

В.А. Бузин, Д.В. Шилов, Н.Ю. Дьяченко, П.В. Солощук

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПАСНЫХ ЛЕДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ НА РЕКЕ НЕВА

V.A. Buzin, D.V. Shilov, N.U. Dyachenko, P.V. Soloshchuk

FORECASTING OF THE DANGEROUS ICE PHENOMENA FOR THE RIVER NEVA

Рассматриваются опасные ледовые явления на реке Нева, развивающееся в процессе её замерзания – образование внутриводного льда, приводящего к закупорке водозаборов, и зажоров, обуславливающих резкое уменьшение стока воды ниже их по течению и наводнения. Излагаются методики прогнозов интенсивности внутриводного ледообразования, максимальных зажорных уровней воды и толщины зажорных скоплений льда.

Ключевые слова: опасные ледовые явления, зажор, прогноз, толщина зажорных скоплений льда, интенсивность ледообразования, река Нева.

The dangerous ice phenomena on the river Neva, developing are considered during its freezing – formation of the intra water ice resulting in corking of water-fences, and ice dams, causing sharp reduction of a drain of water is lower than them on current and flooding. Techniques of forecasts of intensity intra water formations of ice, maximal water levels and thickness congestions of ice are stated.

Key words: dangerous ice phenomena, ice dam, forecast, thickness congestions of ice, intensity ice formation, river Neva.

Река Нева имеет сложный и во многом отличный от других рек России ледовый режим, обусловленный неустойчивым характером погоды зимой и регулированием стока воды в реке глубоководным Ладожским озером.

Особенности ледового режима Невы обуславливают ряд нежелательных ситуаций в жизни Санкт-Петербурга и его пригородов, связанных с перебоем в работе водозаборов из-за забивки их в начале зимы внутриводным льдом и шугой; наводнениями, вызванными зажорами льда на участке Литейный мост – г. Отрадное; подвижками льда, при которых повреждаются причалы, набережные, водозаборы, сносится вниз по течению реки строительная техника, задействованная в ремонте мостов, и снижением расхода воды в реке ниже зажоров до 800 м³/с (при норме 2500 м³/с). Последним примером может служить зажор в начале зимы 2005 г., приведший к затоплению населенных пунктов в устье р. Ижора.

Образование внутриводного льда является неотъемлемой частью процесса замерзания Невы. Намерзая на решетках водозаборов, он нарушает этим нормальное водоснабжение основных потребителей воды Невы: промышленности Санкт-Петербурга, теплоэнергетики и коммунального хозяйства города. Вода нужна также для многочисленных городков и поселков Ленинградской области, прилегающих к Неве. Водопотребление все время растет. В последние годы из-за теплового загрязнения Невы и, возможно, в связи строительством защитных сооружений в Невской губе и изменением климата на реке в начале зимы все

дольше сохраняется ледостав с полыньями, что благоприятствует внутриводному ледообразованию.

Наиболее опасными ледовыми явлениями на Неве являются зажоры льда (рис. 1).



Рис. 1. Зажор льда у моста Александра Невского зимой 1967–68 гг.

Они наблюдаются на реке почти ежегодно при установлении ледяного покрова, а также зимой во время оттепелей. Иногда они имеют катастрофический характер. В результате зажоров сносятся вниз по течению, а нередко разрушаются суда и строительная техника, задействованная в ремонте невских мостов. Существует и опасность гибели людей, работающих со льда в период замерзания реки. Скопления льда садятся на оголовки водозаборных сооружений, что нарушает нормальную деятельность предприятий и хозяйственных объектов Санкт-Петербурга, расположенных на зажорных участках реки.

Подъемы воды, вызываемые зажорами, ведут к затоплению многих участков прибрежной зоны. За историю Петербурга наблюдалось свыше 80 зажорных наводнений, случившихся на 22-километровом участке от Охтинского моста до Понтонной (1235 км от устья). Подъем уровня воды из-за стеснения русла реки рыхлым льдом достигает иногда 3,03,5 м, а на участке выше Володарского моста максимальные зажорные уровни превышают нагонные. При мощных зажорах с повторяемостью максимального уровня 1 раз в 2025 лет и реже подвергается затоплению и подтоплению прибрежная территория вдоль Невы и ее притоков – Ижоры, Славянки и Тосны, – большая часть которой плотно застроена; на этой территории находятся десятки промышленных предприятий. В С.-Петербурге, Колпине, Отрадном и Усть-Ижоре затопляется территория площадью 2,5-3,0 км², повреждаются причалы, набережные, водозаборы и пр. По данным

столетних наблюдений, продолжительность стояния высоких зажорных уровней иногда бывает более 30 дней.

