

В.В. Дроздов

К ВОПРОСУ О ПРИЧИНАХ ПЕТЕРБУРГСКИХ НАВОДНЕНИЙ

V.V. Drozdov

TO THE QUESTION ON THE REASONS OF THE PETERSBURG FLOODING

Выполнена систематизация крупномасштабных и региональных гидрометеорологических процессов, способных воздействовать на формирование наводнений в Санкт-Петербурге. Установлены степень и характер влияния Северо-Атлантического колебания на формирование ситуаций, приводящих к наводнениям. Рассмотрена роль изменчивости уровня Ладожского озера и расходов р. Невы. Показано возможное влияние сейшевых колебаний различного типа. Проанализированы основные причины, способные приводить к катастрофическим наводнениям. Обоснованы возможности прогнозирования наводнений различной силы.

Ключевые слова: колебания климата, наводнения, Северо-Атлантическое колебание, речной сток.

Systematization of large-scale and regional hydrometeorological processes is performed that are capable of influencing emergence of floods in St Petersburg. The degree and nature of impact of the North Atlantic Oscillation on formation of the situation leading to floods are established. The role of variations in the Ladoga Lake levels and the Neva River discharge is studied. A possible influence of long-wave fluctuations of various types is shown. The major causes for catastrophic flooding are analysed. Potentials for forecasting floods of various strength are confirmed.

Key words: climate, changes, floods, North Atlantic Oscillation, river runoff.

Введение

Санкт-Петербург – уникальный город. Он задумывался и строился как самая крупная северная столица Европы и Мира. Создание крупного города-порта и промышленных предприятий на берегу Балтийского моря, несомненно, было крупнейшим геополитическим успехом для молодой Российской Империи в начале XVIII века. Но новая столица строилась в регионе с весьма суровыми климатическими условиями, ценой огромного напряжения материальных и людских сил всего государства. И врагами строителей были не только морозы и ветры, но и не менее грозная стихия – вода. Не может вызывать сомнения, что Пётр I был осведомлён о значительной угрозе будущему городу при строительстве его в самом устье Невы [Исаченко, 1998]. И, тем не менее, город решено было строить именно здесь. Почему же было принято такое решение? Ведь в устьевой зоне Невы целесообразно было бы разместить только мощную каменную крепость с гарнизоном, которая бы преграждала проход неприятелю в реку. А сам город начать строить несколько выше по течению, выбрав место, в значительно меньшей степени подверженное наводнениям, чем устьевая зона. Но, видимо, Пётр мечтал о Санкт-Петербурге как о городе, напоминающем ему

другие европейские центры, такие как Амстердам, Стокгольм и Копенгаген, расположенные на островах в окружении моря... Опыт Гамбурга и Лондона, которые также являлись крупнейшими портовыми городами к тому времени, но располагались при этом на большем удалении от устьев рек и беспокойного моря, учтён не был. Не была должным образом оценена и степень опасности для Санкт-Петербурга от наводнений, в силу его географического расположения – в самой узкой мелководной части Невской губы, в самой восточной точке Финского залива. Такое положение, да ещё в устье крупнейшей по водности реки бассейна Балтийского моря, принимая во внимание западное направление штормовых ветров, делает Санкт-Петербург одним из наиболее предрасположенных к наводнениям городов на побережье Балтики.

1. Анализ причин возникновения наводнений

С момента строительства новой столицы частые наводнения заставляли задуматься о причинах этого явления. Повседневные наблюдения показывали, что причина наводнений – ветер, дующий с моря. Такой ветер нагоняет морскую воду в устье Невы. В середине XVIII века, наряду с ветровой теорией, появилось мнение, что наводнение создается самой Невой. Ветер, дующий с моря, считали некоторые исследователи, подпирает Неву и создает затруднения для стока ее вод. Не находя выхода, невяская вода затопляет окружающую местность. Такой вывод совпадал с планом строительства города, и описанная стоковая теория надолго стала господствующей.

В первой половине XIX века появились первые данные о расходе воды р. Невы. Это позволило выполнить расчеты и убедиться, что роль задержания невяских вод ветром переоценена. В самом деле, если принять расход воды близким к среднему многолетнему, т.е. $2500 \text{ м}^3/\text{с}$, то за один час река проносит $2500 \times 3600 = 9\,000\,000 \text{ м}^3$ воды. При уровне воды у Горного института 300 см над ординаром площадь затопления в пределах дельты составит 50 км^2 , или $50\,000\,000 \text{ м}^2$. При полном прекращении стока уровень воды на затопленной территории может повыситься на величину $9\,000\,000 / 50\,000\,000 = 0,18 \text{ м}$. В действительности же при больших наводнениях, когда отмечалось обратное течение и могло иметь место полное прекращение стока, за 1 час уровень воды повышается на $0,6\text{--}0,8 \text{ м}$ и более. Следует, впрочем, заметить, что на поверхности реки обратное течение устанавливается в редких случаях – при западном ветре, достигающем силы жестокого шторма. В глубине же потока на главных рукавах дельты обратного течения, по-видимому, никогда не бывает, а если и бывает, то непродолжительное время.

Долгое время все усилия понять механизм наводнений оставались тщетными. Новые гипотезы появились только во второй половине XX века, когда начали составлять синоптические карты, отражающие состояние погоды на обширных пространствах, и были организованы более частые наблюдения за уровнем воды в ряде пунктов Балтийского моря.

Согласно современным представлениям, природа невских наводнений может состоять в следующем. Подчиняясь общим законам циркуляции атмосферы на земном шаре, области с низким давлением – циклоны, перемещаются обычно с запада на восток. Циклоны, пересекающие Балтийское море, выводят из равновесия его водные массы и чаще всего формируют особого рода длинную волну [Померанец, 2002; Проект «Моря» ..., 1992]. Высота такой волны в центральных районах моря обычно не превышает нескольких десятков сантиметров, а ее длина сравнима с длиной самого моря. Циклоны перемещаются над Балтийским морем по разным траекториям. Особое значение в формировании наводнения имеют те из них, которые пересекают море с юго-запада на северо-восток, т.е. в том направлении, в котором вытянуто само море. В этом случае циклоны увлекают длинную волну в Финский залив. Профиль волны здесь, у горла залива, становится довольно четко выраженным, чему во многом благоприятствуют и господствующие в это самое время в периферии циклона над Финским заливом восточные ветры. У горла залива как бы возникает выпученность за счет воды, согнанной сюда из открытых районов Балтики и отчасти из центральных районов Финского залива.

Первоначальная высота длинной волны в западной части Финского залива обычно составляет от 40 до 60 см, скорость её распространения составляет от 40 до 60 км/ч. При продвижении по широкой и глубокой части залива высота и скорость волны мало меняются. С подходом к вершине залива высота волны возрастает, так как залив делается уже и мелководнее, в особенности вблизи устья р. Нарвы, где резко уменьшается площадь поперечного сечения залива вследствие падения глубин.

