

УДК 550.42:57.4(571.1)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ р. ТОМИ В ЧЕРТЕ г. ТОМСКА (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

О.Г. Савичев

Томский политехнический университет
E-mail: OSavichev@mail.ru

Разработана и апробирована математическая модель деформаций русла р. Томи в черте г. Томска на участке реки 74,8...58,3 км от устья. Для периодов высокой, средней и малой водности установлено распределение по длине реки интенсивности вертикальных деформаций дна, расходов влекомых и взвешенных наносов. Показано, что при сохранении природно-антропогенных условий формирования твердого стока р. Томи в черте г. Томска, сформировавшихся в 2003–2006 гг., вероятно определенное понижение в ближайшее десятилетие отметок дна и дальнейшее формирование острова в южной части города. Выполнена оценка эффективности дноуглубительных работ на р. Томи и дан прогноз русловых деформаций при различных вариантах антропогенного воздействия на поток.

Введение

Томь является одним из крупнейших притоков р. Оби, в бассейне которого проживает более 2 млн чел., причем преимущественно в крупных городах по берегам указанной реки (гг. Междуреченск, Новокузнецк, Кемерово, Юрга, Томск, Северск). Подобное размещение населенных пунктов, обусловленное историей хозяйственного освоения Западной Сибири, с одной стороны, позволяет более активно использовать водные ресурсы и минимизировать затраты на водообеспечение и водоотведение. С другой стороны, приходится уделять большое внимание проблемам предотвращения негативных воздействий вод, в том числе водной эрозии речных берегов и гидротехнических сооружений. Особенно остро данная проблема стоит для г. Томска, в пределах которого наблюдаются достаточно интенсивные природно-антропогенные деформации русла р. Томи.

Анализ результатов исследований, выполненных ранее в ОАО «Томскгеомониторинг», Томском политехническом (ТПУ) и Томском государственном (ТГУ) университетах при непосредственном участии автора, показал, что с 1950-х гг. до середины 1980-х гг. вследствие русловой добычи песчано-гравийного материала (ПГМ) произошло уменьшение на 2,0...2,5 м отметок дна, а вслед за ними и уровней воды. При этом изменились очертания береговой линии и русловых образований, многие осередки и острова либо исчезли, либо уменьшились. В середине 1980-х гг. работы по русловой добыче ПГМ у г. Томска были свернуты. В конце 1990-х гг. на р. Томи на участке 73...70 км от устья стало отме-

чаться расширение существующих осередков и их превращение в острова, а на этом фоне — усиление размыва русла и повышение максимальных уровней воды, не наблюдавшееся около 40 лет [1, 2].

С целью предотвращения деформаций берегов в 2005–2006 гг. на р. Томи были проведены руслоисправительные (дноуглубительные) работы. В частности, в 2005 г. выполнено изъятие ПГМ в двух карьерах в средней и левобережной частях русла в районе корпуса ТГУ № 6 (примерно в 72,5...71,0 км от устья) на площади 1610,6 тыс. м². Суммарное уменьшение объема донных отложений оценено в 210,9 тыс. м³, причем собственно добыча ПГМ составила 60 % изъятых в двух карьерах, а 40 % этого объема было перераспределено в русле ниже по течению от карьеров и привело к формированию нового руслового образования между карьерами и росту осередков ниже по течению от них. В 2006 г. руслоисправительные работы были выполнены в 70,7...70,5 км и 68,6...68,3 км от устья р. Томи. Площадь выработки на первом участке составила 31 тыс. м², уменьшение объема ПГМ — 28,5 тыс. м³; площадь выработки на втором участке — 29,5 тыс. м², уменьшение объема ПГМ — 3,5 тыс. м³.

Сопоставление материалов русловых съемок, выполненных до и после проведения указанных работ, позволило сделать ряд выводов, наиболее важными из которых являются следующие. Во-первых, при проведении дноуглубительных работ на каком-либо участке ниже по течению вероятно накопление наносов, что может снижать ожидаемый эффект от проведения указанных мероприятий. Во-вторых, невозможно повысить эффектив-

