

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 556.565

*Д.А. Вершинин, А.В. Татарников, Е.И. Орлов***ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЛЕДОВЫХ ЗАТОРОВ
НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ РУСЛА**

Разработана методика прогноза возникновения затора льда на основе расчета возможности вскрытия ледяного покрова с использованием одномерных компьютерных моделей. Предлагается коэффициент вскрытия ледового покрова, зависящий от кинетической энергии потока и прочности льда.

Ключевые слова: ледяной затор; модель; критерий вскрытия.

Одна из характерных особенностей вскрытия рек Северного полушария Земли, текущих в направлении полярных широт, – возникновение наводнений, связанных с образованием в руслах крупных рек ледяных заторов в период вскрытия рек и весеннего ледохода. Это связано с тем, что полые воды от таяния снегов в южных широтах приходят в нижнее течение рек ранее, чем атмосферное тепло достаточно разрушит ледовый покров в этих местах. Особенно благоприятные условия возникновения ледовых заторов во время вскрытия рек приурочены к местам резкого изменения (в сторону уменьшения) транспортирующей способности потока, когда в местах, где перед началом весеннего половодья наблюдаются относительно большие глубины и невысокие уклоны водной поверхности и скорости течения. Здесь, в местах, где скоростного напора недостаточно для разрушения установившегося во время зимнего периода ледяного покрова, складываются условия для накопления поступающего сверху по течению льдин, их обломков и шуги, масса которых, накапливаясь, закупоривает вышележащее сечение реки и вызывает выход воды на пойму – заторные наводнения.

В русле р. Томи в районе г. Томска в течение исторически достоверного периода наблюдения за природными явлениями имела место проблема заторообразования и, как следствие этого, подъема уровней, что вело к подтоплению прилегающих к реке территорий [1]. Наиболее часто заторы возникали в районе дер. Белобородово, где сейчас расположен г. Северск. Повышение уровней в результате этих заторов приводило к затоплению части г. Томска. Начиная с 50-х гг. XX в. в русле ведется интенсивная добыча песчано-гравийного материала (ПГМ), что уже привело к посадке максимальных уровней на 3,5 м и минимальных уровней на 2,5 м, а также к частичному или полному исчезновению островов, расположенных в русле. Следствие значительного углубления русла увеличилась его пропускная способность, и скапливающиеся льды в пределах городской территории не забивают русло до дна и не препятствуют прохождению воды. Сбросы подогретой воды предприятий Северска уменьшили толщину льда, и заторы в этом месте образуются редко. Тем не менее при значительном поступлении льда сверху по течению тело затора достигает осередка Буяновского, расположенного в непосред-

ственной близости от коммунального моста и порога Боец. В этом месте сейчас аккумулируется большая часть донных наносов, поступающих сверху по течению, и значительное накопление льда может приводить к стеснению русла и подъему уровней воды, вызывающему затопление поймы и поселков, расположенных в непосредственной близости. Так, затор в 2004 г. вызвал затопление нескольких домов в пос. Черная речка, расположенном выше по течению г. Томска.

В связи с этим существует необходимость проведения различных противозаторных мероприятий. Предварительно необходимо иметь достоверный прогноз места, где будут образовываться заторы при тех или иных гидрометеорологических условиях, и величины подъема уровня при этом заторе. Среди мероприятий, проведение которых сосредоточено на локальном участке без существенного нарушения гидрологического режима, эффективным можно считать русловыправительные работы. Это воздействие приведет к изменению гидравлических условий в русле реки, кривых свободной поверхности (КСП), изменит конфигурацию русла и ход русловых процессов. Оценка и прогноз изменений гидравлических условий решается с применением имитационного компьютерного моделирования. Уже в течение более 10 лет на кафедре гидрологии ТГУ для этих целей с успехом применяются одномерные модели серии HEC.

