

Морские, речные и озёрные льды

УДК 556.535.5

Имитационное моделирование заторов (на примере р. Томь, Западная Сибирь)

© 2014 г. В.А. Земцов, Д.А. Вершинин, Н.Г. Инишев

Томский государственный университет
zemtsov_v@mail.ru

Imitation modeling of ice dams (case study of Tom' River, Western Siberia)

V.A. Zemtsov, D.A. Vershinin, N.G. Inishev

Tomsk State University

Статья принята к печати 17 февраля 2014 г.

*Западная Сибирь, заторные наводнения, заторы льда, компьютерное моделирование, река Томь.**Digital modeling, ice jam floods, ice dams, Tom River, Western Siberia.*

Рассматриваются факторы заторообразования в многолетней динамике и подходы к решению проблем борьбы с заторами и заторными наводнениями на основе имитационного компьютерного моделирования динамики потоков и заторных явлений на нижнем участке р. Томь, длина которого по главному руслу составляет около 120 км. Моделирование позволяет заранее просчитать разные варианты входных воздействий и реакции русловой системы на них. На основе одномерной модели HEC-RAS 4.0 исследуются вопросы локализации заторов, вероятность возникновения которых на разных участках русловой системы меняется со временем в соответствии с изменением водности реки, гидравлики потоков и прочности ледового покрова. В системе SMS 9.2 разработана двухмерная гидродинамическая модель русловой сети, позволяющая имитировать влияние заторов, возникающих на разных участках, на перераспределение стока между главным руслом и протоками, что даёт возможность оценивать опасности и риски заторных наводнений, влияние заторов на формирование русловой сети, а в дальнейшем – регулировать безопасный пропуск льда в половодье в районе населённых пунктов.

Problems of localization of the ice jams in the lower flow of the Tom River (Siberia) are discussed. A length of the main channel under investigation is about 120 km. The 1D model HEC-RAS 4.0 was used for the analysis. The 2D hydrodynamic model of the Tom River channel system in the SMS 9.2 modeling system has been developed. The model makes it possible to simulate effects of ice jams occurring in different sections of the river bed on redistribution of the river run-off between the main channel and other river branches.

Введение

Заторы льда – это массивные скопления льда в руслах рек, вызывающие уменьшение живого сечения и значительный подъём уровня воды выше, а при прорыве ледовой плотины – и ниже по течению. В результате заторов подъём уровня воды в сутки может составлять несколько метров. Масштабы заторных явлений и их последствия определяются влиянием многочисленных взаимодействующих факторов. Весной заторы вызывают затопление пойменных территорий, в том числе освоенных в результате хозяйственной деятельности, что приводит к негативным экологическим и хозяйственным последствиям. В сибирском регионе заторные явления чаще всего отмечаются на Иртыше, Лене, Енисее с притоками, р. Томь. Частота заторов и вызванных ими наводнений в пределах верхних горных участков рек Сибири существенно возросла в 2005–2010 гг. в связи с более ранним началом половодья в этой части бассейнов и увеличением разницы в весенней температуре между южными и северными частями бассейнов [15].

Река Томь берёт начало на западном склоне Абаканского хребта. Её бассейн, имеющий грушевидную форму, узкой частью ориентирован на северо-запад. Площадь бассейна – 62 000 км², длина реки – 827 км. Верхнюю его часть (почти 2/3 площади) занимают средне- и низкогорные лесные ландшафты, где формируется основное водное питание реки. В нижнем течении р. Томь выходит на Западно-Сибирскую равнину. По водному режиму она относится к рекам с весенне-летним половодьем и паводками в тёплое время года. Основная фаза – половодье, в течение которого проходит 60–90% годового стока и отмечаются максимальные расходы и уровни воды. Половодье начинается в середине апреля. В период ледохода бывают кратковременные повышения уровней заторного происхождения; в отдельные годы они превышают уровни пика половодья, определяемые водностью реки. После половодья устанавливается летне-осенняя межень, прерываемая дождевыми паводками. Зимняя межень начинается в конце октября – начале ноября и продолжается до начала половодья.

В последние десятилетия наблюдаются заметные изменения водного и ледового режимов р. Томь [9]. В Томске, например, в результате добычи гравия во все сезоны года снизились уровни воды, что создаёт иллюзию уменьшения водности реки. Сейчас р. Томь замерзает в более поздние сроки, сократилась и продолжительность ледовых явлений. Одни из этих изменений обусловлены естественными вариациями климата, другие служат отражением глобального потепления, третьи — результат хозяйственной деятельности в бассейне и русле реки. Так, ускорению вскрытия способствуют работы по ослаблению и разрушению ледяного покрова на всём участке выше города, в том числе на территории Кузбасса, из-за чего река вскрывается всё раньше.

Заторы на р. Томь образуются каждый год. При подъёме уровня воды в реке заторы возникают сверху вниз по течению на разных участках общей протяжённостью в сотни километров, смещаясь вниз и вызывая подъёмы уровней воды высотой до нескольких метров, а также локальные наводнения. Масса льда, в том числе сильно измельчённого, увеличивается вниз по течению реки и образует сильные заторы в Томске и его окрестностях, где они наблюдаются в последние 20 лет, как минимум, один раз в три года. Нередко годовой максимум уровня воды имеет заторное происхождение. В свою очередь заторы приводят к наводнениям. Зона затопления в окрестностях города распространяется по ширине поймы на 3–4 км. Подъём воды при образовании затора, и особенно при его быстром катастрофическом разрушении, сопровождается сильными механическими воздействиями текущей воды и льда на берега реки, хозяйственные и жилые постройки, дороги и другие коммуникации и объекты инфраструктуры. В результате берега дестабилизируются и вода промывает протоки в пойме реки, разрушая всё на своем пути. Активизируются размывы берегов, а русловые деформации приобретают трудно контролируемый характер.