Зажоры, образующиеся выше Ивановских порогов, вызывают резкое, иногда до $800 \text{ м}^3/\text{с}$ сокращение расхода воды в реке и падение уровня воды ниже зажора, из-за чего оголяются выведенные в реку водозаборы. Почти по всей реке наинизшие уровни воды отмечаются во время ледовых явлений.

Из изложенного выше следует целесообразность надежного прогноза опасных ледовых явлений на Неве.

В настоящее время существуют методики прогнозов зажоров льда и максимальных зажорных уровней воды. Они разработаны в Государственном гидрологическом институте и Северо-Западном УГМС. Теоретические основы причин формирования скоплений льда при замерзании Невы достаточно полно вскрыты в статье К.Е. Иванова и Н.А. Колокольцева [5]. Базируясь на выводах этих авторов, специалисты ГГИ и Северо-Западного УГМС установили прогностические зависимости, основанные на учете уровня воды Ладожского озера в ноябре и ледовой обстановки на Неве в период ее замерзания [4–6].

Часто возникает острая необходимость оповещения предприятий и организаций, имеющих водозаборные сооружения или ведущих строительные работы в русле и на берегах реки, не только о максимальных зажорных уровнях воды, но и о других характеристиках опасных ледовых явлений в период замерзания реки. В частности, для успеха борьбы с внутриводным льдом и зажорами необходимы достоверные сведения об интенсивности внутриводного ледообразования и толщине скоплений льда на различных участках реки, достигающей 5–6 м.

В настоящее время накоплен значительный объем результатов теоретических исследований процесса зажорообразования на шугоносных реках [1–11], который позволяет решить задачу оценки интенсивности внутриводного ледообразования и толщины зажорных скоплений льда.

Для прогноза интенсивности внутриводного ледообразования на Неве использована расчетная схема В.А. Рымши – Р.В. Донченко [10], обоснованная результатами лабораторных и натурных исследований и рекомендованная для использования в расчетах характеристик ледовых явлений при проектировании и эксплуатации гидротехнических сооружений на реках и каналах. Эта схема базируется на теории распределения скрытого тепла кристаллизации переохлажденных масс воды в водных потоках и позволяет определить интенсивность образования льда по глубине потока, а также оценить длительность периода ледообразования. В результате для средней интенсивности образования внутриводного льда в Неве получена формула

$$I_h = -6,29(1 - \alpha) \frac{\theta}{h}, \quad (1)$$

где I_h в $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{с}$; α – доля теплоотдачи с водной поверхности, в результате которой образовался поверхностный лед; θ – среднесуточная температура воздуха по метеостанции Санкт-Петербург.

Формула (1) позволяет рассчитать среднюю за сутки интенсивность ледообразования по данным об уровне воды и температуре воздуха. Для прогноза нужно иметь данные метеопрогноза с заблаговременностью 5 суток. По уровню Z на дату составления прогноза по кривой $Q(Z)$ определяется расход воды, который используется в прогнозе интенсивности внутриводного ледообразования, поскольку расходы в период замерзания рек изменяются в небольших пределах в течение этого небольшого периода.

Необходимое для определения доля поверхностного теплового покла, приводящего к образованию поверхностного льда

$$\alpha = -0,0004 \frac{\theta}{A}, \quad (2)$$

значение коэффициента турбулентного обмена (вязкости) водных масс рассчитывается по формуле В.М. Маккавеева [8]:

$$A = \frac{ghV}{C(0,7C + 6)}, \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; V – скорость течения, м/с; C – коэффициент Шези.

Главным фактором, определяющим мощность зажоров на Неве, является водность реки в период ее замерзания (ноябрь–декабрь). Последняя из-за большой зарегулированности стока реки Ладожским озером, меняется после весеннего половодья незначительно, что позволяет использовать для среднесрочного прогноза максимальных зажорных уровней Невы ($Z_{\text{макс}}$) уровни и расходы воды в месяцы, предшествующие началу замерзания реки. Для наиболее зажороопасного участка реки у завода «Большевик», где нередко при $Z_{\text{макс}} > 3$ м БС происходит затопление прилегающих к реке территорий, удалось выявить достаточно тесные зависимости максимальных зажорных уровней на этом речном участке от средних расходов воды Невы в сентябре (Q_{IX}) и октябре (Q_X):