Программа HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) [2], реализующая одномерный подход к моделированию, включает блок расчета установившегося движения воды и функции гидравлического проектирования. Первый блок предназначен для расчета продольных профилей водной поверхности для установившегося плавно изменяющегося течения. Система может работать с полной русловой сетью, древообразной речной системой или отдельным участком русла. Она может в одномерном варианте моделировать профили водной поверхности для спокойного, бурного и смешанного состояния потока. В последних версиях программы HEC, а именно HEC-RAS 3.1 и HEC-RAS 4.0, появилась возможность рассчитывать все гидравлические характеристики потока при наличии ледового покрова. Кроме того, имеется возможность также моделировать ледовые заторы при вскрытии рек. Для этого необходимо знать все физические свойства ледяного покрова (толщина, пористость,

плотность и т.д.), местоположение тела затора и характеристики самого затора (коэффициент трения между льдинами, угол трения между льдинами и т.д.).

На первом этапе для проверки возможностей программы HEC-RAS для моделирования условий возникновения ледовых заторов выбран участок, на котором ледовые заторы возникают ежегодно, а именно р. Томь от нового коммунального моста (59 км по лощманской карте) в нижнем течении до водомерного поста Томск – гидроствор (75 км), включая все протоки. В качестве исходных данных для построения гео-

метрической модели русла взяты русловые съемки, выполненные сотрудниками кафедры гидрологии в 2003–2007 гг., а также топографический план поймы. Все эти материалы сведены в единую систему координат, и построена цифровая модель рельефа. В процессе калибровки модели подобраны коэффициенты шероховатости Маннинга (n), при которых наблюдается наибольшее соответствие рассчитанных по модели отметок водной поверхности с реальными на постоянно действующих гидрологических постах в г. Томске (таблица).

Сравнительные результаты вычисления отметок водной поверхности моделируемого участка р. Томи на гидрологических постах с данными фактических наблюдений

Расход воды, м ³ /с	Номер сечения	Отметки поверхности воды, вычисленные в системе HEC-RAS, м БС	Измеренные отметки поверхности воды, м БС	Ошибка расчета, м
3 580	6.300 (гидроствор)	73,67	73,66	+0,01
1 210	6.300 (гидроствор)	70,91	70,92	–0,01
3 580	5.186 (пристань)	72,89	72,96	–0,07
1 210	5.186 (пристань)	69,74	69,75	–0,01

Одной из задач данного исследования явилось определение мест возможного возникновения затора при различных расходах воды при вскрытии реки. Обычно при малых расходах воды вскрытие происходит на нескольких участках по длине реки (на перекатах) с образованием серии небольших заторов на плесовых участках. При высоких же расходах эти небольшие заторы могут срываться и собираться в один большой затор, если существуют условия для его образования. В качестве критерия выявления таких мест первоначально был выбран скоростной на-

пор, рассчитываемый в программе HEC-RAS в каждом сечении. Судя по расчетам, низкое значение скоростного напора (1 см и менее) даже при расходах 3 000 м³/с наблюдается на участке 63 км от устья, т.е. в районе грузового порта (рис. 1). Можно сделать вывод о том, что это наиболее вероятное место возникновения затора (и действительно, заторы здесь наблюдаются ежегодно). Часто «голова» затора возникает выше о-ва Собачий (66–67 км от устья), что соответствует резкому снижению величины скоростного напора в этом районе.