По пути движения форма волны видоизменяется и усложняется из-за неровностей берегов и дна. Весь Финский залив длинная волна пробегает за 7–9 ч. Если в течение этого времени нет ветра или ветер очень слабый, то волна распространяется лишь под действием силы тяжести – в этом случае она называется свободной длинной волной. За счет свободной длинной волны в устье р. Невы возможен подъем иногда до 200–250 см. Видимо, именно воздействием длинной волны можно объяснить возникновение, согласно принятой классификации, «очень опасного» наводнения 1764 г., когда вода поднялась до 244 см при отсутствии ветра. Сам факт наступления наводнения в безветренную погоду удивителен, но сомнения вызывать не может. И такие случаи были не единичны. Свободной длинной волны в чистом виде обычно не бывает, так как при прохождении циклонов всегда дуют ветры различных направлений. Северные и южные ветры являются нейтральными: они почти не влияют на высоту волны. Встречный восточный ветер уменьшает высоту волны, а попутный западный – увеличивает. В последнем случае возрастание высоты волны бывает особенно значительным: если атмосферный фронт совпадает с гребнем волны и перемещается вместе с ним примерно с одинаковой скоростью (40–60 км/ч), фронт как бы подхлестывает волну, появляется эффект резонанса. Подобные случаи бы-

вают тогда, когда циклон, дойдя до горла Финского залива, поворачивает на восток. Данный эффект усиления, помимо прочего, создается и за счет ветрового раздела на фронте, точнее, за счет смены ветров южных направлений впереди фронта на западные в тылу фронта, а также за счет перехода от пониженного давления перед фронтом к повышенному позади фронта.

Таким образом, длинная волна практически всегда бывает вынужденной, т.е. такой, на которую воздействует ветер. Постепенное возрастание высоты вынужденной длинной волны за счет ветра и сужения Финского залива с запада на восток хорошо прослеживается на рис. 1, где изображен ход уровня воды в различных пунктах Финского залива и р. Невы при наводнении 15 октября 1955 г.

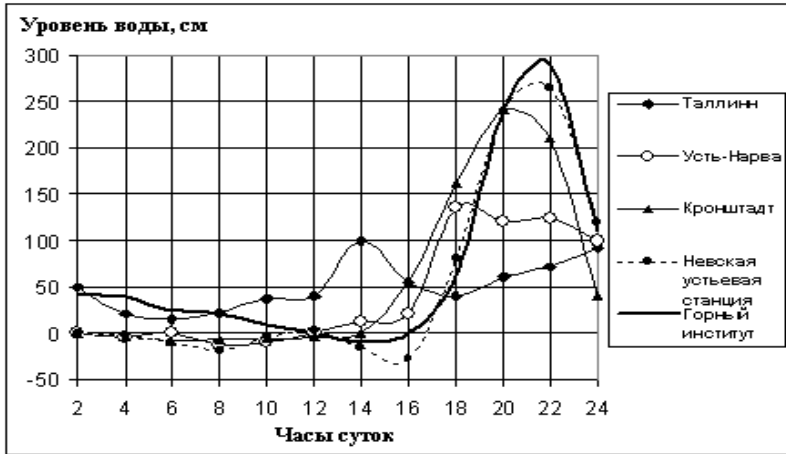


Рис. 1. Суточная изменчивость уровня воды в Финском заливе и в Невской губе в период наводнения 1955 г.

Значительный вклад в возникновение петербургских наводнений вносят также крупномасштабные климатические процессы. Интенсивность и направление движения циклонов над Европой зависит от изменчивости параметров атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой и периодического влияния Арктического антициклона. В свою очередь, интенсивность атмосферной циркуляции определяются градиентами атмосферного давления между центрами действия атмосферы. Давление воздуха на уровне моря и в выше лежащих слоях атмосферы зависит во многом от температуры океана и динамических процессов в атмосфере Земли, связанных с перераспределением момента импульса, влиянием силы Кориолиса, приливообразующих сил. Термический режим и динамика давления воздуха в регионе Северной Атлантики и Европы подвержены выраженной сезонной изменчивости. На эти изменения накладываются межгодовые и многолетние циклические колебания таких процессов, как солнечная активность с периодом около 11 и 22 лет, 19-летний цикл колебаний уровня океана под влиянием силы притяжения Луны и Солнца, динамика скорости вращения Земли и др.

Погода и климат Северной Атлантики и прилегающих к ней регионов Северной Америки и Евразии, в том числе Балтийского моря, в значительной мере зависят от атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой, которая представлена системами низкого и высокого давления [Бабкин, 1999; Дроздов, 2009; Смирнов, 1998]. Центральная часть циклонической системы низкого давления расположена к юго-западу от о. Исландия, и по этой причине она получила название Исландской депрессии, или Исландского минимума давления (ИМД). Южнее, в районе Азорских островов, находится центр антициклонической системы высокого давления, получивший название Азорского максимума давления (АЗМД). Указанные системы называют центрами действия атмосферы. Благодаря им в умеренных широтах над Северной Атлантикой постоянно осуществляется перенос воздушных масс с запада на восток. Интенсивность переноса подвержена значительным колебаниям во времени. За меру интенсивности западного переноса принимают разность атмосферного давления на станциях, расположенных около климатических центров действия. Эту разность давления, определяемую, как правило, в среднем за зимние месяцы, называют Северо-Атлантическим колебанием (North Atlantic Oscillation – NAO). Индекс атмосферной циркуляции NAO широко используется в мировой практике изучения колебаний климата и их причин.

Существуют различные варианты индекса NAO. Наиболее часто используется разность давления между Азорскими островами (Понта-Делгада) и Исландией (Акурейри), осредненная за три зимних месяца (декабрь–февраль) – индекс NAO₁. Представляют его непосредственно в единицах давления (гПа) или в виде отклонения от среднего в долях дисперсии. Несколько реже используют разности давления между пунктами Лиссабон (Португалия) и Стиккисхоульмур (Исландия), осреднённые за четыре зимних месяца (декабрь – март) – NAO₂. Кроме того, для характеристики Северо-Атлантического колебания применяют непосредственную разность давлений между центрами действия атмосферы – NAO₃, а также разности давления на меридиане, между точками с координатами 45° с.ш., 30° з.д. и 60° с.ш., 30° з.д., осреднённые за три зимних месяца (декабрь – февраль) – NAO₄.

В работе Н.П. Смирнова с соавторами [Смирнов, 1998] было показано, что самым предпочтительным индексом NAO является индекс, который представляет собой первую главную компоненту разложения на естественные ортогональные функции всех четырёх указанных выше индексов. Он наилучшим образом отражает колебания поля давления над Северной Атлантикой, динамику параметров центров действия атмосферы и переносы воздушных масс. Этот индекс обозначен авторами как NAO₀₆.

Анализ многолетней изменчивости индексов NAO показал, что максимальные значения индекса NAO₀₆ за период с 1895 по 2007 г. наблюдались в 1989 и 1990 гг. (3,9 и 3,1 у.е. соответственно, при среднем значении равном –0,022 у.е.). Значения индекса NAO₃ также достигли максимума в 1990 г. (41,8 гПа,

при среднем значении за период с 1895 по 2003 г., равном 30,46 гПа). Кроме того, в 1996 и 2005 гг. наблюдалось весьма значительное снижение интенсивности атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой. Существенно выше средней многолетней нормы значения индексов атмосферной циркуляции были в 1995, 1999–2000 гг., а также в 2003 г.

На фоне долгопериодных колебаний интенсивности атмосферной циркуляции заметны также её вариации с периодом от 16 до 20 лет. Спектральный же анализ изменчивости индекса NAO показал, что наиболее заметным на спектре является максимум на периоде 7,8 года [Смирнов, 1998]. Значимого тренда в интенсивности циркуляции атмосферы над регионом Северной Атлантики не обнаружено.

Проанализируем связи между интенсивностью атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой и некоторыми природными характеристиками в регионе восточной Балтики, которые прямо или косвенно могут повлиять на вероятность возникновения наводнений и их интенсивность.