Для борьбы с заторами и вызываемыми ими наводнениями используют разные подходы: отвод воды с затопляемой территории; обвалование местности со стороны реки ограждающими дамбами; искусственное повышение прибрежной территории; искусственное ослабление льда; русловыправительные и дноуглубительные работы; расчистку русла; естественный отвод воды по протокам в обход затора. Все они требуют научного обоснования, исследования факторов заторообразования и моделирования заторных явлений, что позволяет количественно оценить и прогнозировать опасности и риски заторных наводнений.

Факторы заторообразования

Факторы заторообразования на р. Томь мы рассматриваем в их временной динамике. Основная цель работы — исследовать возможности применения имитационных компьютерных гидродинамических моделей для обоснования противозаторных мероприятий на нижнем участке русловой системы р. Томь длиной около 120 км по главному руслу, где разные по мощности заторы происходят каждый год в разных местах. Основные сведения о современном состоянии исследований ледового режима рек, о факторах и моделях заторообразования приводятся в работах [4, 5, 16]. В работах [1, 6–8, 13] непосредственно анализируются особенности заторообразования на р. Томь.

Рассмотрим динамику факторов заторообразования и связанных с ними наводнений в нижнем течении р. Томь в последнее столетие; она в значительной мере определяется антропогенными причинами. Факторы формирования и развития заторных явлений делятся на две группы: 1) гидрометеорологические (интенсивность весеннего половодья, распределение толщины и прочности льда, уровенный и ледовый режимы предшествующих затору осенних паводков и зимней межени), определяющие количество и интенсивность поступления льда; 2) геоморфологические (строение и конфигурация речной долины и русловой сети), обуславливающие различия в пропускной способности русловой системы — главного русла и проток, часто соизмеримых с ним по водоносности.

В первой группе факторов, часто приводящих к катастрофическим ледовым заторам на р. Томь, выделяются условия осеннего замерзания, особенно ледоход, возникающий в начале зимы уже после установления ледового покрова, что, например, привело к катастрофическому наводнению в районе Томска весной 2010 г. Водность реки при вскрытии влияет на локализацию и мощность ледовых заторов.

Важный фактор заторообразования — состояние собственно ледяного покрова перед вскрытием реки. Измерения толщины льда на водомерных постах в Томске проводились эпизодически с 1926 г., а регулярно — с 1949 г. С 1926 по 1963 г. толщина льда измерялась на водомерном посту Томск-пристань, с 1964 г. по настоящее время — на посту Томск-гидроствор. Среди заторов, возникавших с начала наблюдений за толщиной льда, можно выделить три случая возможного определяющего влияния этого фактора на возникновение затора. Всё это — случаи, когда толщина льда превышала 120 см (1930, 1932 и 1971 гг.).

Отметим, что толщина льда измеряется непосредственно в створе гидрологического поста, од-

нако такие измерения (особенно на посту Томск-гидроствор, где русло заужено и зимой наблюдаются высокие скорости течения) не всегда адекватно и полностью характеризуют ледовую обстановку на участке реки большой протяжённости, где могут быть и торосы, и шуга подо льдом. Так, промеры толщины льда с участием авторов в 2006 г. показали среднюю толщину льда на р. Томь в районе поста Томск-пристань 94 см, а на посту Томск-гидроствор – 69 см. Согласно промерам 2010 г., средняя толщина льда на участке от коммунального моста на 2 км вниз по течению составила 114 см (на посту Томск-гидроствор – 72 см), при этом местами русло было забито шугой и битым льдом до самого дна.

Из геоморфологических факторов для р. Томь характерно резкое уменьшение уклонов речной долины при переходе из слабовсхолмлённой части бассейна в равнинную непосредственно в черте города Томска. В результате изменения рельефа резко снижается транспортирующая способность потока во все сезоны и часть донных наносов оседает вблизи участков смены рельефа, образуя многочисленные острова и осерёдки. На участках разветвлений русла на протоки выше города также увеличивается площадь водной поверхности, покрытая льдом, а при снижении энергии потока возникают условия для формирования головы затора.

В последние десятилетия всё более существенную роль приобретают антропогенные факторы: деятельность, способствующая изменению пропускной способности русла (отчленение проток, срезка островов, строительство дамб, разработка карьеров для добычи гравия и др.), и мероприятия, непосредственно направленные на борьбу с заторами и заторными наводнениями, – искусственное разрушение ледяного покрова задолго до естественных сроков вскрытия реки и измельчение льда взрывами сверху вниз по течению. Антропогенные факторы способствовали изменению многих важных характеристик формирования заторов, включая их локализацию, сроки образования и физические характеристики самого льда. Обострению опасности заторных наводнений способствует и недостаточная изученность процессов образования, структуры и эволюции заторов, что затрудняет выбор методов борьбы с ними в конкретных условиях. При этом есть примеры ошибочных решений, усиливающих негативные последствия заторов.

До конца 1950-х годов в исследуемом районе голова заторов формировалась в месте крутого изгиба реки у станции Белобородово, где находится г. Северск (рис. 1). В результате пониженная часть Томска

полностью оказывалась в зоне затопления. В 1947 г. наблюдался максимальный заторный уровень воды на посту Томск-пристань, превышающий уровень предшествовавшей межени на 10 м. Были и человеческие жертвы. Позже, до конца 1990-х годов, высокие заторы здесь не возникали, так как предприятия Северска, Томска и городов, расположенных выше по течению, сбрасывали в реку нагретые промышленные воды. Одновременно с середины 1950-х годов в русле реки вели крупномасштабную добычу гравия, способствующую «посадке» русла. После закрытия реакторов в Северске заторы ниже Томска стали возникать снова, правда, их частота и мощность заметно снизились (рис. 2). В настоящее время основные места возникновения заторов в результате хозяйственной деятельности сместились вверх по течению, что, прежде всего, вызвано техногенным изменением продольного профиля реки.

