

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

УДК 556.043:556:535

Банщикова Любовь Святославовна

**Наводнения на реках, вызванные заторами льда,  
методика их мониторинга и оценки риска**

Специальность 25.00.27

«Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Санкт – Петербург

2009

Работа выполнена в Государственном учреждении «Государственный гидрологический институт»

Научный руководитель:

доктор технических наук

**Бужин Владимир Александрович**

Официальные оппоненты:

Заслуженный деятель науки РФ,

доктор географических наук,

профессор

**Барышников Николай Борисович**

кандидат географических наук

**Марков Михаил Леонидович**

Ведущая организация

**Институт географии РАН,  
Лаборатория гидрологии**

Защита диссертации состоится «10» декабря 2009 г. на заседании специализированного совета Д.212.197.02 Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, 98

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета

Автореферат разослан «06» ноября 2009 г.

Ученый секретарь специализированного совета,

Заслуженный работник высшей школы РФ,

кандидат географических наук



В.Н. Воробьев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Затопления льда – явление характерное для большинства рек России. Быстрые и значительные подъемы уровней, возникающие выше затоплений, часто намного превосходят максимальные уровни весенних половодий и дождевых паводков и создают чрезвычайные ситуации для прибрежных территорий рек. Поэтому вопросы мониторинга и оценки риска затоплений, вызванных затоплениями, для снижения их негативных последствий стоят достаточно остро, особенно в связи с освоением северных территорий страны.

**Цель исследований** состояла в выявлении закономерностей формирования затоплений, обусловленных затоплениями льда, разработке методики отслеживания по данным наблюдений за уровнем воды на гидрологических постах мест образования затоплений в процессе вскрытия реки, а также методики оценки гидрологической составляющей риска затоплений затоплений.

Для достижения намеченной цели решены следующие **задачи**:

- по данным многолетних наблюдений за уровнями воды, а также о морфометрических характеристиках русла и поймы в гидрометрических створах, установлены основные факторы, определяющие пространственно-временные масштабы затопления прибрежных территорий при затоплениях на реках России;
- составлен каталог уровней характеристик затопления пойм средних и больших рек России при затоплениях льда;
- построена карта-схема и выполнен анализ распространения превышения максимального затопления уровня воды 1%-ной обеспеченности над уровнем поймы на средних и больших реках России;
- разработана методика определения местоположения затопления льда на речном участке и оценки зон затопления прибрежных территорий путем отслеживания динамики процесса затопления по данным наблюдений за уровнями воды на стационарных и временных гидрологических постах, расположенных вдоль реки;
- построена карта-схема распространения на средних и больших реках России индекса потенциального риска затоплений затоплений;
- разработан способ расчета глубины затопления поймы 1% вероятности

превышения для участков рек, не охваченных наблюдениями за уровнем воды.

**Методологической основой выполненных исследований** является комплексный гидролого-географический анализ и статистические приемы выявления расчетных зависимостей.

**Научная новизна.** В результате исследований впервые

- создан каталог и построены карты уровенных характеристик затопления при заторах льда пойм средних и больших рек России;
- установлены географические закономерности распространения на реках России превышения заторного уровня 1%-ной обеспеченности над поймой и потенциального ущерба от заторных наводнений;
- разработана методика определения места образования затора льда;
- разработана методика расчета превышения заторного уровня 1%-ной обеспеченности над поймой на участках рек, не освещенных данными многолетних гидрологических наблюдений.

**Достоверность результатов исследований** обусловлена использованием метрологически обеспеченных данных многолетних наблюдений за уровнями воды гидрологических постов Росгидромета, а также использованием общепризнанных и проверенных многими исследователями методологических принципов речной гидравлики и математической статистики.

**На защиту выносятся**

- выявленные географические закономерности распространения заторных наводнений;
- методика мониторинга процесса заторообразования;
- способ оценки гидрологических составляющих риска затопления прибрежных территорий при заторных наводнениях на участках рек, не охваченных гидрологическими наблюдениями.

**Практическая значимость работы.** Предлагаемая методика мониторинга процесса заторообразования позволяет определить местоположение головы затора, что важно при борьбе с затором, а также проследить её продвижение вниз по реке без использования авиаразведок. Использование методики определения потенциального риска заторных наводнений на проблемных участках рек будет способствовать рациональному хозяйственному использованию прибрежных

территорий и надежной оценке рисков от затопления при страховании хозяйственных объектов на этих территориях.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы были доложены и обсуждались на Международном симпозиуме по льду (Санкт-Петербург, 2004), VI Всероссийском гидрологическом съезде (Санкт-Петербург, 2004), конференциях молодых специалистов Росгидромета (Москва, 2007, 2008), научно – практической конференции «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций» (Санкт-Петербург, 2008), на итоговых сессиях Ученого совета ГУ «ГГИ» (Санкт-Петербург, 2007, 2008), научной конференции, посвященной 175-летию Гидрометслужбы России (Москва, 2009).