$$Z_{\text{макс}} = 0,0013 Q_{IX} - 1,66 \quad (R = 0,727), \quad (4)$$

$$Z_{\text{макс}} = 0,0015 Q_X - 1,87 \quad (R = 0,782). \quad (5)$$

где R – коэффициент корреляции. Зависимости (7) и (8) позволяют прогнозировать зажорный максимум уровня с заблаговременностью до 1,5 месяца. Точность прогноза по ним вполне достаточна. К сожалению, в оперативных условиях не всегда есть возможность получить сведения о средних месячных расходах воды. Как показали выполненные исследования для прогноза можно использовать и связи $Z_{\text{макс}}$ с уровнями воды в истоке Невы у ст. Петрокрепость в сентябре и октябре:

$$Z_{\text{макс}} = 1,11 Z_{IX.Петр} - 2,70 \quad (R = 0,763), \quad (6)$$

$$Z_{\text{макс}} = 1,18 Z_{X.Петр} - 2,88 \quad (R = 0,823). \quad (7)$$

Зависимости (4)–(7) установлены по сетевым материалам наблюдений за уровнями и расходами воды, ледовой обстановкой и датами ледовых явлений за период с 1890 по 2008 год.

В оперативных условиях расход воды определяется по кривой связи расхода Невы с уровнем воды у ст. Петрокрепость ($R = 0,998$)

$$Q = 48,791 Z_{\text{Петр}}^2 + 326,13 Z_{\text{Петр}} + 349,95 \quad (8)$$

по мере поступления оперативной информации об уровне воды с гидрологического поста Петрокрепость.

Первый выпуск прогноза приурочивается к 1 октября, когда появляются сведения об уровнях воды Невы в сентябре. Для прогноза используются зависимости (4) и (6). Затем прогноз составляется по зависимостям (5) и (7) 1 ноября. Наконец, он может быть уточнен 1 декабря по краткосрочным методикам, изложенным в работах [4-6] и применяемым в настоящее время в Северо-Западном УГМС.

Эффективность разработанной методики оценивается через критерий, представляющий собой отношение средней квадратической ошибки прогноза (s) к среднему квадратическому отклонению максимального зажорного уровня на участке Невы, для которого составляется прогноз, от его нормы ($\sigma_z = 56$ см). Разработанная методика прогноза максимальных зажорных уровней воды Невы

по критерию $\frac{s}{\sigma_z}$ является согласно Наставлению по службе прогнозов Росгидромета (раздел 3, часть 1) эффективной, так почти все прогностические зависимости характеризуются отношением $\frac{s}{\sigma_z}$ меньше 0,8.

Для борьбы с зажорами на Неве используются ледоколы. При этом важно знать толщину скоплений шуги и льдин, в которых им предстоит пробивать канал, по которому будет сплавляться ледяной материал вниз по течению реки. Эта толщина может быть найдена из условия равновесия скопления льда. Оно имеет следующий вид:

$$\frac{\delta^2(1-0,9\delta)^{10/3}}{\left[(r^{3/2} + 1)^{-1}(1-0,9\delta) + 0,9\delta \right] (r^{3/2} + 1)^{4/3}} = \frac{\gamma_v (qn_p)^2}{\eta h_3^{13/3}} \quad (9)$$

[1, 2], где γ_v – удельный вес воды, Н/м^3 (9800 Н/м^3); $q = \frac{Q}{B}$ – удельный расход воды, $\text{м}^2/\text{с}$; h_3 – глубина реки у верхней кромки скопления льда, м; δ – отношение толщины скопления льда к глубине реки; r – отношение коэффициента шероховатости нижней поверхности льда к коэффициенту n_p ; η – коэффициент физико-механических свойств не сплошной ледяной массы, который находится в зависимости от температурных условий процесса зажорообразования:

$$\eta = -0,000006 \theta_{\text{cp}}^2 - 0,0004 \theta_{\text{cp}} + 0,0136, \quad (10)$$

где θ_{cp} – средняя температура воздуха за период от даты устойчивого перехода её через 0 °С до даты начала ледообразования.

На рис. 2 приведен график зависимости относительной толщины шуго-ледяного слоя от интегральной характеристики гидравлических условий потока

и физико-механических свойств льда $\Gamma = \frac{\gamma_B (qn_p)^2}{\eta h_3^{13/3}}$ для Невы у Новосаратовки,

где измеряются расходы воды. Расчет координат зависимости $\Gamma = f(\delta)$ велся по формуле (9) путем задания и подстановки в неё тех или иных значений δ . Относительная шероховатость нижней поверхности ледяного покрова определена при $n_{л} = 0,01$ [9] и $n_p = 0,035$.