Таким образом, ситуация с заторами во времени всё время меняется из-за изменения пропускной способности русловой системы (карьеры, острова, судовой ход, мостовые переходы и др.), более ранних сроков искусственного разрушения ледяного покрова выше по течению с помощью взрывных работ, которые приводят к измельчению льда и, как следствие, к повышению плотности ледовых масс, накапливаемых в теле затора. Важные факторы – изменения климата, приводящие к более раннему вскрытию реки, сокращению продолжительности ледовых явлений и уменьшению толщины льда.

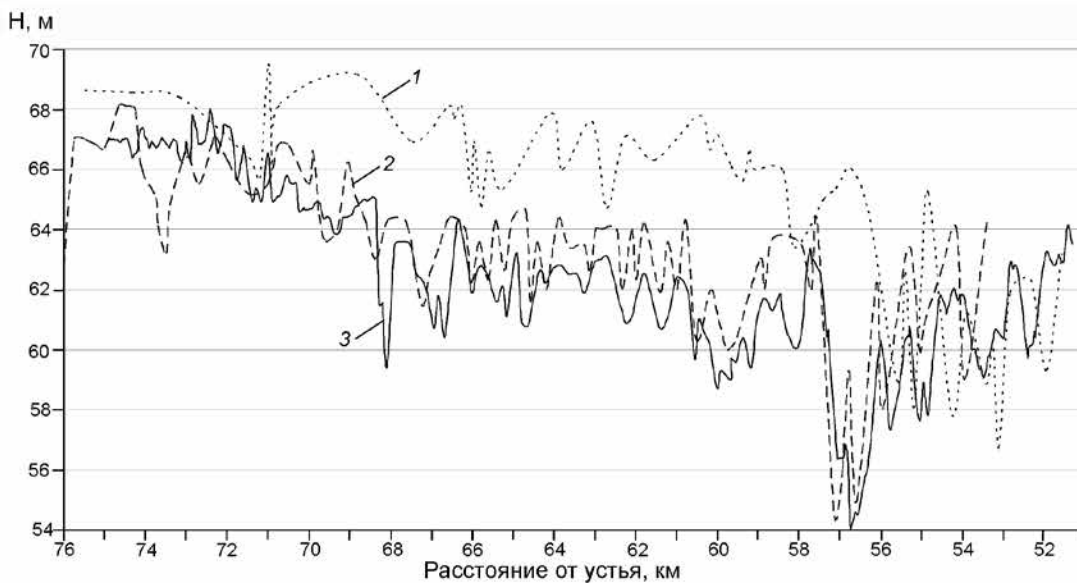
Методика исследований

Основной метод, используемый в наших исследованиях, – имитационное компьютерное моделирование речной гидравлики, предусматривающее «как расчёт на основании той или иной численной модели, так и сбор и подготовку исходных данных и представление результатов исследований с применением компьютерных технологий» [3, с. 128]. С помощью имитационного компьютерного моделирования можно быстро проанализировать разные варианты входных воздействий и реакцию речной системы на них, дать их количественную оценку и выбрать наиболее приемлемые варианты воздействий. Первый шаг к созданию компьютерной модели участка реки – разработка цифровой модели рельефа для получения гидравлических характеристик потоков (глубина, скорость, уклоны и др.). Теория движения жидкости в открытых потоках разработана достаточно хорошо, существуют методы расчёта, применяемые на практике. В России и за рубежом созданы программные комплексы



Рис. 1. Космический снимок р. Томь у Томска и многолетние изменения продольного профиля русла реки по тальвегу:

Fig. 1. Space image of the Tom' River at the city of Tomsk with long term change of the longitudinal section of the river bed along the thalweg:



для моделирования русловых потоков [2, 14]. Вопросы одно- и двухмерного гидродинамического моделирования крупных сибирских рек с поймами на основе моделирующих систем HEC-RAS и SMS ранее были рассмотрены нами в работах [7, 10, 11].

Имеется большое число программ-оболочек для создания имитационных гидравлических, гидродинамических моделей и моделей транспорта наносов и русловых деформаций. Из зарубежных систем в настоящее время всё большее распространение получает моделирующая система Surface Water Modeling System (SMS) [17]. Выбор модели определяется возможностью получения необходимой исходной информации (которая в большинстве случаев доста-

точно ограничена) и задачами исследования. Опыт наших исследований (компьютерное моделирование для оценки воздействия гидротехнических сооружений – русловых карьеров, дамб, подводных траншей – на окружающую среду), а также материалы зарубежной и отечественной литературы позволили нам выбрать в качестве основы моделирующую систему SMS и входящие в неё программы.

Программа HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) [18], реализующая одномерный подход к моделированию, включает в себя блок расчёта продольных профилей водной поверхности (кривых свободной поверхности) для установившегося плавно изменяющегося течения и функ-

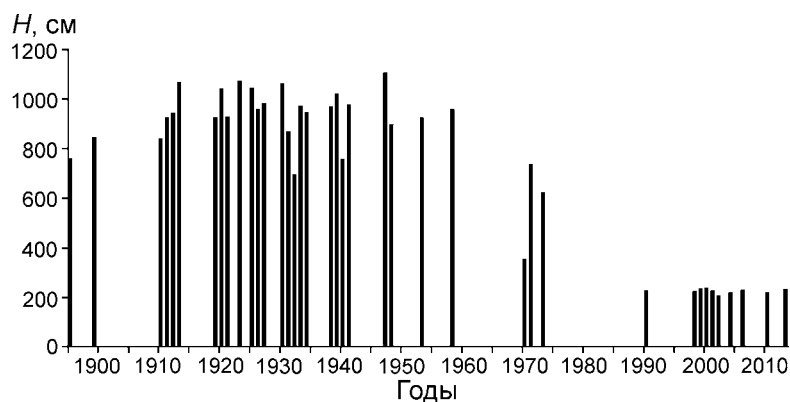


Рис. 2. Повторяемость заторов и максимальные уровни воды во время весеннего ледохода на р. Томь у Томска (станция Белобородово, 1895–1917 гг., и Томск-пристань, 1918–2013 гг.)