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 105 наименований. Полный объем диссертации составляет 141 страницу, включая 30 рисунков и 7 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дано обоснование актуальности темы, определены цель и задачи исследований, перечислены основные защищаемые положения, изложена практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** выполнен анализ закономерностей и особенностей географического распространения заторных наводнений на реках России. Показано, что число заторов, как правило, уменьшается по длине реки, но их размеры возрастают в 5 - 10 раз, достигая протяженности 100-150 км в низовьях больших рек, текущих на север.

В пределах европейской части России заторные подъемы уровней, приводящие к значительным затоплениям прибрежных территорий, часто повторяются в среднем и нижнем течении рек Печоры, Северной Двины и Мезени. На реках Кольского полуострова и северо-западного региона России заторы образуются главным образом в приустьевых участках рек. Протяженность заторных участков на этих реках, как правило, небольшая: от 1 до 10 км. Заторные подъемы уровней достигают 5 м, хотя в среднем составляют 2 – 3 м. Повторяемость заторов на реках северо-запада находится в пределах от 20 до 40%. Вскрытие рек центральных и восточных районов европейской части России происходит при

невысоких уровнях. Заторные подъемы уровней, как правило, не превышают 2-3 м, а их повторяемость изменяется от 20 до 30 %. Реки бассейна Оби отличаются затяжным характером вскрытия, в период которого значительно снижается прочность ледяного покрова и уменьшается вероятность образования заторов на реках. Мощные заторы с повторяемостью 60-80 % и заторными подъемами уровня в 3-5 м наблюдаются, главным образом, в верховьях Оби, а так же на Иртыше и Томи. На Енисее наиболее мощные скопления льда, как правило, формируются в нижнем течении (Туруханск, Игарка и Дудинка). В результате интенсивного развития волны половодья под влиянием дружной весны при почти одновременном вскрытии главной реки и ее притоков наиболее благоприятные условия для формирования заторов весной наблюдаются на реке Лене. Данные наблюдений на Лене показывают, что одновременно вскрываются участки реки протяженностью 200-300 км, а продвижение фронта вскрытия достигает скорости до 100 км/сутки. В местах формирования заторов вскрытие реки задерживается на 2-6 суток, повторяемость заторов 80-100%. Заторы часто формируются и на притоках Лены: Алдане, Витиме, Вилюе, Олекме. В частности, заторные подъемы уровня воды на р.Олекма могут достигать 10 м. На реках Восточной Сибири (Колыма, Тимптон, Яна) половодье формируется также весьма интенсивно, чему способствует дружный характер весны и наличие многолетней мерзлоты на водосборах. Поэтому в комплексе с особенностями строения русла рек создаются весьма благоприятные условия для формирования мощных заторов льда. Повторяемость заторов на этих реках составляет 75 - 85%, но высота заторных подъемов уровня ниже, чем на реках Лене и Енисей.

Анализ распространения прибрежных участков рек России, которые подвергаются затоплению при заторах льда, по данным гидрологических наблюдений до 2005 года показал, что на 36% гидрологических постов превышение 1%-ого максимального заторного уровня воды над бровкой берега составляет не более 1 м. На 32% постов глубина затопления поймы при заторах находится в пределах от 1 до 2 м. В 6% случаев она составляет от 3 до 4 м; в 3% - от 4 до 5м, а более 5м встречается лишь в 4% случаев, но они наиболее опасны с точки зрения ущерба от затопления.

**Во второй главе** выполнен обзор работ, посвященных изучению различных

аспектов заторных явлений на реках. Кратко рассмотрены методы и способы исследования этих явлений в историческом аспекте. Проанализированы работы, посвященные снижению негативных последствий формирования заторов льда для прибрежных районов.

**Третья глава** посвящена рассмотрению механизма и условий формирования заторов льда, а также обзору методов расчета их характеристик, включая уровни воды выше головы затора.

Формирование затора определяется комплексом условий и факторов: направлением вскрытия реки, которое должно происходить сверху вниз по течению, как, например, на реках, текущих на север; наличием ниже по течению толстого ледяного покрова; прочностью и количеством льда, перемещающегося вниз по течению; интенсивностью притока воды в русло, морфометрическими характеристиками русла и др.

Последовательность вскрытия реки сверху вниз по течению - условие необходимое, но недостаточное для образования затора, поскольку только при значительной скорости течения воды (0,6 м/с и более) создаются условия торошения ледяных полей и подсова льдин под кромку ледяного покрова.

Места образования скоплений льда - это участки рек, где кинетической энергии водного потока недостаточно для разрушения и транспортировки льда. Заторы льда образуются на участках рек со сложными морфологическими условиями. Основные из них – изменение уклона реки от большого к меньшему, сужение русла, островные участки, крутые повороты русел, мест слияния рек. Здесь водный поток откладывает часть переносимого льда. При этом забивается живое сечение реки и, как следствие, формируется затор. Отмечаются следующие ограничения в транспорте льда:

- по глубине, если на участке реки  $h_n \leq 2,5 t_l$ ,  
где  $h_n$ - глубина реки на перекатах,  $t_l$ - толщина льда при вскрытии реки;
- по ширине ( $B_p$ ), если  $h_n \geq 2,5 t_l$ .