На рис. 2 показано сравнение многолетней динамики максимальных площадей ледового покрова с изменчивостью индекса атмосферной циркуляции NAO_{об.}. Коэффициент корреляции между изменчивостью NAO_{об.} и площадями ледового покрова $r = -0,54$ при уровне обеспеченности $P = 99\%$. Таким образом, со статистической достоверностью можно утверждать, что рост интенсивности атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой приводит к потеплению в регионе Балтики и уменьшению ледовитости. Финский залив, и в особенности восточная его часть, принадлежит к тем районам моря, которые практически каждую зиму покрываются устойчивым льдом.

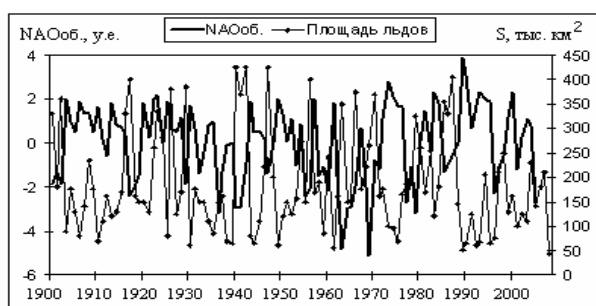


Рис. 2. Сравнение многолетней динамики максимальных площадей ледового покрова в Балтийском море с изменчивостью обобщённого индекса атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой NAO_{об.}

Наличие ледяной поверхности в период с середины декабря по март-апрель в случае достаточно суровой и продолжительной зимы способно достаточно эффективно защитить акваторию от нагнетания вод из западных районов Финского залива и Центральной Балтики в период прохождения циклонических вихрей. На зимний период приходилось достаточно много наводнений и все они

возникали в ситуации, когда зима оказывалась достаточно тёплой и ледовый покров был слабо развит.

Оценим степень и характер влияния Северо-Атлантического колебания на динамику стока рек Балтийского региона. Изменчивость стока рек Восточной Балтики также может вносить свой вклад в формирование наводнений. При этом целесообразно проанализировать характер изменчивости стока всех крупнейших рек бассейна Балтийского моря, чтобы выявить интересующие нас региональные особенности.

Из результатов осуществленного корреляционного анализа можно сделать следующие выводы. Во-первых, не обнаружено значимой связи между Северо-Атлантическим колебанием и динамикой стока крупнейшей по водности реки региона – Невы, суммарным стоком в Финский залив и суммарным речным стоком в Балтийское море. Установлено, что сток Невы находится в тесной корреляционной зависимости с суммарным речным стоком в море ($r = 0,721$ при $P = 99,9\%$) и со стоком в Финский залив ($r = 0,831$ при $P = 99\%$). Тем не менее, влияние климата на речной сток, в особенности на региональном и глобальном уровнях, является общепризнанным. Для объяснения этого парадокса, очевидно, потребуется выполнить дополнительные расчёты по оценке тесноты связи НАО и стока крупнейших рек бассейна Балтики, репрезентативных для конкретных районов водосбора, и сравнить полученные результаты.

Анализ тесноты связи между стоком второй и третьей по водности рек региона – Вислы и Одры, впадающих в море с южной части водосборного бассейна, и $NAO_{об.}$, показал, что существует статистически значимая зависимость среднего за весну стока данных рек от интенсивности атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой (соответственно $r = -0,333$ и $r = -0,358$ при $P = 99\%$, временной сдвиг отсутствует). Проявление связи между индексом Северо-Атлантического колебания, который рассчитан на основе данных в среднем за зимний период и средним за весну стоком южных рек, может быть объяснено тем, что весенние расходы этих рек во многом определяются количеством осадков в твердой фазе, накапливающихся в пределах их водосборов зимой.

Сток рек, впадающих в Балтийское море с северной части водосбора, также демонстрирует достаточно тесную связь с Северо-Атлантическим колебанием. Однако здесь данная закономерность носит характер, противоположный тому, который свойственен для рек, впадающих с южной части водосбора. Значимая и достаточно тесная связь между интенсивностью атмосферной циркуляции и средним годовым стоком рек Швеции, таких как Онгерманэльвен, Лулеэльвен, проявляется при отсутствии временного сдвига (соответственно $r = 0,527$, $r = 0,501$ при $P = 95\%$). Для р. Кеми-Йоки, впадающей в Балтику в самой северной части побережья Ботнического залива, характерно наличие положительной связи стока с $NAO_{об.}$ только для осеннего периода. Суммарный средний годовой сток в Ботнический залив также демонстрирует наличие значимой свя-

зи с Северо-Атлантическим колебанием положительного характера ($r = 0,362$ при $P = 95 \%$, временной сдвиг отсутствует).

Таким образом, мы видим, что с возрастанием интенсивности Северо-Атлантического колебания увеличиваются расходы рек, впадающих в море с северных и юго-восточных районов водосбора, в то время как крупные реки, впадающие с юга, снижают свои расходы. Именно различным характером зависимости стока применительно к конкретным районам водосбора от интенсивности атмосферной циркуляции может быть объяснено отсутствие значимой связи между индексом $NAO_{об}$ и суммарным стоком в Балтийское море и стоком р. Невы, который демонстрирует весьма тесную связь с суммарным стоком.

Установлено, что динамика уровня моря в Кронштадте находится в тесной зависимости от Северо-Атлантического колебания. Соответствующий коэффициент корреляции $r = 0,471$ при $P = 99 \%$. Иллюстрацией выявленной закономерности является рис. 3. При анализе влияния изменчивости стока Невы на уровень моря в Кронштадте также обнаружена достаточно тесная статистически достоверная связь положительного характера ($r = 0,451$ при $P = 99 \%$). Сравнение динамики уровня моря в Кронштадте с изменчивостью стока Невы показано на рис. 4.



Рис. 3. Сравнение многолетней изменчивости обобщённого индекса интенсивности атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой $NAO_{об}$ с динамикой уровня моря в Кронштадте



Рис. 4. Сравнение многолетней динамики уровня моря в Кронштадте со стоком р. Невы

Произведён также анализ тесноты связи между индексами NAO и величинами повторяемости наводнений в Санкт-Петербурге за год. Установлено наличие не большой по величине, но статистически достоверной корреляционной связи положительного характера ($r = 0,374$ при $P = 95\%$).

Наибольшая теснота связи с ежегодной повторяемостью наводнений характерна для индекса NAO 2 ($r = 0,382$ при уровне обеспеченности $P = 99\%$). Проанализировано также влияние интенсивности атмосферной циркуляции на уровни максимальных годовых наводнений. Произведённые расчёты показали, что как и в предыдущем случае, наибольшая теснота связи обнаруживается с индексом NAO₂. По абсолютному значению коэффициент корреляции за период с 1970 по 2008 г. $r = 0,354$ при $P = 95\%$. Связь статистически достоверна, имеет положительный характер (рис. 5).



Рис. 5. Сравнение многолетней динамики индекса интенсивности атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой NAO₂ с максимальными годовыми значениями петербургских наводнений

Наибольшие значения повторяемости наводнений за год и их максимальные величины демонстрируют свой рост не при наибольших значениях NAO, а при начале тенденции к росту или к снижению интенсивности атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой. Этим и может объясняться отсутствие более тесной связи между NAO и параметрами наводнений. Наибольшие подъемы воды и наибольшая частота возникновения наводнений за год проявляются при значениях индексов NAO близких к средним.