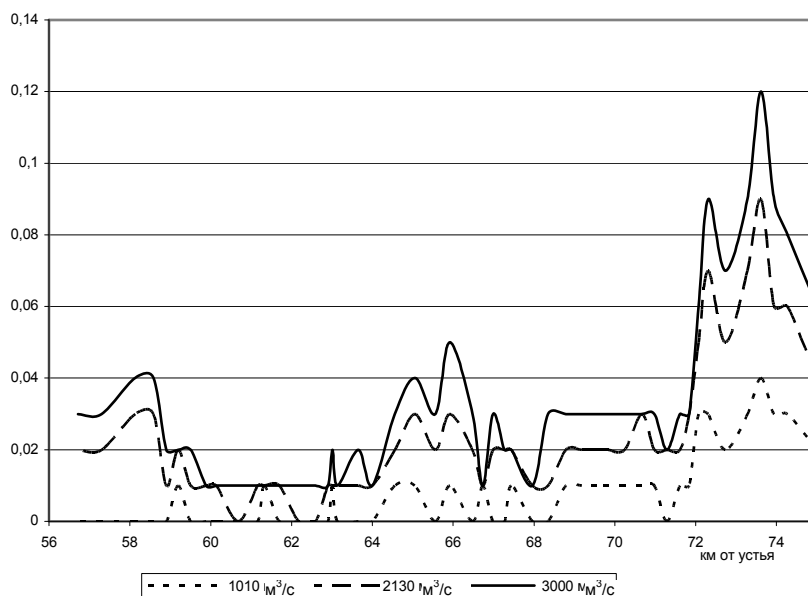


Рис. 1. Изменение величины скоростного напора по длине р. Томи в пределах г. Томска

Следует отметить, что одна только величина скоростного напора недостаточно информативна ввиду его незначительной амплитуды (например на такой реке, как Томь, максимальные значения не превышают 0,12 м при расходах 1 000–3 000 м³/с). Тем не менее уже эта величина позволяет предварительно указать на возможные места возникновения ледовых заторов. Заторы на р. Томи не всегда вызывают высокие подъемы уровня воды и затоп-

ление поселков и построек – это зависит от протяженности тела затора и количества воды, поступающей сверху по течению. Эти две величины взаимосвязаны, так как количество льда, скапливающегося в теле затора, зависит от протяженности вскрывающегося выше по течению участка, что в свою очередь зависит от соотношения характеристик ледяного покрова (толщина, прочность) и энергии потока (скорости течения, расход воды).

В дальнейшем при исследованиях заторов участок был увеличен вверх по течению – протяженность его составила от 59 до 82 км по лоцманской карте. Кроме того, по материалам русловых съемок 2008 г., выполненных сотрудниками кафедры гидрологии ТГУ, был уточнен рельеф участка реки от речного вокзала до нового коммунального моста на 59 км лоцманской карты.

Помимо обновленных геометрических данных было предложено изменить критерий вскрытия ледового покрова, названного условно $K_{\text{вскр}}$. В основу его заложено отношение величины кинетической энергии единицы массы потока (E , Дж) при наличии ледовых образований к значению предела прочности льда ($R_{\text{сж}}$, кПа):

$$K_{\text{вскр}} = \frac{E}{R_{\text{сж}}^2}. \quad (1)$$

Кинетическая энергия потока определяется по формуле [4]:

$$E = \frac{\gamma \cdot Q \cdot V^2}{2 \cdot g}, \quad (2)$$

где γ – плотность воды, кг/м³; Q – расход воды, м³/с; V – скорость потока, м/с; g – ускорение свободного падения, 9,81 м/с².

Значения предела прочности льда, или временного сопротивления льда при перпендикулярном сжатии ($R_{\text{сж}}$), в различных условиях его напряженного состояния и при температуре, близкой к 0°C, для рек Севера и Сибири были определены К.Н. Коржавиным [3]. Расчеты проводились с использованием двух крайних значений временного сопротивления льда, равных 450 и 650 кПа, при расходах воды 1 210, 2 000, 3 580 и 5 000 м³/с.

После анализа графиков распределения показателя $K_{\text{вскр}}$ при приведенных выше значениях расхода воды по длине участка было выдвинуто предположение о существовании критического значения показателя $K_{\text{кр}}$. Первоначально величина показателя была произвольно выбрана равной 0,5. В том месте участка, где величина $K_{\text{вскр}} < K_{\text{кр}}$, наблюдается устойчивый ледяной покров, там же, где $K_{\text{вскр}} > K_{\text{кр}}$, происходит вскрытие ледяного

покрова. Из этого можно предположить, что ниже по течению от участка, где происходит вскрытие, на границе с участком, где ледяной покров не вскрывается, возможно образование затора.