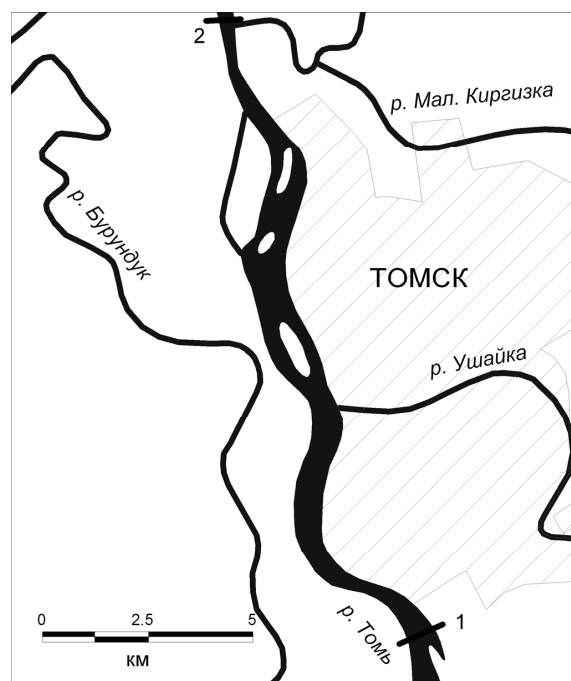


Рис. 1. Схема исследуемого участка р. Томи; створы от устья реки: 1) в 74,8 км (гидроствор); 2) в 58,3 км

ность руслоисправительных (дноуглубительных) и берегозащитных работ без проведения математического моделирования и прогноза русловых деформаций с учетом различных вариантов изменений

гидрологических условий и проведения инженерных мероприятий. Все это и определило цель рассматриваемых исследований, в процессе которых автором была разработана и апробирована математическая модель деформаций русла р. Томи в г. Томске. Схема исследуемого участка р. Томи приведена на рис. 1.

Исходной информацией послужили данные русловых съемок ОАО «Томскгеомониторинг» и предприятия «Томский район водных путей и судоходства», материалы гидрологических наблюдений Томского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ТЦГМиМОС), ТГУ и ТПУ за 2003–2006 гг.

Структура математической модели

Рассматриваемая математическая модель базируется на численном решении уравнения русловых деформаций, имеющего вид:

$$\partial G_{\text{вл}} / \partial x - q_{\text{взв}} + m_0 B \partial z / \partial t = 0, \quad (1)$$

где $G_{\text{вл}}$ – расход влекомых наносов в объеме беспустотной породы; $q_{\text{взв}}$ – расход взвешенных наносов, оседающих на дно или поднимающихся вверх; m_0 – относительная плотность грунтов и наносов; B – ширина реки, м; x – координата продольного перемещения; z – высотная отметка дна; t – координата времени. Величина $q_{\text{взв}}$ рассчитывается по методу А.В. Караушева, расход влекомых наносов – по методу Г.И. Шамова [3].