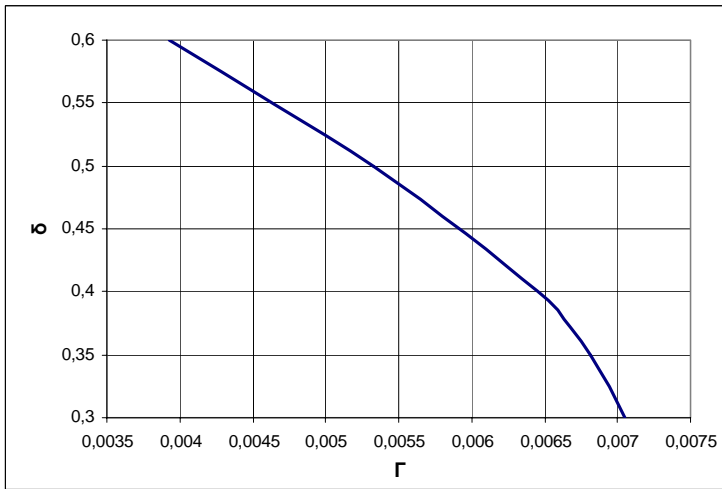


Рис. 2. Зависимость относительной толщины шуго-ледяного скопления (δ) на Неве у Новосаратовки от интегральной характеристики гидравлики водного потока и физико-механических свойств масс льда (Γ)

Установленная зависимость $\Gamma = f(\delta)$ предлагается для прогнозирования толщины зажорного скопления льда по данным прогноза максимального зажорного уровня в метрах БС (Z_{\max}), расхода воды (Q) и температуры воздуха (θ) в период образования зазора. С целью предсказания уровня Z_{\max} для Новосаратовки могут быть использованы зависимости, аналогичные зависимостям, приведенным выше:

$$Z_{\max} = 0,827 Z_{IX.Петр} - 1,34 \quad (R = 0,701), \quad (11)$$

$$Z_{\max} = 0,896 Z_{X.Петр} - 1,52 \quad (R = 0,782). \quad (12)$$

При наличии предсказанных значений уровня Z_{\max} и расхода Q сначала определяется глубина реки у верхней кромки зазора (h_3). Затем рассчитывается по формуле величина Γ . Далее по зависимости $\delta = f(\Gamma)$ определяется относительная толщина скопления шуги и льдин и вычисляется абсолютная величина

$$h_{ск} = \delta h_3. \quad (13)$$

Проверить расчетную схему можно на примере зимы 1952–1953 гг., когда на Неве проводилась ледомерная съемка, выполненная в январе 1953 года. Зима 1952–1953 гг. по высоте подъема уровней воды, обусловленных зазором на реке, находится на четвертом месте, что соответствует вероятности превышения этих уровней на участке 12–45 км от устья Невы 8 %. Данные о толщине зазора льда, сформировавшегося на р. Нева в начале зимы 1952–1953 гг., содержатся в каталоге [7]. Выписка из каталога приведена в табл. 1.

Таблица 1

Толщина зазора, сформировавшегося на р. Нева в начале зимы 1952–1953 гг.

Пункт наблюдений	Расстояние от устья, км	Максимальный зазорный уровень воды и его дата		Зазорный подъем уровня, м	Толщина слоя скопления шуги и льдин, м
		Z, м БС	дата		
с. Ивановское (г. Отрадное)	45	4,12	4,01	2,9	5,0
с. Усть-Славянка	29	3,74	4,01	3,2	5,0
з-д «Большевик» (Обуховский з-д)	23	3,60	4,01	3,3	6,0
Фабрика им. Ногина (Невская мануфактура)	17	2,31	23,12	2,5	6,0

Зимой 1952–1953 гг. максимум уровня воды Невы у Новосаратовки наблюдался 4 января при расходе воды 1390 м³/с и был равен 3,72 м БС. Этому уровню соответствуют глубина реки у верхней кромки зазора 8,48 м и ширина русла 377 м.

Согласно температурным условиям в период формирования зазора обобщенный коэффициент физико-механических свойств скопления шуги и льдин $\eta = 3,07 \frac{H}{M^2}$. На дату максимального зазорного уровня определяем значение интегральной характеристики гидравлики водного потока и физико-механических свойств масс льда

$$\Gamma = \frac{\gamma(qn_p)^2}{\eta h_3^{4,33}} = 0,00508.$$

По зависимости на рис. 1 этому значению Γ соответствует

$$\delta = \frac{h_{ск}}{h_3} = 0,59.$$

Тогда

$$h_{ск} = 0,59 \cdot 8,48 = 5,0 \text{ м.}$$

Ближайший к Новосаратовке створ, где измерялась в январе 1953 г. толщина скопления шуги и льда – это Усть-Славянка (табл. 1).