Затор образуется и в случае, когда расход льда ( $Q_l$ ), поступающий с ледосборного участка к нижнему его створу, будет больше льдопропускной способности реки в этом створе ( $Q_o$ ). При  $Q_o/Q_l \geq 1$  скопление льда образоваться не может. Образование затора имеет место при  $Q_o/Q_l < 1$ . При  $Q_o = 0$  ледяное

скопление формируется непосредственно у створа.

Строение речной долины и русла реки оказывает значительное влияние на формирование заторов льда и соответственно затопляемость прибрежных территорий выше затора. Сопоставление карт распространения различных типов руслового процесса (по С.И. Пиньковскому) и величины превышения максимального заторного уровня 1% обеспеченности над поймой позволило установить связь руслового процесса с глубиной затопления прибрежных территорий.

Для верхних и частично средних звеньев русловой сети наиболее характерным является немеандрирующее однорукавное русло и ограниченное меандрирование. Сформировавшиеся на этих участках рек заторы льда могут вызвать подъем уровня воды над поймой на 1-2 метра, поскольку пойма на этих участках слабо развита. Как правило, здесь она односторонняя, а берега высокие.

Для среднего течения рек европейской части России, в том числе рек северо-запада ЕТР: Печора, Северная Двина, Мезень, так же преобладающим типом руслового процесса является немеандрирующее однорукавное русло. Максимальный заторный уровень воды 1% обеспеченности на перечисленных реках выше поймы не более чем на 3 метра.

Для верхнего течения больших рек Сибири (Лена, Енисей, Обь) преобладающим типом руслового процесса является немеандрирующее однорукавное русло и ограниченное меандрирование. Здесь величина превышения максимального заторного уровня 1% обеспеченности над уровнем выхода воды на пойму находится в пределах от 2 до 5-х метров. Для среднего течения сибирских рек русловой процесс, как правило, проявляется в виде разветвленного русла (пойменная и русловая многорукавность). В руслах рек часто встречаются острова, являющиеся препятствием при транспортировке льда вниз по течению. Глубина затопления поймы при 1% уровне достигает наибольших значений: более 5 м.

На различных участках рек существуют промежуточные состояния русловых процессов, поэтому в целом можно говорить только о тенденции зависимости затопляемости прибрежных территорий при образовании заторов в руслах рек от руслового процесса. Следует отметить, что протяженность поворотов, участков с сужением русла и перекатов, как правило, меньше прямолинейных участков с последовательно уменьшающимся уклоном. Поэтому скопления льда в таких



местах менее устойчивы, чем в местах уменьшения уклона. В особенности благоприятствует образованию заторов сочетание нескольких видов русловых препятствий - крутого поворота с сужением русла, падения уклона с русловой многорукавностью и т.п.

**Четвертая глава** посвящена разработке методики определения уровней воды выше головы затора на участках между пунктами наблюдений по данным наблюдений за уровнями на стационарных и временных гидрологических постах и определению местоположения головы затора на каждую дату его развития.

При незначительном изменении скорости водного потока по длине речного участка и во времени изменение уровня воды находится решением уравнений Сен-Венана, представленных в следующем виде:

$$I = \frac{1}{g} \left( v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} \right) + \frac{v^2}{C^2 R}, \quad (1)$$

$$B \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

где  $I$  – уклон водной поверхности,  $v$  – скорость водного потока,  $x$  – продольная координата,  $z$  – отметка свободной поверхности потока,  $t$  – время,  $B$  – ширина потока,  $R$  – гидравлический радиус.  $Q$  – расход воды,  $g$  – ускорение свободного падения,  $C$  – коэффициент Шези.

Расчет неустановившегося движения воды в русле с использованием уравнений (1) и (2) сводится к нахождению отметки свободной поверхности воды ( $z$ ) и расхода воды в виде зависимости  $Q = f(x, t)$ . В результате решения уравнений (1) и (2) с некоторыми упрощениями расчетная величина скорости продвижения постоянной отметки ( $z$ ) по длине реки составит:

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{1}{B} \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \left[ \frac{\partial K}{\partial x} - \frac{K}{2} \left( -\frac{\partial z}{\partial x} \right)^{-1} \left( -\frac{\partial z^{-1}}{\partial x} \right) \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right], \quad (3)$$

где  $K$ -модуль расхода воды.

При заданных начальных условиях методом конечных разностей по уравнению (3) можно решить ряд задач, в частности, выполнить расчет отметки свободной

поверхности на любой момент времени. При этом уравнение (3) целесообразно представить в виде графика, на котором по оси ординат откладывается время ( $t$ ), по оси абсцисс - расстояние от начального створа ( $L$ ), а уровни воды ( $H$ ) представлены в виде изолиний.