Проанализируем также на основе эмпирических данных влияние ледового покрова на уровни максимальных наводнений. На рис. 6 показано сравнение величин максимального распространения ледового покрова в Балтийском море с уровнями максимальных зимних наводнений в Санкт-Петербурге. Следует особо заметить, что Финский залив и Невская губа принадлежат к тем районам Балтики, которые почти всегда покрываются мощным ледовым покровом. Поэтому данные о наибольшем распространении льда в целом на море очень во многом соответствуют динамике ледовых условий и в Финском заливе. При суровых зимах замерзает весь Финский залив, восточная Балтика, Ботнический

и Рижский заливы, при более мягких – льдом покрывается только восточная часть Финского залива и северная часть Ботнического.

Из рис. 6 видно, что крупные зимние наводнения возникают обычно в условиях малых площадей ледового покрова. Весьма показательны периоды с 1918 по 1924 г., с 1938 по 1942 г., с 1953 по 1960 г., с 1966 по 1970 г., а также с 1996 по 2002 г., в течение которых в условиях весьма обширного ледового покрова зимних наводнений не возникало. В особенности это было характерно для конца XX века – периода с 1990 по 1994 г., а также для периода с 2005 по 2008 г. В целом, ледовый покров является достаточно заметным фактором, влияющим на возникновение наводнений. Но это справедливо, естественно, только для зимнего периода. Если наводнений не происходило зимой, то во многих случаях они возникали в другие сезоны года.

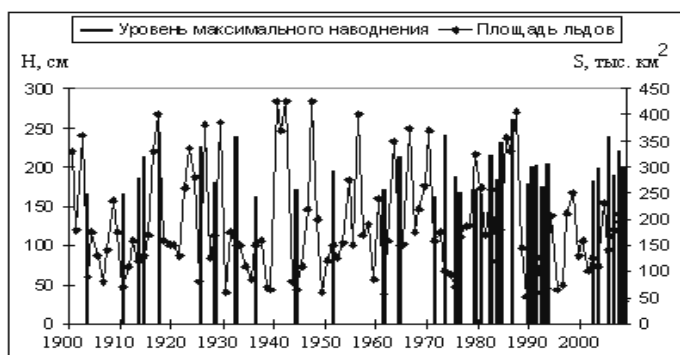


Рис. 6. Сравнение значений площадей максимального развития ледового покрова в Балтийском море с величинами максимальных за зимний период наводнений

Многолетняя изменчивость ледового покрова, как было показано выше, находится в тесной зависимости от интенсивности атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой.

Рассмотрим изменчивость уровня Ладожского озера, от которого, в свою очередь, зависит величина объема стока Невы. Как известно, северо-запад Европейской территории России относится к зоне избыточного увлажнения. Средняя величина превышения осадков над испарением для региона Ладожского озера 250 мм. Ладожское озеро представляет собой впадину, вырытую ледником и заполненную примерно 838 км^3 воды, поступающей в озеро по четырем крупным рекам и примерно 100 малым водотокам и вытекающей только по р. Неве. Таким образом, изменчивость уровенного режима столь огромного водоёма оказывает определяющее влияние на объёмы стока Невы, что, в свою очередь, может повлиять на величину подъёма воды при наводнении.

Ежедневный средний уровень воды Ладожского озера рассчитывается по наблюдениям на всех водомерных озерных постах с учетом сгонно-нагонных явлений. Ежедневные уровни воды складываются в среднедекадные, среднемесячные и среднегодовые. Средний многолетний уровень Ладожского озера со-

ставляет 476 см над уровнем моря. Самое высокое стояние уровня наблюдалось в 1924 г., тогда уровень был почти на 2 м выше. В 1942 г. стояние уровня было самым низким – на 1,5 м ниже среднего. В течение года уровень озера претерпевает сезонные изменения.

Самый низкий уровень воды Ладожского озера наблюдается, как правило, в феврале. С началом таяния снега и увеличением речного притока начинается подъем уровня. Выше всего вода в озере стоит в июне. В многоводный 1924 г. наблюдалась и самая большая разница между максимальным и минимальным уровнем воды – 2 м. В маловодный 1940 г. эта разница составила всего 25 см. Изменения среднегодовых значений уровня воды Ладожского озера отражают межгодовые колебания водности Северо-Западного региона.

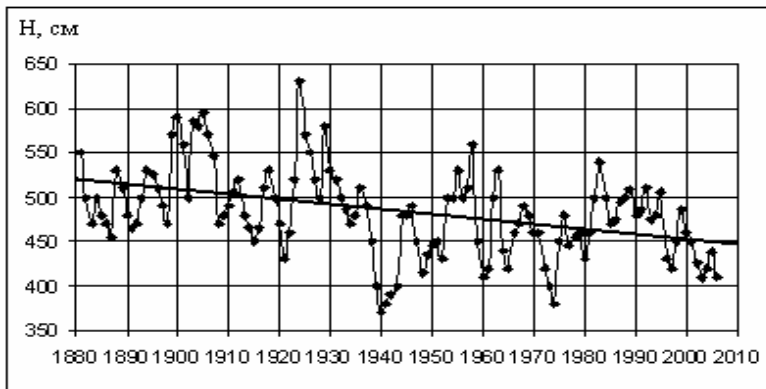


Рис. 7. Многолетняя динамика уровня Ладожского озера.
Жирной чертой показана линия тренда

На основе этих данных учеными по специальной методике выделена цикличность наступления многоводных и маловодных периодов. Объяснение этим циклам они находят в изменчивости атмосферных процессов или, другими словами, в изменениях путей циклонов, зарождающихся на «кухне погоды» – над Северной Атлантикой – и продвигающихся по территории Северо-Запада России. На рис. 7 представлен график многолетней изменчивости уровня Ладожского озера, построенный на основе данных Института озёроведения РАН. За более чем столетний период наблюдений выявлены циклы наступления максимумов и минимумов уровня озера, приближающиеся к 30–35 годам. Последний выраженный минимум среднегодового уровня наблюдался в 1973 г. Период с 2002 по 2006 г. на основе имеющихся данных также можно отнести к завершающей части фазы снижения уровня. Можно предположить, что следующий экстремальный максимум уровня Ладоги ($H > 520$ см) будет достигнут в период с 2018 по 2020 г. Это может повлиять на значительное увеличение расходов Невы и станет дополнительным фактором, значительно увеличивающим величину наводнения. Наивысший уровень Ладожского озера в течение XX века наблюдался в 1924 г., тогда он на 2 м превышал среднемноголетний уровень. Как это

отразилось на величине наводнения – хорошо известно, в том же году случилось второе по силе наводнение за всю историю Санкт-Петербурга. В многолетней изменчивости уровня Ладожского озера установлено наличие значимого отрицательного линейного тренда ($y = -0,555x + 1561,8$ с величиной достоверности аппроксимации $R = 0,171^2$).