При расходе 3 580 м³/с (рис. 2) и наименьшей прочности льда, равной 450 кПа, вскрывается большая часть ледяного покрова исследуемого участка, ледовый покров остается в двух местах, в пределах участка: 1,1–6,8 и 18,5–19,4 км. Именно в этих местах и возможно образование мощного затора. Также существует вероятность образования незначительных заторов на 9–10 км участка, в районе водомерного поста Томск–пристань. При максимальной величине прочности льда, равной 650 кПа, ситуация менее критическая в плане объема вскрытого льда, возможными местами образования затора меньшей мощности являются 14 и 20 км.

При расходе 5 000 м³/с (рис. 3) и минимальной прочности льда 450 кПа ледяной покров остается на относительно коротких участках с 4,1 по 5,7 км и с 18,9 по 19,5 км. Исходя из того что остальная часть участка выше по течению свободна ото льда и поток несет вниз по течению большие массы воды и разрушенного ледяного покрова, можно предположить, что участки незначительной протяжности с наличием непрочного ледяного покрова будут разрушены и на месте расположения этих участков не будет происходить образование затора. Однако в случае, если прорыв не состоится, то в вышеуказанных местах, при прочих условиях (например, резкое падение температуры воздуха), при высшей прочности льда 650 кПа возможно образование мощного затора на 7 км участка, так как $K_{\text{вскр}}$ колеблется в районе критического значения от 7 до 14 км и значительно превышает это значение на 14–17 км, т.е. длина вскрытого участка может составить 10 км при условии удержания ледяного покрова на 19–20 км. В случае прорыва льда на 19–20 км возможно образование мощнейшего затора с резким подъемом уровней воды и затоплением большей части расположенной выше затора территории.

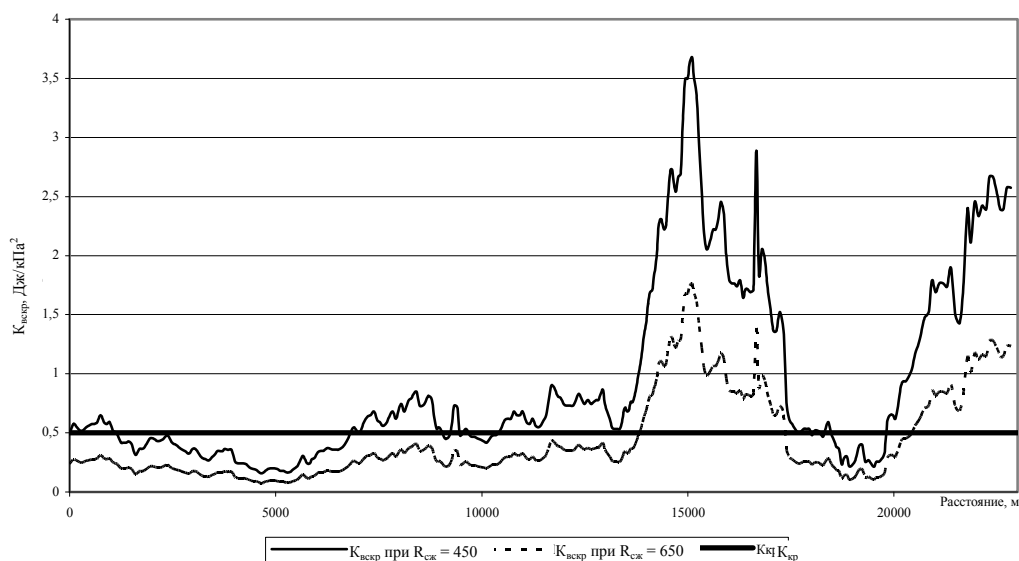


Рис. 2. График изменения критерия вскрытия $K_{\text{вскр}}$ по длине исследуемого участка р. Томи при расходе 3 580 м³/с (за начало принят створ нового коммунального моста)