Общепринятый стандартный анализ данных наблюдений за уровнями воды на гидрометрических постах по длине реки заключается в построении совмещенных для ряда гидрологических постов хронологических графиков колебания уровня воды  $H = f(t)$ . Эти графики мало информативны с точки зрения процессов, происходящих в руслах на участках между гидрометрическими створами.

Анализ изменения уровня воды по длине реки по изолиниям отметок уровня воды ( $H$ ) значительно расширяет возможности использования наблюдаемой информации об уровнях воды в период образования заторов в руслах рек. Графики  $H=f(L,t)$  содержат информацию об изменении уровня воды в любом створе реки и на любую дату, об уклонах водной поверхности, о месте образования затора льда, о продолжительности затопления прибрежных территорий и поймы, о длине подпорного участка и т.д. На графиках  $H=(L, t)$  по оси можно отмечать места впадения притоков, расположения пойм, населенных пунктов и других подвергаемых затоплению объектов. В работе представлены примеры практического использования такого графика на примере рек Лена, Северная Двина и Печора.

Построение графиков изолиний следования постоянных отметок поверхности воды производится следующим образом. На координатную сетку в координатах времени ( $t$ ), (вертикальная ось), и длины участка реки ( $L$ ), (горизонтальная ось), наносятся наблюдаемые значения отметок свободной поверхности в абсолютных отметках в виде поля точек. В поле этих точек проводятся изолинии отметок уровней воды (изохроны). Использование программы «Surfer», предназначенной для интерполяции кривых водной поверхности, значительно облегчает техническую сторону выполнения данной процедуры. На рисунке 1 представлен график  $H=f(L,t)$  для р. Лена в половодье 2001 года.

Графики  $H=f(L,t)$  являются особенно информативными при определении места формирования головы затора. При формировании головы затора соседние изолинии уровня воды начинают сходиться, а в момент размыва (разрушения) затора и тем более при его прорыве, соседние изолинии начинают расходиться, правые – по

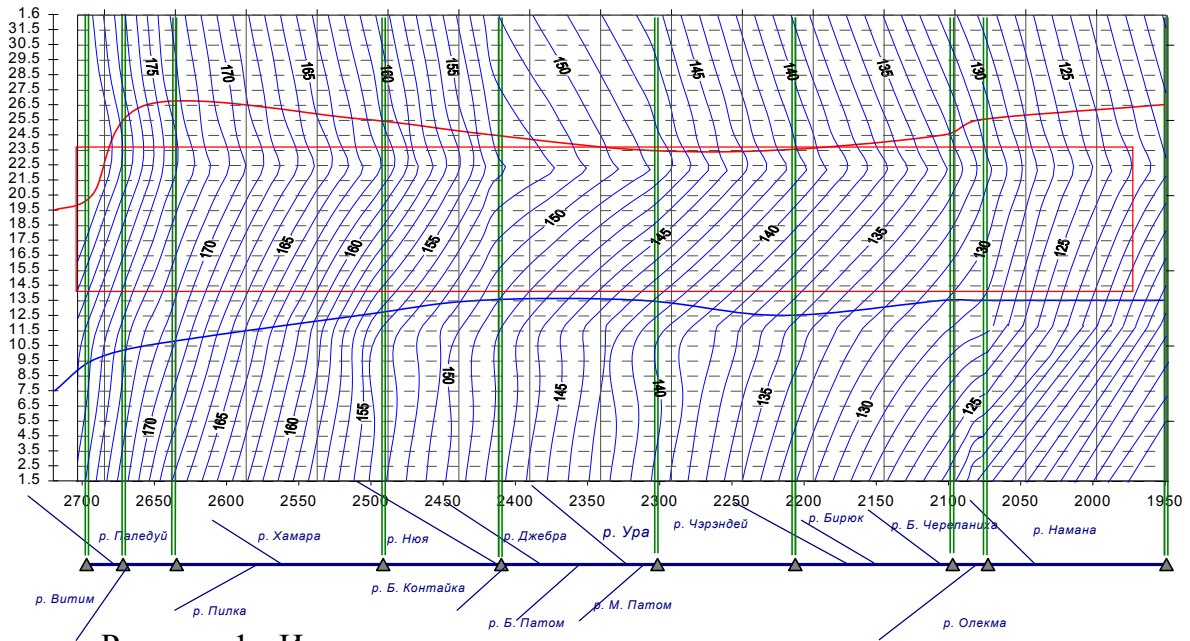


Рисунок 1 - Изолинии следования постоянных отметок поверхности воды по длине реки Лена с 01.05 по 31.05.2001г.

направлению течения, левые – против течения. Дополнительно к графикам, представленным на рисунке 1 целесообразно выполнить построение на каждую дату более наглядного продольного профиля водной поверхности (рисунок 2). По изменению уклонов водной поверхности по длине реки можно уточнить место расположения затора.