На рис. 8 представлено сопоставление многолетней динамики уровня Ладожского озера с подъёмами воды в р. Неве в пределах Санкт-Петербурга на посту около Горного института. Анализируя данные, становится ясно, что на фоне высокого уровня Ладожского озера возникновение крупных наводнений становится более частым, но такое происходит не всегда. Например, период с 1900 по 1906 г. характеризовался довольно устойчивыми очень высокими отметками уровня озера, но за это время произошло всего 2 «очень сильных наводнения» – в 1903 г. (269 см) и в 1905 г. (211 см). А в остальные годы данного периода наводнения вообще не возникали! В 1920-е годы, кроме трагичного 1924 г., наводнения с подъёмом уровня более 210 см случились также в 1925 г. (225 см) и 1929 г. (258 см) при положении уровня Ладоги значительно превышающем норму. Одно из самых крупных наводнений 1955 г. (293 см) также произошло в вершине периода повышения уровня озера, но не на пике его фазы, который пришёлся на 1958 г. Интересно оказалось сравнить данные по уровню Ладоги и уровню Невы в пределах Санкт-Петербурга в 1983 г. Как уже указывалось выше, в 1983 г. возникло наибольшее количество наводнений – десять. Ни раньше, ни позже так много раз в год наводнения не возникали, год уникальный! В то время уровень Ладоги находился на пике очередной фазы своего роста, но его абсолютное значение (540 см) было существенно меньше тех пиковых значений, которые наблюдались в течение предшествующих трёх фаз увеличения уровня, хорошо заметных на рис. 7. В результате все 10 наводнений, произошедших в 1983 г., оказались умеренными по своей силе и не одно из них не соответствовало категории «особо опасное». Максимальное поднятие уровня составило 200 см, а семь наводнений не превзошли и уровня в 190 см (см. рис. 8). Видимо, на фоне повышенного уровня в Ладоге и соответственно в Неве, через Финский залив проходили серии не очень мощных циклонов, и многие из них в сложившихся обстоятельствах смогли вызвать относительно небольшое поднятие уровня в черте города и Невской губе. Но если бы интенсивность циклонического вихря над Центральной Балтикой и Финским заливом была бы сильнее в тот момент, вполне могло бы случиться более крупное наводнение.

Таким образом, сравнительный анализ многолетних данных не даёт веских оснований говорить о том, что высокий уровень Ладожского озера и повышенные расходы Невы всегда могут приводить к крупным наводнениям. Основная причина не в этом.

Очевидно, что эффект «очень опасного» или «катастрофического» наводнения с подъёмом уровня более 300 см выше ординара возникает при совпаде-

нии во времени и пространстве нескольких влияющих факторов, и только в таком случае повышенный уровень Ладоги оказывается благоприятным фоном для развития процесса наводнения.

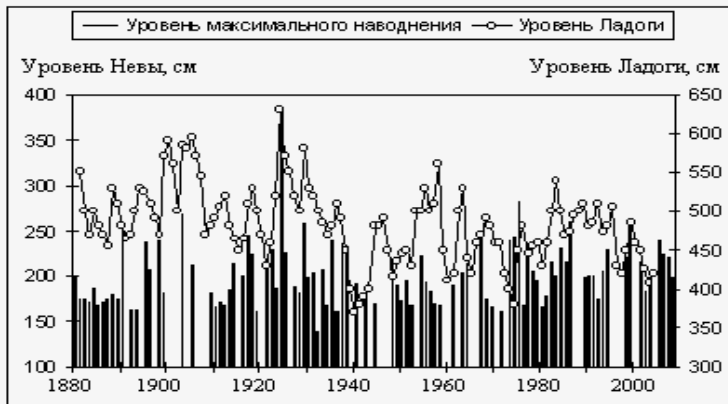


Рис. 8. Сравнение динамики уровня Ладожского озера с величинами максимальных наводнений

Изменения уровневой поверхности Балтийского моря, вызванные возникновением сейшевых явлений при прохождении через регион циклонов и антициклонов, могут являться основной или дополнительной причиной возникновения крупных наводнений. Приливные колебания уровня, имеющие астрономическую природу, во внутреннем Балтийском море имеющим затруднённую связь с океаном, выражены весьма не значительно, но тем не менее, они существуют и в некоторых районах могут достигать довольно заметных величин. Высота приливной волны возрастает в узких мелководных бухтах и заливах, поэтому в Невской губе и в районе г. Выборга приливы вполне ощутимы. Приливные колебания в Балтийском море по причине их относительно малых амплитуд не могут приводить самостоятельно к возникновению сколько-нибудь значимых наводнений, но в совокупности с воздействием других более весомых причин приливы могут усилить эффект наводнения.

Сейши возникают в результате процесса приспособления водных масс к нарушениям равновесного состояния, возникающим под влиянием внешнего воздействия. Это может быть длительный нагон или сгон воды при прохождении интенсивных циклонических вихрей, сопровождающихся сильным ветром. Возникают сейши также при резком изменении метеорологических условий — колебаниях атмосферного давления, когда циклон, в центре которого давление воздуха пониженное, следует сразу за антициклоном, для которого свойственно высокое давление. В результате создаётся определённое «прогибание» водной поверхности и рождается волна с весьма длинным периодом. В Балтийском море после достижения длинной волны вершины Финского залива и ее последующего отражения, колебания водных масс всего моря преобразуются в затухающие инерционные колебания. Сейшевые колебания способны охватить поч-

ти весь объём моря, они достаточно быстро возбуждаются, но затухают в течение нескольких суток.

Наиболее проста по своей структуре продольная одноузловая сейша. Узел сейши располагается, как правило, в районе о. Готланд, а пучности – в оконечностях моря: у Датских проливов и вершинах Ботнического и Финского заливов. Но во многих случаях из-за сложности очертания берегов и рельефа дна конкретных районов сейши сопровождаются колебаниями более высоких порядков: формируются двух-, трёх- и даже четырёхузловые сейши [Антонов, 1987; Померанец, 2002; Проект «Моря» ..., 1992]. В случае возникновения одноузловой сейши, охватывающей практически всё море с юго-запада на северо-восток, формируется наиболее длинная волна с продолжительным периодом, который составляет до 48 ч. При этом почти весь объём моря охватывается колебательным движением. Возможно также формирование одноузловой сейши в системе Западная Балтика – Финский залив с периодом до 30 ч 12 мин. В такой ситуации колебательным движением охвачены водные массы только Западной, Центральной и Восточной Балтики. При этом наблюдается более интенсивное проникновение вод в Финский залив на одной из фаз колебаний и более быстрое истечение вод на противоположной фазе. На рис. 9 представлен вид водной поверхности при одноузловой сейше Западная Балтика–Финский залив, возникшей 11–12 декабря 1932 г. [Проект «Моря»..., 1992]. Мы видим, что при одной фазе колебаний (рис. 9, а) происходит довольно резкое возрастание уровня воды от западных районов Финского залива по направлению к Невской губе, при противоположной фазе максимальный уровень наблюдается уже в юго-западной части Балтики, а минимальный – в восточной части Финского залива. При этом амплитуда колебаний в восточных районах Финского залива, в Выборгском заливе и Невской губе может достигать 100 см, а возможно, и больше.

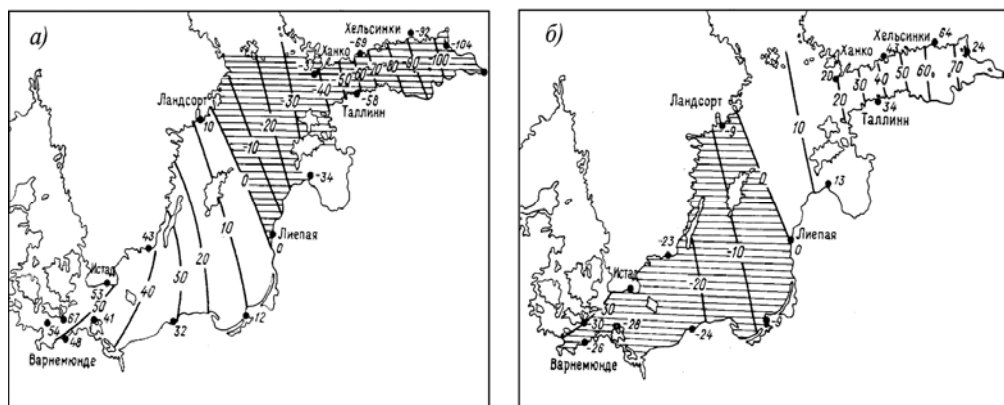


Рис. 9. Вид водной поверхности Балтийского моря при одноузловой сейше системы Западная Балтика–Финский залив [Проект «Моря»..., 1992]. а – разность (см) максимального и минимального уровней 11 – 12 декабря 1932 г.; б – разность минимального и максимального уровней 12 декабря 1932 г.