Fig. 2. Ice dams frequency and maximum water stages during vernal floating of ice debacle in the Tom River at the city of Tomsk (1895 to 1917 at Beloborodovo station, 1918 to 2013 at Tomsk river port)

ции проектирования гидротехнических сооружений. Система может работать с полной русловой сетью, древообразной речной сетью или отдельным участком русла. Она позволяет моделировать профили водной поверхности для спокойного, бурного и смешанного состояний потока. Профиль водной поверхности вычисляется от одного поперечного сечения к другому с помощью стандартной пошаговой процедуры путём решения одномерного уравнения энергии или уравнения Бернулли, записываемого для двух смежных сечений потока. Общие потери энергии между двумя поперечными сечениями складываются из потерь на преодоление сил трения и потерь на внезапное расширение или сжатие потока. Неизвестный профиль водной поверхности в заданном поперечном сечении определяется решением уравнения Бернулли методом последовательных приближений. Расчёт при спокойном режиме движения потока ведётся снизу вверх по течению, при бурном – в обратном направлении. Последние версии программы HEC-RAS позволяют рассчитывать основные гидравлические характеристики потока при наличии ледяного покрова. Более того, есть возможность моделировать ледовые заторы при вскрытии рек. Для этого необходимо знать физические свойства ледяного покрова (толщину, пористость, плотность льда), местоположение тела затора и его собственные характеристики (коэффициент трения между льдинами, угол трения между льдинами и др.).

Главный элемент системы SMS – программа RMA2 [19], позволяющая детально рассчитать поля скоростей и другие характеристики потока в узлах расчётной сетки по всей акватории русла и поймы. Это – двумерная гидродинамическая модель с осреднёнными по глубине потока элементами. Она даёт возможность рассчитать отметки водной поверхности и показатели горизонтальной скорости для потоков со свободной поверхностью и докритическим (спокойным) течением в виде двумерных полей те-

чения. Программа даёт конечно-разностное решение уравнений Навье–Стокса в интерпретации Рейнольдса для турбулентного течения. Сопротивления рассчитываются по уравнениям Шези–Маннинга, для определения характеристик турбулентности используются коэффициенты турбулентной вязкости. Можно моделировать как установившийся, так и не установившийся (динамический) режим течения. С помощью программы можно рассчитать уровень воды и распределение стока вокруг островов, течения у мостов, на сужающихся и расширяющихся участках русла, в местах слияния и разветвления потоков, циркуляционные течения. Предполагается, что в потоке отсутствует вертикальная стратификация, т.е. течение двумерно в горизонтальной плоскости. В программе решаются интегрированные по глубине уравнения сохранения массы и количества движения.

Программа RMA2 работает в системе моделирования SMS, представляющей собой целостную среду для одно-, двух- и трёхмерного гидродинамического моделирования. В SMS используется подход, называемый её авторами «концептуальным моделированием» и позволяющий создавать реалистичные модели большой сложности. Согласно этому подходу, на основе топографической карты или плана местности с использованием цифровой модели рельефа и ГИС-объектов (точки, линии, полигоны) создаётся «концептуальная модель». Она строится независимо от расчётной сетки и представляет собой описание исследуемой территории, содержащее геометрические характеристики русла и берега, границу моделируемой территории, расходы и уровни воды как граничные условия, а также зоны с разными значениями коэффициентов шероховатости, показателей турбулентности и других характеристик русла и русловой системы в целом.

После создания концептуальной модели автоматически строится соответствующая ей расчётная сетка и необходимые для расчётов данные конвертируются

из концептуальной модели в элементы и узлы сетки, что позволяет автоматически назначать граничные условия и расчётные параметры. Если в концептуальную модель позже вносятся ещё какие-либо изменения, то сама сетка и её атрибуты быстро обновляются. Моделирующая система обеспечивает стадии допроектной подготовки и послепроектного анализа при компьютерном гидродинамическом моделировании. Она содержит инструменты для управления, редактирования и визуализации геометрических и гидравлических данных, а также создания, редактирования и форматирования данных расчётной сетки для использования в численном анализе. В результате моделирования получают значительный объём расчётной информации по речной гидравлике и гидродинамике, среди которой – отметки водной поверхности, поля глубин потока и скоростей течения в нём, участки с эрозией и аккумуляцией наносов в русле, изменение отметок дна. Исходная информация для моделирования содержит три основных блока:

1) геометрические данные о форме и размерах русла и поймы, параметрах потерь на сопротивление. По картографическим данным и материалам изысканий строится детальная цифровая модель рельефа участка речной системы в диапазоне высот от наименьшей отметки дна до уровня воды расчётной обеспеченности (например, 1%);

2) гидрологические данные по фактическим и характерным (расчётным) расходам и уровням воды во входном и выходном створах участка, параметрам схематизации гидрографа стока во времени;

3) при необходимости – данные по наносам, представляющие собой расходы наносов и их гранулометрический состав, а также гранулометрический состав русловых отложений.

Указанная информация, в основном, представлена в материалах проектно-изыскательских и мониторинговых работ, однако она имеет ряд недостатков, ограничивающих возможность моделирования и снижающих точность оценки текущей ситуации и прогнозируемых воздействий. В условиях дефицита необходимой исходной информации уже на стадии калибровки модели приходится применять, наряду с измеренными значениями, экспертные оценки характеристик стока воды на разных участках русла и поймы при разных уровнях затопления. Процесс моделирования состоит из трёх основных этапов: 1) подготовка и адаптация исходных материалов для применения их в компьютерном моделировании; 2) создание модели для естественных условий или условий, соответствующих заданной расчётной обеспеченности, и её кали-

бровка с определением значений параметров; 3) моделирование разных вариантов воздействий.