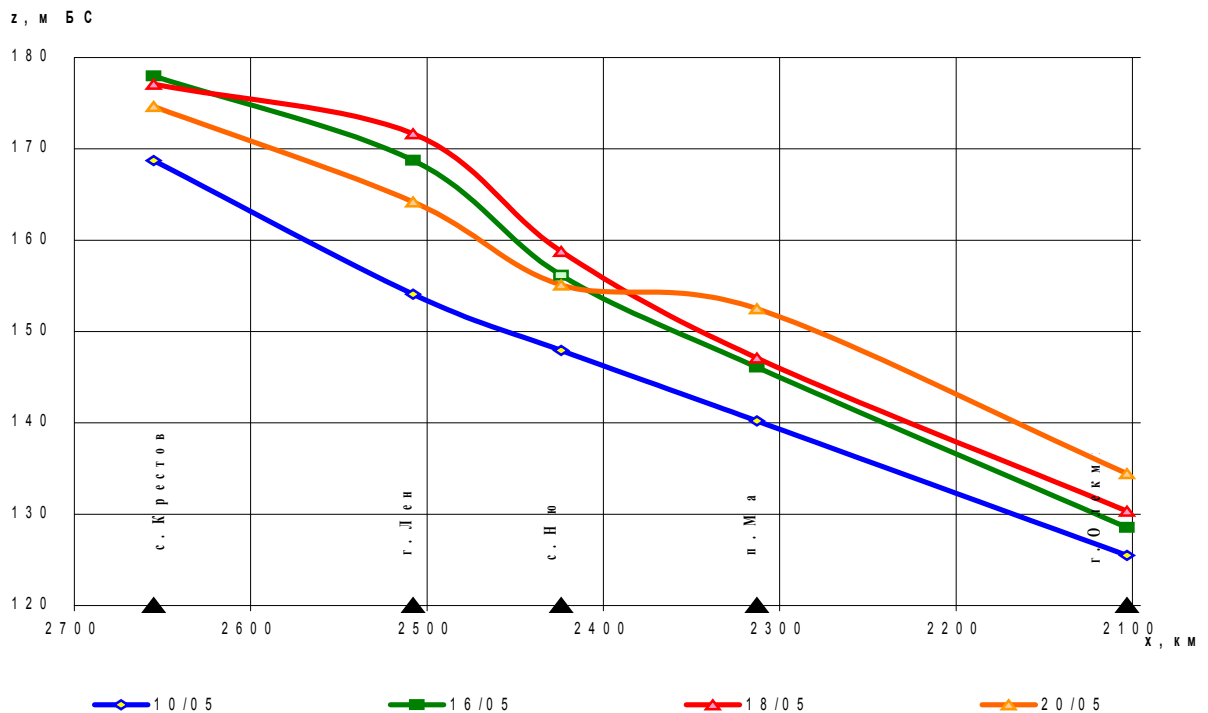


Рисунок 2 - Продольный профиль водной поверхности р. Лена в период формирования затора с 01.05 2001 по 31.05.2001г.

При наличии заранее заготовленных поперечных профилей русла реки на ее проблемных участках, не охваченных режимными гидрологическими наблюдениями, можно определить не только местоположение головы затора, но и толщину скопления льда. Определение толщины скопления льда основывается на уравнении, характеризующем водопропускную способность русла подо льдом, которое можно представить в следующем виде:

$$\frac{Q^2}{\Delta H} = \frac{L(\omega - 0,9t_{ск}B)}{n_p^2 [B(\alpha^{3/2} + 1)]^{4/3}}, \quad (4)$$

где  $Q$  - расход воды под скоплением льда,  $\Delta H$  - перепад уровня воды на участке стеснения русла скоплением льда длиной  $L$  (участок с повышенным уклоном водной поверхности),  $\omega$  - площадь поперечного сечения русла, соответствующая средней отметке уровня на этом участке ( $H_{cp}$ ),  $t_{ск}$  - толщина скопления льда,  $B$  - ширина реки по нижней поверхности льда при уровне  $H_{cp}$ .  $\alpha$  - отношение коэффициента шероховатости нижней поверхности скопления льдин ( $n_{л}$ ) к коэффициенту шероховатости русла ( $n_p$ ).

Правая часть уравнения (4) является функцией отметки уровня воды и толщины скопления льда. Если задаться разными значениями  $\omega$  и  $t_{ск}$ , то с помощью этого уравнения для участка  $L_{ск}$ , вычисляя  $Q^2/\Delta H$ , можно построить кривую

$$t_{ск} = f\left(H_{cp}, \frac{Q^2}{\Delta H}\right) \quad (5)$$

Для построения кривой (5) необходимо располагать следующими характеристиками расчетного участка:

- 1) графиками связи площади водного сечения и ширины реки с уровнем воды;
- 2) коэффициентом шероховатости русла ( $n_p$ ), который определяется по гидравлическим справочникам. Морфометрические характеристики устанавливаются по материалам русловых и береговых топографических съемок, а также по крупномасштабным картам.