При формировании сейши с двумя узлами наблюдается несколько иной характер колебаний уровня в системе Центральная Балтика–Финский залив. Амплитуда колебаний в восточных районах Финского залива при такой сейше несколько меньше и обычно не превосходит 50–60 см. Узловые линии расположены на входе в Финский залив по линии Ханко (Финляндия) – Таллинн (Эстония), а в юго-западной Балтике они обычно проходят по линии, соединяющей юг Швеции и о. Рюген (Германия).

Сейшевые колебания уровня в Балтийском море возникают почти ежегодно. В течение года одноузловые сейши составляют до 9 % времени наблюдений, а с несколькими узлами – 7 % [Проект «Моря»..., 1992]. Трёх- и четырехузловые сейши достаточно редки, амплитуда их колебаний относительно небольшая и составляет от 30 до 50 см.

Наибольшую повторяемость имеют колебания воды, вызванные одноузловыми сейшами с периодом от 24 до 28 ч. В результате с интервалом примерно в одни сутки в устье Невы наблюдается несколько подъемов уровня. Высота таких подъемов, как правило, не превышает 50–60 см. Но случается, что циклоны движутся в виде групп с интервалами около 24–28 ч, и тогда на первое колебание накладываются последующие. Водные массы моря как бы раскачиваются циклонами, и подъем уровня в устье Невы за счет сейши возрастает до 100–150 см. В пределах Финского залива известны также случаи сейшеобразных колебаний уровня с периодом от 7 до 9 ч.

Таким образом, сейшевые явления могут являться одним из важных факторов, приводящих к наводнениям в Санкт-Петербурге. Как уже говорилось выше, согласно летописи петербургских наводнений, в конце ноября 1764 г. наблюдался подъём воды в Неве от 2 до 3 м, при совершенном безветрии. Как такое «очень опасное» наводнение могло произойти в принципе? Ведь обычно наводнения сопровождаются сильными и довольно продолжительными ветрами западных направлений, штормом. Но в тот момент этого не наблюдалось, и нет никаких оснований сомневаться в достоверности сведений. Сильный порывистый ветер, обычный предвестник наводнения, должны были бы ощутить все жители Петербурга. Но этого не произошло, вместо ветра на город обрушилась вода... Исходя из физических принципов гидродинамики, самым убедительным объяснением причин данного наводнения может служить возникновение крупной сейши и длинной волны, вошедшей в Финский залив из более удалённых районов. Отсутствие сильного ветра в районе Невской губы может говорить о том, что траектория движения глубокого циклона и антициклона не затрагивала восточную часть Финского залива. Однако крупномасштабное метеорологическое возмущение вод Балтийского моря имело место и его источники должны были находиться в западной части моря. Одноузловая сейша, сформировавшаяся при движении вихрей с юго-запада на север моря к Ботническому заливу, хоть и способна привести в колебательное движение значительный объём Балтики, но обычно это не сопровождается значительными колебаниями уровня в Финском

заливе. Сюда доходят лишь отголоски крупных длинных волн, распространяющихся преимущественно в меридиональном направлении через центр моря. Одноузловая сейша системы Западная Балтика–Финский залив, безусловно, могла бы вызвать значительный подъём уровня воды в Невской губе, но такая сейша формируется при прохождении барических образований через Центральную Балтику и Финский залив, что сопровождается сильным ветрами, а этого в данном случае не было. Скорее всего, уникальное «тихое» наводнение 1764 г. было вызвано мощной двухузловой сейшей. В случае её реализации почти вся поверхность моря приходит в движение, водные массы подвергаются значительному раскачиванию при неоднократном отражении от береговой линии в различных районах. Траектория движения циклона и антициклона могла проходить через Центральную Балтику по направлению к городам Турку или Хельсинки. При этом сильного ветра в самой Невской губе могло и не наблюдаться, но сейшевая волна вполне могла достигнуть устья Невы.

Рассмотри теперь особенности проявлений приливов в Балтийском море. Приливные колебания формируются в результате проникновения полусуточной приливной волны из Северного моря и собственных приливных колебаний Балтийского моря суточного характера. Анализ наблюдений за уровнем моря, выполненный за более чем вековой период времени с 1878 г. на 57 пунктах на побережье Балтики [Антонов, 1987; Проект «Моря»..., 1992], позволяет говорить о том, что на большей части акватории Балтийского моря преобладают суточные и неправильные суточные приливные колебания уровня воды. В Датских проливах (Эрессун-Зунд, Малый и Большой Бельт) приливные колебания носят неправильный полусуточный характер, а в проливе Каттегат у западного побережья Швеции – правильный полусуточный. В этих районах характер приливов определяется поступательной волной, идущей из Северного моря, а высота приливов составляет от 10 до 20 см и в целом у датского побережья несколько выше. В Рижском заливе наблюдается чётко выраженный суточный характер приливов от 10 до 15 см. В центральной части Финского залива величина приливов составляет от 5 до 10 см, но в восточной части залива и в Невской губе возрастает до 15–20 см. В целом, амплитуда максимально возможных по астрономическим причинам приливов, определяемая как сумма амплитуд главных приливных волн, достигает в Финском заливе значительно больших величин, чем в других заливах Балтики. Это очень важно. Получается, что Санкт-Петербург расположен в поистине уникальном месте, ведь по совокупности причин именно здесь создаются наибольшие предпосылки для возникновения крупных наводнений. Но произойти они могут только в случае стечения обстоятельств, когда различные причины, приводящие в движение водные массы Балтики и воды реки Невы, достигнув своих экстремальных значений, реализуются примерно в одном и том же интервале времени. При этом интересным является тот факт, что периоды приливов и двухузловых сейш в Финском заливе почти совпадают. Поэтому становится возможным развитие ситуации, при ко-

торой колебательные движения будут дополнять друг друга и тем самым высота волны возрастет.

Итак, возникновение и величина наводнений в Санкт-Петербурге зависит от влияния факторов локального, регионального и глобального масштабов. Этим и определяется сложность их прогнозирования.

2. Катастрофические наводнения – их причины и предвидение

Особую опасность представляют «катастрофические» наводнения с подъемом уровня выше ординара более 300 см. Впервые предупреждения об угрозе наводнения в Петербурге (без указания ожидаемой высоты подъема) стали составляться Главной Физической Обсерваторией в 1897 г. Катастрофическое наводнение 1924 г. явилось причиной появления целого ряда исследований выдающихся географов – В.Ю. Визе, С.А. Советова, В.М. Макеева, В.А. Берга и др. Во всех этих работах фигурирует волновая гипотеза с той лишь разницей, что одни авторы большее значение придавали ветру на Финском заливе (Визе), а другие (Берг) – основное значение придавали волне, а ветер считали второстепенным фактором. В 1937 г. В. И. Дубов в Государственном гидрологическом институте проводил лабораторные исследования на модели Финского залива, которые привели к обоснованию значения сейш в процессах формирования невских наводнений.