Результаты

Локализация заторов зависит от гидравлических условий, складывающихся в условиях разной водности реки при её вскрытии (определяющих, прежде всего, скоростной напор), условий предшествующей осени и зимы и прочностных характеристик ледяного покрова. Определить наиболее опасные места возникновения заторов по длине реки при изменении её водности в период ледохода можно на основе одномерной компьютерной модели HEC-RAS. Моделирование условий образования заторов мы выполнили на участке, где они возникают ежегодно: от нового коммунального моста (59 км от устья реки) до поста Томск-гидроствор (75 км), включая протоки. Исходными материалами служили русловые съёмки, выполненные сотрудниками кафедры гидрологии Томского государственного университета в 2003–2008 гг., и топографический план поймы. В процессе калибровки модели подобраны коэффициенты Маннинга n , при которых наблюдается наилучшее соответствие рассчитанных по модели отметок водной поверхности отметкам, измеренным на гидропостах.

Изменчивость скоростного напора потока $h_v = \alpha V^2(2g)^{-1}$ (где α – корректив скорости, учитывающий неравномерность распределения скоростей в поперечном сечении потока; V – средняя скорость в сечении потока, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$; g – ускорение свободного падения, $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$) по длине реки при разных расходах воды оказалась весьма показательной (рис. 3). Обычно при малых расходах вскрытие происходит на нескольких перекатах вниз по течению

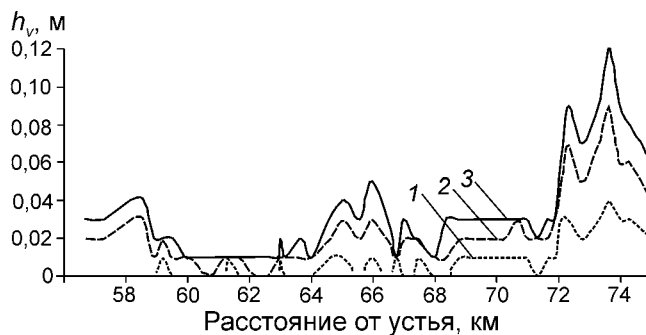


Рис. 3. Изменение рассчитанной по модели HEC-RAS величины скоростного напора h_v (м) вдоль р. Томь у Томска при расходах воды 3000 (1), 2130 (2), 1010 (3), $\text{м}^3\cdot\text{с}^{-1}$

Fig. 3. Modeled velocity head h_v (m) variations along the Tom River at the city of Tomsk (HEC-RAS simulation) corresponding to water discharges 3,000 (1), 2,130 (2), 1,010 (3), $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

с образованием серии небольших заторов на плёсовых участках. При повышении водности эти заторы могут срывать и образовывать один большой затор. В качестве критерия для выявления таких мест выбран скоростной напор, рассчитываемый в HEC-RAS для каждого поперечного сечения потока [8]. Судя по расчётам, низкое значение скоростного напора (1 см и менее) даже при расходах $3000 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ наблюдается на участке 63 км от устья, т.е. в районе грузового порта (см. рис. 1). Это – наи-

более вероятное место возникновения затора (действительно, заторы здесь наблюдаются ежегодно). Часто «голова» затора устанавливается выше о. Собачий (66 км от устья), что также соответствует резкому снижению здесь уклона и скоростного напора.

Важная задача для обоснования мер по смягчению возможных последствий заторов и наводнений – расчёт перераспределения стока воды по протокам на участках пойменной многорукавности (рис. 4). Авторами с использованием моделирующей