Измеренная толщина равна 5,0 м.

Точность прогнозов, составленных по установленным зависимостям, зависит от обеспеченности этих решений материалами натурных исследований прогнозируемых процессов и явлений. К сожалению, систематические наблюдения за многими важными характеристиками процесса замерзания Невы не ведутся и, в частности, за интенсивностью образования внутриводного льда и толщиной скоплений шуги. На сегодня количественных данных об этих характеристиках очень мало, они носят отрывочный характер. Путем расчетов установлены следующие диапазоны численных характеристик исследуемых явлений: для интенсивности образования внутриводного льда $0,7-7,0 \text{ кг/м}^3\text{с}$, а толщины скоплений шуги и льдин 18 м.

Зависимости, приведенные в статье, могут быть служить основой для реализации автоматизированной системы прогнозирования опасных ледовых явлений на Неве. Функциями этой системы должны быть автоматическое измерение уровня воды Невы у Петрокрепости и Новосаратовки, передача данных измерений по техническим каналам связи в центр их обработки, диагностирование и прогнозирование ледовых ситуаций. Прогностическая информация, передаваемая по межкомпьютерной связи административным органам, позволит своевременно принимать решения о воздействии на ледовые процессы с целью предотвращения возможных ущербов от неблагоприятных ледовых явлений, и более устойчиво работать в начале зимы хозяйственным объектам, расположенным на берегах Невы.

Спектр характеристик зажоров, которые прогнозируются, может быть существенно расширен, для чего требуется в дальнейшем изучить закономерности изменения в ходе процесса зажоробразования толщины скоплений льда. Знание закономерности перемещения вверх по течению кромки ледяного покрова в процессе замерзания реки при наличии более детальных во времени данных о температуре воздуха и гидрологических характеристиках в принципе позволяют решить задачу определения толщины скопления льда на любом участке Невы.

Повысить достоверность прогноза зажоров льда на Неве можно путем введения в прогностические зависимости дополнительных аргументов. Выше описанные условия формирования опасных ледовых явлений на Неве в период ее замерзания указывают на необходимость учета при их прогнозе синоптических условий замерзания реки, определяющих интенсивность ледообразования в Неве, скорости перемещения кромки льда вверх по течению, а также ветровых нагонов и поступления льда из Ладоги в реку.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.2.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (государственный контракт № П1079 от 24 августа 2009 г.) по направлению «География и гидрология суши»

Литература

1. Бузин В.А. Результаты расчета зажоров в состоянии равновесия // Труды ГГИ, 1989, вып. 345, с. 54-62.
2. Бузин В.А. Условия и прогноз подвижек льда при замерзании реки Нева // Метеорология и гидрология, 1997, № 8, с. 87-94.
3. Винников С.Д., Севастьянова Н.В. Оценка количества льда в зажоре р. Невы. – В кн.: Исследование влияния сооружений гидроузлов на ледовый и термический режимы рек и окружающую среду. – Л.: Энергоатомиздат, 1991, с. 102-107.
4. Донченко Р.В., Щеголева Е.В. Методика прогноза максимальных зажорных уровней воды реки Невы // Труды ГГИ, 1989, вып. 345, с. 74-81.
5. Иванов К.Е., Колокольцев Н.А. Динамика ледостава и зажоров льда на реке Неве // Труды ГГИ, 1950, вып.6, с. 140-195.
6. Карнович В.Н., Сурикова Ж.Н., Севастьянова Н.В. Прогноз максимальных уровней воды при зажорах льда на р. Невк // Метеорология и гидрология, 1984, № 12, с. 111-113.
7. Каталог заторных и зажорных участков рек СССР. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976, т. 1. – 260 с.; т. 2 – 288 с.
8. Маккавеев В.М. Теория процессов перемешивания при турбулентном движении свободных потоков и вопросы зимнего режима рек // Записки ГГИ, 1931, т. V, с. 75-117.
9. Нежиховский Р.А. Коэффициент шероховатости нижней поверхности шуголедяного покрова // Труды ГГИ, 1964, вып. 110, с. 54-85.
10. Рымша В. А., Донченко Р. В. Метод расчета (прогноза) условий образования внутриводного льда // Труды ГГИ, 1962, вып. 93, с. 52-67.