Имея данные о расходе и уровнях воды на каждом из расчетных участков в

разные моменты времени, нетрудно с помощью кривой (5) оценить толщину скопления льдин. После выполнения аналогичных расчетов для других участков реки, находится масса льда в заторе в целом.

По уровням воды на участках между створами можно оценить зоны затопления прибрежных территорий.

На примерах рек Лены, Северной Двины, Печоры, Пинеги, Ловати по данным наблюдений за многолетний период выполнена проверка применимости предложенной методики для оценки местоположения головы затора, хода уровней выше головы затора и площади затопления прибрежных территорий. Для поверочного расчета максимальных уровней выше затора льда использованы материалы наблюдений за многолетний период наблюдений на участках рек Печоры - участок от с. Якша до д. Мутный Материк (7 пунктов наблюдений, 37 лет); Лены - участок от п. Витим до г. Олекминск (8 пунктов наблюдений, 40 лет) и Северной Двины – участок от с. Медведки до с.Усть- Пинега (9 пунктов наблюдений, 40 лет). Среднеквадратичное отклонение наблюденных и рассчитанных заторных уровней для контрольных пунктов р. Печора колеблется от  $\pm 18$  до  $\pm 29\%$ , для р Лена от  $\pm 10$  до  $\pm 25\%$ , для р. Северная Двина от  $\pm 12$  до  $\pm 30\%$ .

Точность отражения динамики затора, уровней воды выше затора и параметров заторов в значительной мере зависит от количества пунктов наблюдений за уровнями воды. Поэтому на затороопасных участках средних и больших рек в период их вскрытия целесообразно проведение наблюдений за уровнями на дополнительных временных гидрологических постах, расположенных друг от друга на расстоянии не менее

$$\Delta L = \frac{\sigma_{H_3}}{I_o}, \quad (6)$$

где  $\sigma_{H_3}$  - среднее квадратическое отклонение максимального заторного уровня от среднего значения в створе опорного гидрологического поста,  $I_o$  - уклон водной поверхности на участке между гидрологическими постами при свободном ото льда русле. На средних реках это расстояние ориентировочно может составлять от 25 до 30 км, на больших реках – до 50 км.

Предложенная методика позволяет в оперативном режиме по изменению

направленности изохрон на исследуемом участке проследить динамику головы формирующегося затора и назначить комплекс противозаторных мероприятий, направленных на уменьшение размеров и мощности заторов. Полученная по предложенной методике информация за многолетний период позволит достаточно обосновано спланировать противопаводковые мероприятия на затороопасных участках реки.

**В пятой главе** рассмотрены методы, используемые для оценки риска наводнений, обусловленных заторами льда, и изложена методика расчета глубины затопления прибрежных территорий при формировании заторных наводнений на участках рек, не освещенных режимными наблюдениями за уровнем воды.

Численные характеристики риска наводнений важны при решении множества задач, таких как оценка возможного ущерба на уровне речного бассейна, региона или муниципального образования, обоснование эффективности инвестиций, зонирование территорий по опасности затопления, установление страховых тарифов.

В гидрологической литературе нередко термин «риск» употребляется как тождественный термину «опасность» и определяется как возможность или вероятность неблагоприятного факта или события. В последние годы при оценке риска все большее внимание уделяется подходу, при котором под риском понимаются «вероятностные потери, определяемые умножением вероятности негативного события на величину возможного ущерба от него». Выражение риска через математическое ожидание ущерба является наиболее удобным, так как позволяет совмещать в одном показателе одновременно и значение ущерба и его вероятность. В общем случае риск наводнения оценивается по зависимости ущерба от обеспеченности уровней воды, что эквивалентно вероятности превышения самих ущербов.

Гидрологическая сторона задачи оценки риска заторных наводнений состоит:

- в определении вероятности появления опасного с точки зрения народного хозяйства уровня воды на любом участке реки;
- оценке отметок начала выхода воды на пойму, глубин затопления и соответствующих им площадей затопления прилегающих территорий;
- в нанесении на генеральные планы городских и сельских поселений границ затопления разной обеспеченности.

Потенциальный риск заторных наводнений определяется степенью неожиданности затопления водой местности выше привычного (обычного) уровня, так называемого ординара. Чем реже наводнение, тем больше его опасность. Вероятность заторных наводнений зависит от повторяемости заторов, высоты поймы и наивысшего заторного уровня. При низкой пойме и мощных заторах, наводнения могут быть почти ежегодно. В этом случае даже при высоких заторных уровнях воды ущерб от наводнений, как правило, невелик, поскольку они ожидаются. Поэтому в качестве индекса потенциального риска заторных наводнений по гидрологическим условиям предложен параметр, учитывающий превышение заторного уровня воды над бровкой и вероятность наступления этого события:

$$D = (H_{3,1\%} - H_{п})(1 - P_3), \quad (7)$$

где  $H_{3,1\%}$  - максимальный заторный уровень воды 1% вероятности превышения,  $H_{п}$  - отметка начала затопления поймы,  $P_3$  - вероятность затопления поймы в долях единицы.