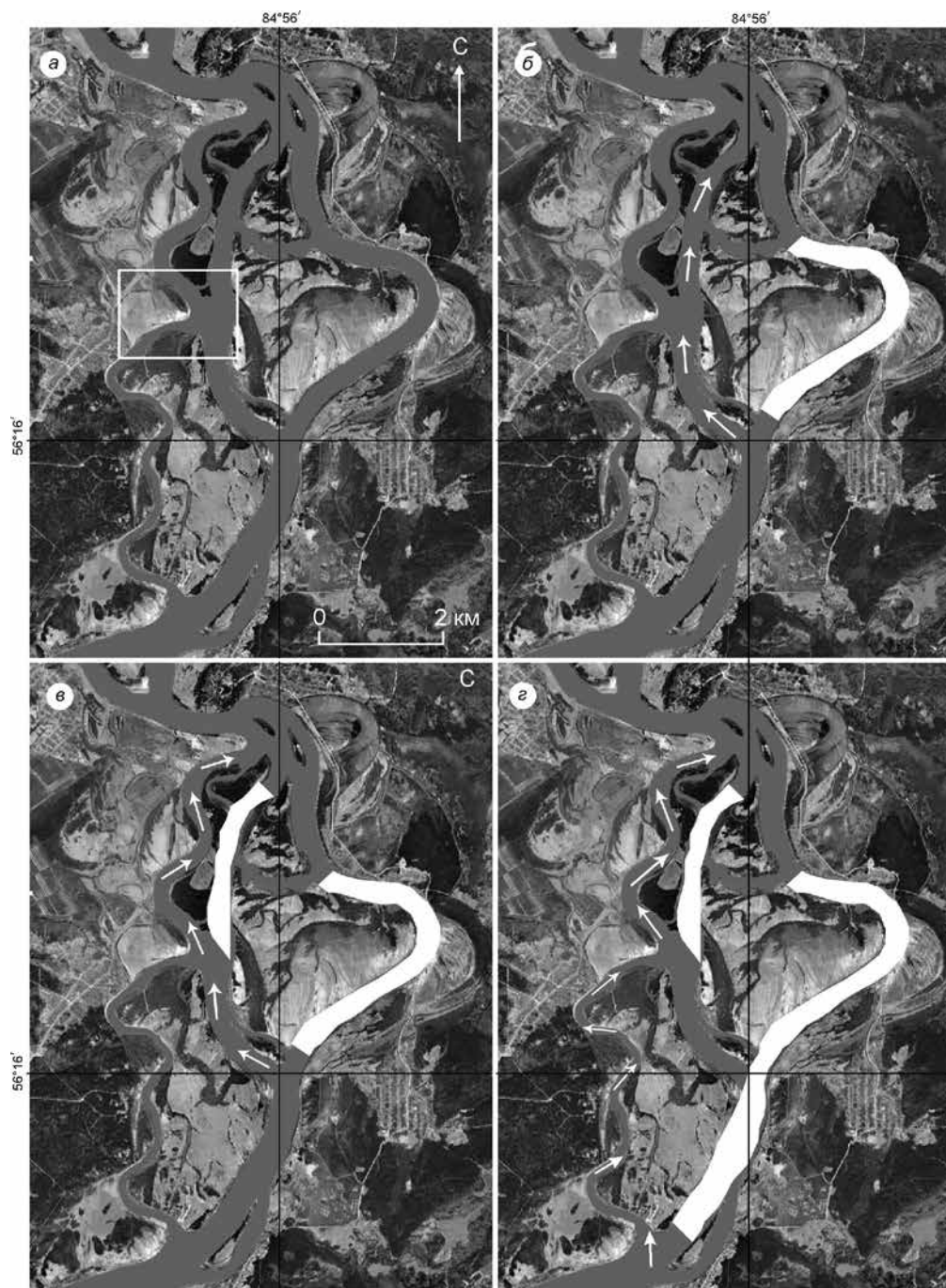


Рис. 4. Типичные сценарии (а–г) пропуска половодья выше Томска.

Белым цветом выделены участки ледовых заторов; прямоугольник с белыми границами – участок, показанный на рис. 5

Fig. 4. Typical scenarios (a–g) of flood propagation along the reach upstream the city of Tomsk.

Ice dams are indicated in white; the rectangle with white borders indicate the area shown in Fig. 5

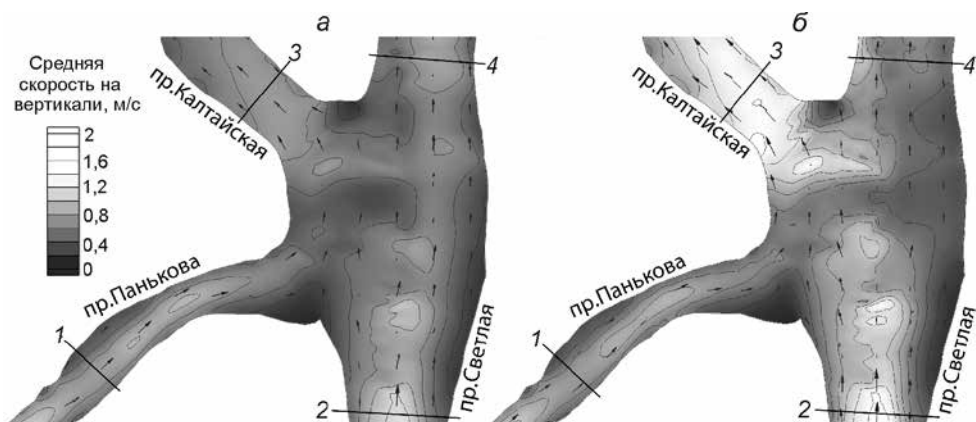


Рис. 5. Поле осреднённых по вертикали скоростей в узле протока Светлая – протока Калтайская – протока Панькова русловой системы р. Томь согласно сценариям на рис. 4, *a* и *б* при отсутствии (*a*) и наличии (*б*) затворов в главном русле и протоке Светлая.

Цифрами обозначены расчётные сечения на протоках

Fig. 5. Fields of depth averaged velocities at the junction of the Tom River side channels Svetlaya, Kaltayskaya and Pankova corresponding to the scenarios in Fig. 4, *a* and *б* in the cases of the absence (*a*) and presence (*б*) of the ice dams in the main channel and the Svetlaya side channel.

Digits indicate the modeled cross sections located in the side channels

системы SMS 9.2 построена двухмерная гидродинамическая модель русловой сети р. Томь на участке 92–118 км от устья по главному руслу между сёлами Ярское и Коларово. Расходы воды в транзитном потоке, включая главное русло р. Томь и протоки Светлая, Калтайская и Панькова, приняты равными соответственно 3300 и 5800 м³·с⁻¹. Исходные материалы представлены цифровой моделью рельефа русла р. Томь с протоками, в основу которой положены данные гидрографических съёмок последних лет сотрудников кафедры гидрологии Томского государственного университета и других организаций. Моделирование выполнено для условий современного рельефа. Уровни воды в нижнем створе (Коларово, 92-й километр от устья р. Томь) и расходы воды в верхнем створе (Ярское, 118-й километр) задавались согласно имеющимся данным полевых измерений.