Однако все эти работы практического применения для прогноза наводнений не получили. В 1936 г. была выполнена фундаментальная работа старшего синоптика Ленинградского Бюро погоды К.П. Турыгина «Невские наводнения». В ней автор критически подытожил ранее выполненные исследования по проблеме невских наводнений, составил типизацию наводненческих циклонов и создал Атлас невских наводнений. Прогноз в то время составлялся по методу аналогов. С 1937 г. предупреждения о подъемах воды в Неве стали составляться с указанием ожидаемой высоты подъема уровня.

В 1940–1950-х годах важнейшие работы по исследованию природы невских наводнений были выполнены Н.И. Бельским, возглавившим в 1952 г. группу по изучению и предупреждению наводнений Ленинградского Бюро погоды. В этих работах подробно рассмотрены следующие вопросы: взаимодействие метеорологических и гидрологических факторов и их роль в процессе наводнения, типы колебаний уровня воды в Балтийском море и Финском заливе, возникновение, перемещение и трансформация длинной волны (впервые показана связь длинной волны с атмосферными фронтами и значение эффекта «резонанса» при совпадении скоростей перемещения длинной волны и фронта) и другие явления. В 1954 г. Н. И. Бельским впервые в истории службы предупреждений о невских наводнениях создан эмпирический метод расчета высоты подъема уровня воды в устье р. Невы, получивший практическое применение и по настоящее время являющийся основным методом в оперативной работе прогнозиста. К сожалению, метод Н. И. Бельского позволяет спрогнозировать мак-

симальную высоту подъема уровня воды с заблаговременностью только от 5 до 8 ч. Для принятия мер по снижению размера ущерба в условиях мегаполиса запас времени, конечно, слишком мал. Поэтому Северо-Западное УГМС еще в 1951 г. обратилось в Главное Управление Гидрометслужбы с просьбой о помощи в создании метода прогноза невыходных наводнений с заблаговременностью 12 ч и более. Эта задача была возложена на ряд научно-исследовательских институтов. В 1954 г. при Ленинградском отделении Государственного океанографического института (ЛОГОИН) был создан отдел Ленинградских наводнений. Позднее к проблеме были привлечены Государственный Гидрологический Институт (ГГИ), Главная геофизическая обсерватория (ГГО) и Гидрометцентр СССР. Работа институтов завершилась в 1965 г. созданием так называемого гидродинамического метода ЛОГОИНа. Результаты испытания данного метода в 1965–1966, 1969, 1975–1976, 1977, 1978–79 гг. показали невысокую эффективность разработанного метода для оперативного использования. Отмечалось неудовлетворительное качество прогнозов, малая заблаговременность прогноза максимума и большая трудоемкость метода. В 1990 г. было принято решение о возможности использования метода ЛОГОИНа в оперативной работе только в качестве вспомогательного.

Таким образом, разработка методов, дающих возможность рассчитывать подъемы уровня воды в устье р. Невы с большей заблаговременностью, остается к настоящему времени одной из важнейших задач. Экстремальные наводнения, очевидно, возникают при совместном благоприятном влиянии этих факторов, которые усиливают эффект в своей совокупности, но такое их сочетание возникает, к счастью, довольно редко. Какие же видимые факторы могут привести к возникновению экстремальных наводнений? Выше уже говорилось о том, что уровень в Финском заливе во многом зависит от циклонической деятельности, а уровень в Кронштадте (см. рис. 3) находится в довольно тесной зависимости от NAO. Необходимо, чтобы траектория движения циклона проходила точно через Финский залив в восточном направлении, а сам циклон должен быть достаточно мощным. На основе полученных ранее результатов относительно влияния динамики интенсивности атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой, выражаемой через индексы NAO, на гидрометеорологические процессы в Северной, Центральной Европе [Бабкин 1999; Дроздов, 2009; Смирнов, 1998] можно с уверенностью говорить о том, что при высоких значениях NAO траектории циклонов смещаются к северо-востоку и проходят через Норвегию и побережье Арктических морей. При значениях NAO, близких к средним, циклоны переносят влажный воздух преимущественно в бассейны рек, располагающихся на территории Белоруссии, Центральной Европейской России вплоть до бассейна р. Волги. При низких же значениях NAO циклоническая деятельность в регионе Балтики и Центральной России заметно ослабевает, но резко возрастает на Юго-Востоке Европейской части России в бассейне Азовского и Черного морей. Таким образом, исходя из анализа географических

особенностей движения циклонов в зависимости от значений NAO, можно прийти к выводу о том, что наиболее благоприятная для особо опасного наводнения траектория движения циклона может возникнуть при значениях Северо-Атлантического колебания, близких или незначительно превосходящих среднее значение. Однако стоит учитывать, что траектория циклона, зародившегося над океаном, может несколько меняться при его вступлении на сушу под влиянием факторов подстилающей поверхности и общей динамики барического поля региона. Приведём несколько примеров. Катастрофическому наводнению 1924 г., когда уровень поднялся на 369 см, соответствовали близкие к средним значения индексов NAO. Так, величина индекса NAO_3 составила 28,6 гПа при среднем значении 30,46, а значение $NAO_{об.}$ равнялось 0 при среднем значении $-0,022$ у.е. Особо опасному наводнению 1967 г., с поднятием уровня на 234 см, соответствовала величина индекса NAO_3 равная 31,5 гПа, а значение $NAO_{об.}$ составило 0,7 у.е. Однако нельзя полагать, что экстремальные и особо опасные наводнения зависят прежде всего от NAO. Ведь динамика средних годовых значений уровня в Кронштадте находится, согласно расчетам, почти в такой же зависимости от изменчивости стока р. Невы, как и от NAO. Однако здесь необходимо учитывать следующую очень важную особенность. Сток р. Невы зарегулирован огромным Ладожским озером. Поэтому расходы Невы в данный момент времени отражают процесс постепенного накопления воды в Ладоге с огромной территории ее водосбора и определяются водностью бассейна в предшествующий период, с задержкой от 2 до 3 лет. Экстремальное катастрофическое наводнение может произойти при совпадении значительного увеличения расходов Невы и притока вод залива с запада. Например, в 1924 г. расходы Невы были на 50 % выше нормы, а уровень Ладожского озера превышал его положение в годы с самыми низкими отметками в 1940 и 1973–1975 гг. на 2 м. Но увеличенные расходы Невы и возросший уровень Ладоги не являлись, в отличие от нагонного увеличения уровня в Невской губе и Восточной части Финского залива, следствием гидрометеорологических процессов, происходящих только в 1924 г. Уровень озера и соответствующие расходы вытекающей из него реки формировались в течение нескольких предшествующих катастрофическому наводнению лет, но максимум их значений пришелся как раз на время прохождения сильнейшего циклона над Центральной Балтикой и Финским заливом, что и привело к трагическим последствиям.

Исходя из вышеприведенных соображений, «катастрофические» и «очень опасные» наводнения в Санкт-Петербурге вполне могут поддаваться прогнозированию. Прогноз может быть основан на анализе гидрологических данных за предшествующие не менее 15–20 лет, что позволяет оценить текущий период фазы водности бассейна Ладоги и стока Невы; оценке ожидающихся значений NAO с учётом выявленной цикличности. На последнем этапе необходимо вовремя определить траекторию движения мощного циклона или их серии и оценить вызываемый им подъём уровня на постах, располагающихся на побережье

юго-восточной Балтики и западной части Финского залива (створ Таллинн – Хельсинки), в сравнении с уже имеющимися данными, соответствующими крупным наводнениям в прошлом.