По основным рекам России для пунктов наблюдений выполнена оценка распространения потенциального риска заторных наводнений и составлены карты индекса  $D$ .

Распространение потенциального риска заторного наводнения близко к распространению частоты затопления пойменных участков при заторах. Значения параметра  $D$ , как показателя потенциального риска для исследуемых выше рек изменяется от 0 до 6,5. Максимальные значения параметра  $D$ , учитывающего превышение заторного уровня воды над бровкой и вероятность наступления этого события имеют не высокую повторяемость, порядка 1% ( $D > 5$ ,  $4 < D < 5$ ). Значения  $D$  менее 4 отмечаются в 3% случаев,  $2 < D < 3$  – в 9% случаев,  $1 < D < 2$  – 36%-ых случаев. Наиболее часто повторяются случаи при  $0 < D < 1$  м. Доля минимального риска ( $0 < D < 2$ ) составляет порядка 50% случаев. При высоком заторном уровне ( $H_{3,1\%}$ ) и низкой отметке поймы, вероятность ее затопления очень велика - пойма может затопливаться ежегодно. При таком же заторном уровне и высокой пойме вероятность ее затопления менее велика ( $P_3 \rightarrow 0$ ), но риск от ее затопления, как произведение вероятности затопления на ущерб может быть очень велик, поскольку его не ждут и территорию осваивают.

Для пунктов, на которых ведутся наблюдения за уровнем воды, риск заторных наводнений определяется по следующей схеме. Сначала устанавливается вероятность максимального заторного уровня и отметка начала затопления поймы. При наличии наблюдений статистическая обработка рядов наблюдений за уровнями даёт возможность определить значения уровней разной вероятности превышения, а крупномасштабные топографические карты и съемки, выполненные предварительно, позволяют построить поперечные профили русла и поймы в расчетных створах. На основе предварительно подготовленных поперечных профилей русла предлагаемая методика позволяет определить границы и площади затопления при разных уровнях воды, а также выполнить оценку последствий наводнения, ущерба от них и риска затопления территории.

Для территорий, подверженных наводнениям, необходимо построение двух типов карт: карт зон затоплений (вероятности затопления) и карт зон риска затоплений, которые дают количественное выражение потенциальных ущербов при затоплениях территорий при заторах заданной вероятности превышения. Эти карты могут быть использованы при разработке системы страхования объектов от затопления.

Рассмотренная выше методика определения максимальных уровней по графикам хода уровней воды по длине реки  $H = f(L, t)$  позволяет оценить риски заторных наводнений и для участков реки, расположенных между пунктами гидрологических наблюдений. Для этого

- по данным наблюдений за уровнями воды в створах наблюдений строятся графики хода уровней равных отметок по длине реки за каждый год;
- для створов (участков), где ущерб от затопления прибрежных территорий может быть максимальный, а наблюдения за уровнем воды не ведутся, по ходу изолиний уровня в период заторообразования определяется максимальный уровень воды;
- по полученным годовым значениям уровня в период образования заторов в русле составляется многолетний ряд, и рассчитываются уровни воды разной обеспеченности, характерные для данного участка (створа);
- далее по ряду  $\Delta h = H_z - H_n$ , полученному для каждого года, вычисляются



значения  $\Delta h$  разной вероятности превышения в створе, не охваченном наблюдениями;

- по крупномасштабным картам (планам, съемкам поперечного профиля) определяется отметка выхода воды на пойму и оценивается площадь затопления прибрежных территорий;

- по зависимости ущерба от глубины затопления территории определяется ущерб хозяйственному объекту при обеспеченности уровня воды равной расчетной (P%).

На участках рек, где заторы возникают очень часто, а ущерб от них велик, (что можно выяснить путем предварительного анализа данных наблюдений, опросу), для надежного описания изменений уровня воды изохронами в период образования заторов в руслах, целесообразно открыть временные посты учащенных наблюдений за уровнями воды.

В случае полного отсутствия данных многолетних гидрометрических наблюдений на расчетном участке реки есть и другой путь оценки превышения максимального заторного уровня 1% вероятности превышения над уровнем поймы. В частности, предлагается формула

$$H_{z,1\%} - H_n = (\bar{q}_{\max} \cdot n_p)^{0,6} \cdot (k_j \cdot \eta_z - \eta_o), \quad (8)$$

где  $\bar{q}_{\max}$  - средний многолетний максимальный удельный расход воды весеннего половодья ( $\text{м}^2/\text{с}$ ),  $n_p$  - коэффициент шероховатости русла,  $\eta_z$  - коэффициент заторности речного участка,  $k_j = \frac{\bar{q}_z}{\bar{q}_{\max}}$  - отношение средних многолетних расходов

воды при заторе льда и на пике весеннего половодья,  $\eta_o = I_{\bar{q}_{\max}}^{-0,3} \cdot I_{\bar{q}_{\max}}$  - уклон водной поверхности на речном участке при свободном ото льда русле и расходе воды  $\bar{q}_{\max}$ .