Уровни воды во входном сечении и по длине реки получаются в зависимости от заданного транзитного расхода воды в речной системе и параметров шероховатости. Значения коэффициента *n* в формуле Маннинга приняты следующими: $n_{\text{рус}} = 0,022$ для русел реки и проток; $n_{\text{бер}} = 0,04$ на их прибрежных участках. Затворы в местах их распространения имитировались путём задания повышенных значений коэффициента $n_{\text{зат}} = 0,1$. Коэффициент турбулентной вязкости задавался в зависимости от числа Пекле, определяемого критическими размерами ячеек расчётной сетки, которая составлена из 24 633 элементов, или 72 020 точек с координатами, полученными при интерполяции

Распределение расходов воды (м³·с⁻¹) в протоках при отсутствии затворов (числитель) и при их образовании (знаменатель) в главном русле и протоке Светлая

Расход воды во входном створе системы	Расход воды в главном русле	Расход воды в расчётных сечениях на рис. 5			
		1	2	3	4
3300	1460	355	1480	590	1250
	700	400	2160	1260	1360
5800	2600	580	2580	1020	2150
	1300	660	3800	2120	2350

данных измерений в 91 688 точках в русле р. Томь. Значения коэффициентов шероховатости и турбулентной вязкости получены при калибровке модели с учётом значений коэффициентов, полученных ранее при моделировании коротких участков русла р. Томь и проток в районе Томска.

В результате моделирования установлены поля глубин, отметки свободной поверхности и осреднённых по вертикали скоростей течения (величина и направление вектора скорости). На рис. 5 дан фрагмент моделируемой русловой системы в узле, образованном протоками, для беззаторного течения (вариант *a* на рис. 4) и в случае возникновения затворов в главном русле и в протоке Светлая (вариант *б* на рис. 4). В таблице показаны расходы воды в протоках при одинаковых расходах во входном створе русловой системы (Ярское). Из этих данных видно, насколько существенно перераспределяется сток воды в русловой системе при заторах. Так, при уста-

новлении затора в главном русле сток воды в нём снижается в два раза, затор в протоке Светлая практически не изменяет расход воды в её нижней части (створ 4). Основной поток в русловой системе переходит в верхнюю часть протоки Светлая, а затем в протоку Калтайская (створы 2 и 3). Водность протоки Калтайская увеличивается более чем вдвое и становится такой же, как в протоке Светлая в нижнем течении (створ 4). Подобное перераспределение стока в русловой системе привело к резкому увеличению скоростей течения и образованию полей гравийных гряд на входе в протоку Калтайская до 2010 г. [12] и размыву гряд в 2010 и 2013 гг.

Заключение

Анализ факторов заторообразования на р. Томь у Томска в их многолетней динамике показал, что изменение и гидрометеорологических, и геоморфологических условий при возросшей роли антропогенных факторов привело к определённой обострению ситуации с заторными наводнениями в последние 15 лет по сравнению с предшествующим 40-летним периодом, хотя высота подъёма уровней воды в черте города не достигла отметок, характерных для заторов первой половины XX в. Для научного обоснования противозаторных мероприятий, прогноза и предотвращения заторных наводнений предлагается в качестве основы использовать имитационные компьютерные модели речной гидравлики. Применяемые нами модели позволяют получить нечто подобное «мгновенным снимкам» состояния потоков при фиксированных квазиустановившихся значениях расходов воды в руслах в период половодья. Гидродинамические модели дают возможность связать в единую систему пока ещё достаточно разрозненные данные о строении русловой сети, рельефе русла и поймы, скоростном поле потока и опасных гидрологических процессах и прогнозировать как последствия локальных антропогенных воздействий, так и их синергические эффекты.

Показано, что рассчитанное по одномерной гидравлической модели потока изменение скоростного напора по длине реки при разных фиксированных расходах воды во входном створе участка в период ледохода позволяет установить места наиболее вероятной локализации заторов. Компьютерная имитация заторов в русловой сети с помощью задания повышенных коэффициентов шероховатости в местах их образования и распространения в двухмерной модели речной гидравлики даёт возможность количественно оценить перераспределение стока в русловой сети при

определённых сценариях пропуска половодья на затороопасных участках разветвлённых русел. Отметим необходимость сохранения протоков на таких участках и недопустимость их отчленения от главного русла дамбами. Полученная при моделировании информация может быть полезной для обоснования проектов строительства в русле и пойме, дноуглубительных работ, работ по регулированию русла, различных противозаторных мероприятий с оценкой их влияния на пропускную способность русловой системы, а также для организации сети оперативного мониторинга опасных гидрологических явлений в осенний и весенний периоды.

В дальнейшем появится возможность связать в единую систему результаты измерения и моделирования гидродинамических параметров потоков, транспорта наносов, русловых деформаций при ледовых заторах, учесть количественные характеристики взаимосвязанных процессов и путём регулирования русла реки с протоками (глубины, конфигурация русловой системы в плане) создать относительно безопасные условия для пропуска половодья и масс льда в местах расположения населённых пунктов, производственных объектов и объектов инфраструктуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 13-05-01086, и гранта по постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. по договору с Министерством образования и науки Российской Федерации № 14В25.31.0001 от 24 июня 2013 г. (BIO-GEO-CLIM).

Литература

1. Агафонова С.А., Беркович К.М., Рулёва С.Н., Сурков В.В., Фролова Н.Л. Река Томь: морфология русла и заторы льда (в пределах Томской области) // 27-е пленарное межвуз. координац. совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов (г. Ижевск, 8–12 октября 2012 г.). Доклады и краткие сообщения. Ижевск, 2012. С. 4–12.
2. Беликов В.В., Милитеев А.Н., Прудовский А.М., Родионов В.Б. Компьютерная гидравлическая модель речного бассейна – основа определения ущербов народному хозяйству от наводнений // Безопасность энергетич. сооружений. Вып. 11. Гидрол. безопасность и защита окружающей среды и населения от паводков. М., 2003. С. 132–147.
3. Бритвин С.О., Беликов В.В., Милитеев А.Н., Прудовский А.М., Родионов В.Б. Компьютерное моделирование – современный инструмент решения задач речной гидравлики. Прогнозирование паводков в проекте «Волга-Рейн» // Там же. С. 126–131.
4. Бузин В.А. Заторы льда и заторные наводнения на реках. СПб.: Гидрометеоиздат, 2004. 204 с.
5. Бузин В.А., Зиновьев А.Т. Ледовые процессы и явления на реках и водохранилищах. Методы математического моде-