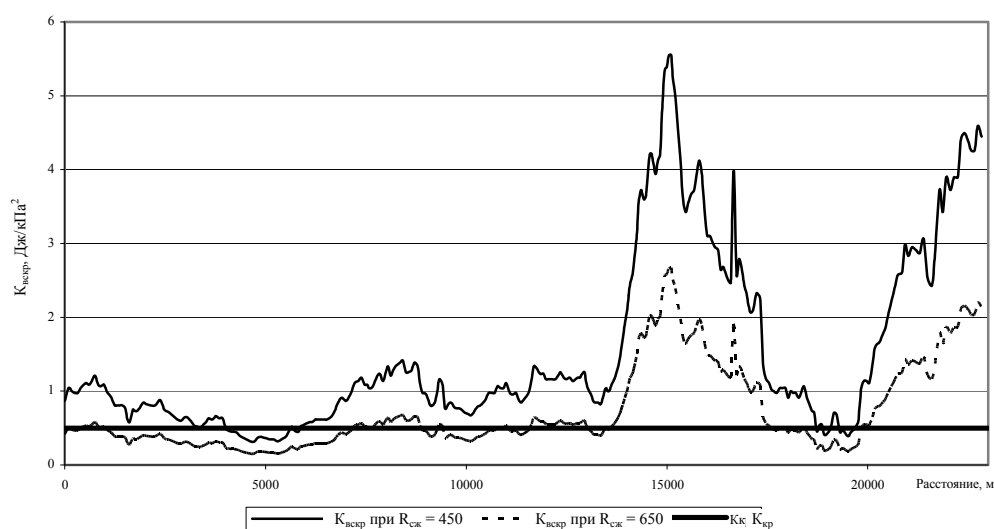


Рис. 3. График изменения критерия вскрытия $K_{вскр}$ по длине исследуемого участка р. Томи при расходе $5\,000\text{ м}^3/\text{с}$ (за начало принят створ нового коммунального моста)

Величина подъема уровня при заторе будет зависеть как от объема поступившего льда сверху по течению (объем в данном случае зависит от длины вскрытого участка, ширины русла, покрытого ледяным покровом на этом участке, и толщины ледяного покрова), так и от рельефа дна русла реки – наличия перекаатов, на которых большое количество поступившего сверху по течению льда может привести к стеснению сечения реки и даже полной закупорке русла битым льдом.

Возможно, по такому сценарию и развивалось вскрытие реки в 2004 г., когда при относительно высоких расходах воды и прочности ледяного покрова был вскрыт большой по протяженности участок р. Томи выше по течению от г. Томска и тело затора достигло участка с большим количеством осередков ниже коммунального моста и порога Боец. В результате подъема уровня воды были затоплены прибрежные территории выше по течению от

коммунального моста (часть пос. Черная речка). Повышение распространилось и вниз по течению. В результате этого, а также возросшего давления льда в заторе и взрывных работ был прорван ранее не вскрытый участок в районе речного порта, после чего уровни воды в реке резко снизились и образовался густой ледоход.

Многие пока спорные моменты могут быть также прояснены при дальнейшем исследовании с применением программ серии НЕС, которые помимо вычисления стандартных характеристик (скорость потока, скоростной напор, уровень воды, ширина русла и т.д.) могут имитировать ситуации с ледовым покровом различной толщины, шероховатости и прочности, а также вычислять характеристики самого затора (коэффициент трения между льдинами, угол трения, начало и конец затора и т.д.), в том числе и для неустановившегося режима движения воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марусенко Я.И. Ледовый режим рек бассейна Томи. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1958. 174 с.
2. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC), HEC-RAS. User's Manual. Davis, CA, 1995.
3. Винников С.Д., Проскуряков Б.В. Гидрофизика. Л. : Гидрометеиздат, 1988. 245 с.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 24 июля 2011 г.