Формула (8) получена по данным наблюдений на 58 заторных участках 30 средних и больших рек европейской и азиатской частей России (в частности, Северной Двины, Сухоны, Ваги, Печоры, Мезени, Томи, Енисея, Селенги, Лены, Амура и Уссури). Коэффициент  $\eta_z$  определяется путем полевых исследований, в ходе которых на временном гидрологическом посту ведутся учащенные наблюдения за ледовыми явлениями и уровнем воды в период вскрытия реки. Значение параметра

$k_j = \frac{\bar{q}_z}{\bar{q}_{\max}}$  определяется по зависимости  $k_j = f(I_{\bar{q}_{\max}})$ .

Погрешность расчета величины  $H_{z,1\%} - H_n$  по методике, изложенной выше, не превышает согласно авторской проверке 20 % в 79 % расчетных случаев.

**В заключении** приводится изложение результатов исследования и решения задач, связанных с защищаемыми положениями.

Наиболее опасными для северных районов нашей страны являются наводнения, которые происходят в результате формирования заторов льда в период вскрытия рек в весенний период. В результате выполненного исследования установлено, что поймы при заторах льда затапливаются в среднем и нижнем течении средних и больших рек. Глубина затопления пойм для различных рек изменяется в диапазоне от 0,01 до 9,76 м. Наибольшие превышения наблюдаются на участках с узкой поймой.

Анализ распространения превышения заторного уровня 1%-ной обеспеченности над поймой и типа руслового процесса на пойменных участках рек позволяет выявить некоторую закономерность сочетания превышения критических уровней и типа руслового процесса. Заторные наводнения в основном свойственны участкам рек со свободным меандрированием и русловой многорукавностью.

В изучении заторов важная роль принадлежит косвенным приемам оценки их динамики развития заторов льда по длине реки. Графики изменения уровней воды во времени и по длине исследуемого участка реки, построенные в программе «Surfer», достаточно информативны для установления мест образования заторов затора в различные моменты времени в ходе развития процесса вскрытия реки. Предварительно подготовленные сведения о морфометрических характеристиках русла на речном участке позволяют оценить в оперативном режиме другие характеристики затора: массу льда в заторе, протяженность скопления льда, зону подпора воды, что важно для планирования мер борьбы с заторами.

Потенциальный риск наводнений определяется степенью неожиданности затопления водой местности выше привычного (обычного) уровня, так называемого ординара. Чем реже наводнение, тем больше его опасность. Вероятность заторных наводнений зависит от повторяемости заторов, высоты поймы и наивысшего заторного уровня. При низкой пойме и мощных заторах, наводнения могут быть

почти ежегодно. В этом случае даже при высоких заторных уровнях воды ущерб от наводнений, как правило, невелик, поскольку они ожидаются.

Гидрологической задачей в оценке риска заторных наводнений является выделение участков затопления прибрежных территорий по длине реки, определение отметок начала выхода воды на пойму, глубины затопления и соответствующих им площадей затопления. Изложенная в диссертации методика построения графиков изменения уровней воды по длине реки при заторах льда позволяет определить за весь период наблюдений максимальные уровни воды для участков, не охваченных наблюдениями ближайших гидрологических постов, даже в случае непостоянства места образования затора на участке.

На реках, где многолетние гидрологические наблюдения не ведутся, превышение максимального заторного уровня расчетной обеспеченности над поймой можно оценить в зависимости от среднего многолетнего максимального удельного расхода воды весеннего половодья, уклона и коэффициента шероховатости русла, а также коэффициента заторности речного участка, который определяется путем экспедиционных исследований.

### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Анализ динамики заторов льда по обобщенным графикам уровней воды. /С-Пб, Гидрометеоздат. Сборник работ по гидрологии, 2004, №27, с. 154-162.
2. Assessment location and parameter of ice jam on the basis of river water level regimes study. /Proceedings of 17th International Symposium on Ice., 17<sup>th</sup> International Symposium on Ice, St.Peterburg, 2004, p.44-47.
3. Оценка потенциальной опасности и риска наводнений, обусловленных заторами льда. /Труды IV гидрологического съезда, секция 2, Метеоагентство Росгидромета, М., 2006, с.156-159, (соавторы Бузин В.А., Колесник, М.В.), с. 156-159.
4. Затопление прибрежных территорий при заторных наводнениях. /Труды ИПГ, Москва, 2008г., вып.86, с.127-131.

#### **В том числе в рецензируемых изданиях:**

5. Мониторинг процесса заторообразования на реках по пространственно – временным графикам уровня воды. /Метеорология и гидрология, 2008, № 9, М, изд. «Планета», с.87 – 93.

