОГРАФИЯ

Рувим Афроимович Нежиховский

ВОПРОСЫ ГИДРОЛОГИИ
РЕКИ НЕВЫ И НЕВСКОЙ ГУБЫ

н/к

Редактор Г. Г. Доброумова. Художник В. В. Быков
Технический редактор Е. Я. Заводько. Корректор А. И. Шеина

Подписано в печать 18.11.87. М—20620. Формат 60x84¹/16. Бумага картографическая. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,02. Усл. кр.-отт. 13,14. Уч.-изд. л. 12,85. Тираж 360 экз. Индекс ГЛ—165. Заказ 4012 . Цена 1 р. 50 к. Заказное.

Гидрометеиздат, 199226, Ленинград, В. О., ул. Беринга, д. 38.
Московская типография № 9 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 109033, Москва Ж-33, ул. Волочаевская, д. 40.

1 р. 50 к.

В предлагаемой вниманию читателей книге в сжатом виде изложены важные сведения, которые за последние два столетия накопила гидрологическая наука о водном, ледовом, термическом и отчасти химическом режиме реки Невы и Невской губы.

Помимо литературных источников в ней широко использованы материалы научных исследований, выполненных в Государственном гидрологическом институте в течение 1966—1981 гг. по гидрологическому обоснованию ряда проектов в Ленинграде и ближайших пригородах.

Приводимые в книге характеристики Невы и Невской губы по гидрографии и морфометрии, водному и ледовому режиму, химизму и волнению могут быть использованы при проектировании мостов, набережных, водозаборов, причалов и других сооружений, при планировании работы речного и морского флота, проведении спортивных, туристических и других оздоровительных мероприятий.



ЛЕНИНГРАД
ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1988