- лирования и опыт их реализации для практических целей (обзор современного состояния проблемы). Барнаул: Изд-во ООО «Пять плюс», 2009. 168 с.
6. *Вершинин Д.А.* Техногенные воздействия на вертикальные деформации русла и гидравлику потока (на примере р. Томи): Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. Томск: Томский гос. ун-т, 2005. 24 с.
 7. *Вершинин Д.А., Земцов В.А., Инишев Н.Г.* Факторы формирования заторных явлений на реках при переходе из горных территорий на равнинные (на примере р. Томи) // Охрана окружающей среды и природных ресурсов стран Большого Алтая: Материалы междунар. науч.-практ. конф. (Барнаул – Горно-Алтайск, 23–26 сентября 2013 г.). Барнаул – Горно-Алтайск, 2013. С. 55–58.
 8. *Вершинин Д.А., Татарников А.В., Орлов Е.И.* Возможности прогнозирования возникновения ледовых заторов на основе компьютерных моделей русла // Вестн. Томского гос. ун-та, 2011. № 352. С. 221–224.
 9. *Земцов В.А.* Оценка чувствительности стока р. Томь к изменениям климатических характеристик // География и прир. ресурсы. 1997. № 3. С. 176–182.
 10. *Земцов В.А., Вершинин Д.А., Инишев Н.Г., Лещенко П.Н.* Опыт исследования русловых деформаций р. Томи в условиях интенсивного антропогенного воздействия // Эрозионные и русловые процессы в Сибири. Барнаул, 2003. С. 97–102.
 11. *Земцов В.А., Вершинин Д.А., Инишев Н.Г., Мезенцев А.В.* Компьютерное моделирование речной динамики как элемент системы поддержки принятия решений (на примере крупных рек Сибири) // Водные проблемы крупных речных бассейнов и пути их решения. Барнаул, 2009. С. 520–534.
 12. *Короткова В.М., Вершинин Д.А.* Исследование процесса грядобразования на разветвленном участке р. Томи в связи с особенностями его водного и ледового режимов // Вестн. Томского гос. ун-та. 2011. № 351. С. 175–180.
 13. *Марусенко Я.И.* Ледовый режим рек бассейна Томи. Томск.: изд. Томского университета, 1958. 174 с.
 14. *Пушистов П.Ю., Вторушин М.Н., Романенко Р.Д., Земцов В.А.* Разработка электронного реестра-справочника информационно-вычислительных средств для планирования и управления системой водных ресурсов // Водные проблемы крупных речных бассейнов и пути их решения: Сб. науч. трудов Всерос. конф., 6–11 июля 2009 г. Барнаул, 2009. С. 546–557.
 15. *Семенов В.А.* Климатообусловленные изменения повторяемости и взаимосвязь опасных гидрометеорологических явлений на Азиатской территории России // Климатология и гляциология Сибири: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. (г. Томск, 16–20 октября 2012 г.). Томск, 2012. С. 274–276.
 16. River ice jams: Water Resources Publications, Highlands Ranch / Ed. S. Beltaos. Colorado, USA, 1995. 370 p.
 17. Surface Water Modeling System. Tutorials. Version 9.2. Brigham Young University. Environmental Modeling Research Laboratory. 2006.
 18. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC), HEC-RAS. User's Manual. Davis, CA, 1995.
 19. User's Guide to RMA2 WES Version 4.5. US Army, Engineer Research and Development Center – Waterways Experiment Station – Coastal and Hydraulics Laboratory – Engineering Computer Graphics Laboratory, Brigham Young University, 2005. 277 p.

Summary

The factors of ice jam formations in the lower flow of the Tom River (Siberia) are investigated. A length of the main channel under investigation is about 120 km. Approaches to solution of the problem of the jam formation control and, as a consequence, the jam induced floods are considered on the basis of the imitative computer modeling of stream dynamics and ice jams. The simulation makes it possible to analyze different scenarios of initial forcing and to predict reactions of the river bed system to the effects. On the basis of 1D models developed in the HEC-RAS 4.0 modeling system for the Tom River at the city of Tomsk we investigated a possibility of the ice jam localization, probability of which at different parts of river flow varies in time according to change of the river water discharge, stream hydraulics, and ice cover thickness. The 2D hydrodynamic model of the Tom River channel system in the SMS 9.2 modeling system has been developed. It allows simulating effects of ice jams located in different sections of the river flow on the run-off redistribution between the main channel and other river branches. It makes possible to estimate hazards and risks of ice jam floods and probable effects of ice jams on formation of the river channel system. As a result it becomes possible to regulate the safe spring ice transit through populated areas.

Analysis of factors of the ice jam formations has demonstrated that due to increasing anthropogenic influence changes of hydro-meteorological and geomorphologic conditions lead to more frequent occurrence of jam floods for the last 25 years as compared to previous 40-year period. The imitative computer models are proposed to be used for planning anti-jam measures since they make possible to create a whole system of the channel structure, a relief of channel and floodplain, a flow velocity field including dangerous hydrologic processes. Similar system would allow predicting both consequences of local anthropogenic influences and their synergic effects. A change of a pressure head along the river course under fixed water discharges at initial hydraulic section can be calculated with the 1D flow model so that to determine places of the most probable localization of the ice jams. A computer simulation of jams in the river channel system with use of preassigned increased roughness coefficients allows quantitative estimating of the runoff redistribution within the channel system under certain scenarios of a spring flood in the jam-dangerous parts of branching river channels. It is important to preserve such branches, and they should be cut by any dam from a main channel.