На рис. 10 приведены спектры колебаний осреднённых за год значений уровня моря в Кронштадте, полученные за период с 1900 по 2000 г. Характерно наличие пиков на периодах 100 лет, 33, 20, 10, 6,6 – 7,5, 4,5 и 2,7 года. Наибольшей значимостью на спектрограмме обладают пик на периоде 100 лет, что в точности соответствует интервалу времени между сильнейшими наводнениями 1824 и 1924 гг. Довольно высокой значимостью обладают также пики на периодах 33 года, 10 лет, 7,5 лет, 2,7 года.

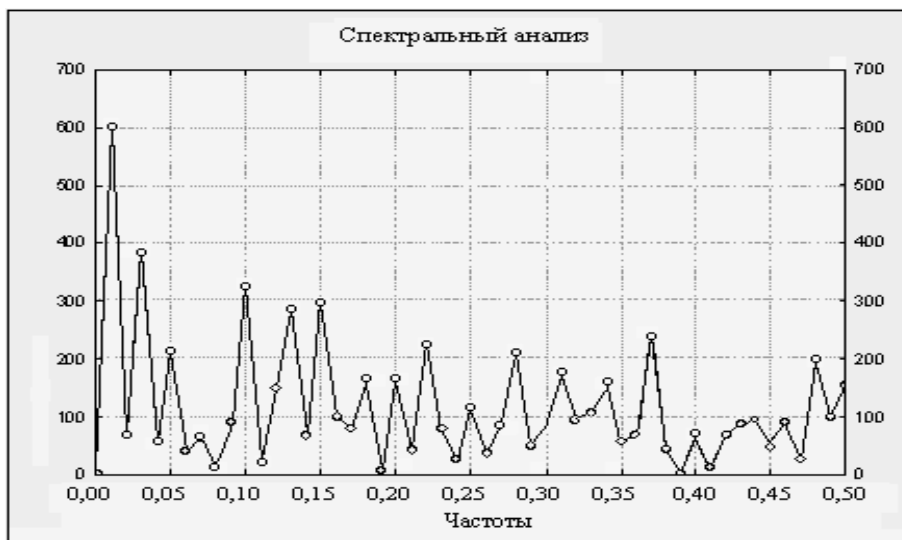


Рис. 10. Спектры колебаний средних годовых значений уровня моря в Кронштадте

Сравнивая данные о динамике уровня Ладожского озера, стока реки Невы и суммарного стока в Финский залив, становится ясно, что основные черты изменчивости у них едины. Суммарный сток в Финский залив достигал наибольших значений за рассматриваемый период в начале 1960-х годов и в начале 1980-х. Прослеживается наличие цикличности в колебаниях стока с периодом около 35 лет. В конце первого десятилетия XXI века суммарный сток в Финский залив, так же как и сток Невы и уровень Ладожского озера, приближается к очередному многолетнему минимуму.

Довольно значительный подъем воды в городе может иметь место и без длинной волны и сейши, а лишь за счет сильного устойчивого западного ветра на Финском заливе. Однако случаев, когда очень сильный западный ветер наблюдался бы длительное время на всем заливе, почти не бывает. Сравнительно неширокая зона очень сильных западных ветров перемещается вместе с циклоном и в каждый данный момент охватывает лишь какую-то часть залива. Таким

образом, очень большое наводнение бывает в тех случаях, когда основные причины, вызывающие подъем воды, – образование длинной волны и перемещение ее вдоль Финского залива вместе с углубляющимися циклонами, раскачка водных масс Балтийского моря, т.е. возникновение сейши, – действуют одновременно.

Заключение

С учётом всего вышесказанного, а также основываясь на анализе современных тенденций изменчивости интенсивности атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой и водности рек в восточных районах бассейна Балтийского моря, которые демонстрируют направленность к своему снижению, можно вполне уверенно говорить о том, что катастрофическое наводнение Санкт-Петербургу в ближайшие 5–8 лет не угрожает. А после полной достройки Комплекса защитных сооружений (КЗС) от наводнений (дамба) Северная столица будет видимо навсегда избавлена от опасности их губительного воздействия на жилые кварталы, памятники архитектуры и промышленность города. Проект дамбы изначально рассчитывался с запасом прочности – на 5-метровое наводнение в сочетании с 3-метровой ветровой волной. Катастрофа такого масштаба представляется маловероятной, но и в случае её возникновения дамба по расчётам должна уберечь город от разрушения. Тем не менее, при возникновении наводнений, подобных 1824 и 1924 гг., ущерб всё же будет иметь место. Ведь наводнения особо значительной силы сопровождались длительными сильнейшими ветрами и обильными атмосферными осадками.

Исходя из анализа спектрограммы динамики уровня моря в Кронштадте, периодов динамики водности рек, выпадающих в Восточную Балтику, уровня Ладожского озера и оценке изменчивости индексов Северо-Атлантического колебания, наводнение из разряда катастрофических, т.е. с подъёмом уровня более 300 см над ординаром Кронштадтского футштока, возможно ожидать не ранее 2018–2020 гг.

Менее разрушительные наводнения, с подъёмом уровня воды не более 210 см выше Кронштадтского футштока, отнесенные по принятой классификации к группе «опасных», прогнозировать труднее. Их может вызвать циклон даже средней силы, траектория которого не обязательно должна строго соответствовать морфометрии Финского залива. Опасное наводнение, как показывает анализ данных, может возникнуть как при высоких, так и при довольно низких значениях NAO. Проявление же незначительных по силе наводнений исключить полностью нельзя, они будут иметь место всегда. Дело в том, что расстояние от Комплекса защитных сооружений до Петербурга составляет около 20 км. Это самый мелководный участок Невской губы с преобладающими глубинами от 3 до 4 м. Сильные устойчивые ветры западных направлений способны своим волновым воздействием привести в движение практически всю массу воды в этом районе и направить её к устью Невы. В результате уровень воды в реках и каналах Петербурга будет периодически немного повышаться.

На рис. 11 представлена обобщенная схема связи различных воздействующих процессов и факторов, приводящих к возникновению наводнений в Санкт-Петербурге, в том числе экстремальных. Таким образом, наводнения формируются под воздействием ряда соподчиненных природных процессов. Катастрофические же наводнения являются результатом совпадения фаз и суммирования различных колебаний.



Рис. 11. Обобщенная схема причинно-следственных связей, приводящих к возникновению наводнений в Санкт-Петербурге

Литература

1. Антонов А.Е. Крупномасштабная изменчивость гидрометеорологического режима Балтийского моря и ее влияние на промысел. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 248 с.
2. Бабкин В.И., Воробьев В.Н., Качанов С.Ю., Смирнов Н.П. Северо-Атлантическое колебание и многолетняя динамика тока рек Европы // Труды РГГМУ, 1999, вып. 123, с. 114–121.
3. Дроздов В.В., Смирнов Н.П. Колебания климата и донные рыбы Балтийского моря. – СПб.: изд. РГГМУ, 2009. – 249 с.
4. Померанец К.С. Два наводнения, с разницей в сто лет... // Нева, 1998, № 7.
5. Померанец К.С. Наводнения в Петербурге, 1703–1997 гг. – СПб.: Балтрус-бук, 2002.
6. Проект «Моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 3. Балтийское море, вып. 1. Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992.
7. Нежиховский Р.А. Река Нева и Невская губа. – СПб.: Гидрометеиздат, 2001.
8. Исаченко Г.А. Окно в Европу. – История и ландшафты. – СПб.: изд. СПбГУ, 1998.
9. Смирнов Н.П., Воробьев В.Н., Качанов С.Ю. Северо-Атлантическое колебание и климат.– СПб.: изд. РГГМУ, 1998. – 121 с.