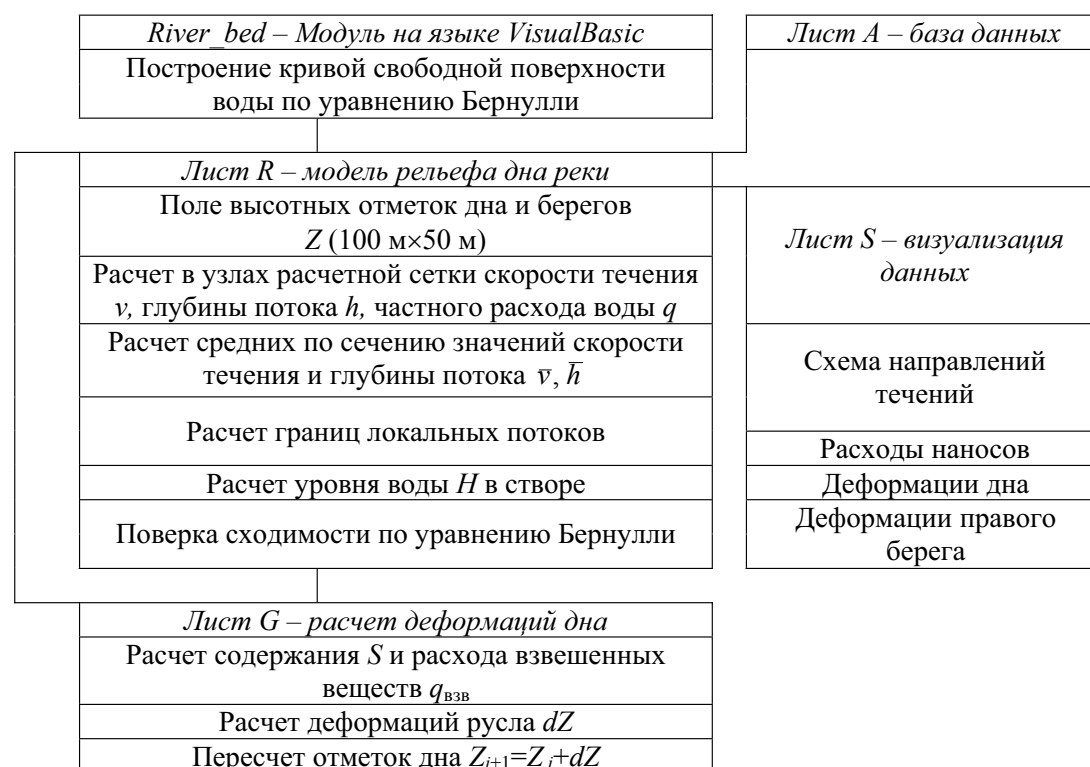


Рис. 2. Структура компьютерной модели деформаций русла р. Томи в г. Томске в среде MS Excel

Решение уравнения (1) находится для каждого из локальных потоков, имеющих расход $q=Q/10$, где Q – общий расход воды в рассматриваемом сечении. Границы локального потока определяются путем интерполяции по кривой $q=q(b)$ для каждого створа, где b – расстояние от гребня дамбы на правом берегу. Изменение уровня воды в смежных створах определяется по уравнению Бернулли путем оптимизации методом золотого сечения. Общая структура модели, реализованной автором в среде MS Excel в виде программного комплекса НУМ, представлена на рис. 2. Результаты верификации модели по материалам русловой съемки р. Томь у г. Томска (в гидростворе) в мае 2001 и 2003 гг. приведены в [4].

Расчетные варианты

Математическое моделирование проводилось для различных гидрологических условий и вариантов фактического и возможного изменения р. Томи на участке от гидроствора ТЦГМиМОС в г. Томске (74,8 км от устья) до г. Северска (58,3 км от устья). При этом использовались следующие варианты гидрологических условий:

1. Весеннее половодье средней водности – расход воды $Q=6860$ м³/с; уровень воды H_i в гидростворе составляет 630 см над «нулем» графика поста; уклон водной поверхности в гидростворе $I=0,16$ ‰ (данные за 23.05.2004 г.).
2. Весеннее половодье малой водности – $Q=3640$ м³/с; $H_i=350$ см; $I=0,088$ ‰ (данные за 23.05.2003 г.).
3. Конец весеннего половодья (условия, близкие к среднемноголетним) – $Q=1090$ м³/с; $H_i=70$ см; $I=0,14$ ‰ (данные за 20.06.2004 г.).
4. Летне-осенняя межень – $Q=472$ м³/с; $H_i=-48$ см; $I=0,28$ ‰ (данные за 22.09.2003 г.).

В качестве расчетных вариантов руслоисправительных работ рассмотрены состояния р. Томи на осень 2005 г.; март 2006 г.; август – сентябрь 2006 г. после проведения руслоисправительных работ; март 2006 г. (прогноз) при условии размещения складов ПГМ.

Основное внимание в процессе математического моделирования русловых процессов было уделено изучению планов течений, изменения по длине реки величин стока наносов (взвешенных и влекомых) и деформаций, обусловленных перемещением речных наносов.

Результаты исследований и их обсуждение

План течений. В течение года, в зависимости от водности реки, на рассматриваемом участке наблюдается заметное изменение скорости и направления течения воды. Наиболее сжатые участки потока в весенний период отмечены в районе скального выхода «боек» (74,0...73,8 км от устья) и верхнего моста (73 км от устья) в южной части г. Томска. Определенное сжатие потока происходит и в районе рас-

положения крупных островов (Боярского, Нижнего Боярского, Собачьего). По мере уменьшения расходов воды происходит определенное сужение потока и его прижимание к левому берегу на участке в 70,3...68,8 км от устья (4,5...6,0 км от гидроствора). При этом очертания потока в плане становятся более резкими за счет обтекания водными массами островов и осередков, причем их влияние на скоростное поле становится заметным уже при расходах воды около 3000...3500 м³/с. Максимальное сужение потока приурочено к меженному периоду, когда расходы воды не превышают 500 м³/с. В это время наблюдается смещение водных масс к левому берегу в районе «бойца», у верхнего моста и на Нижне-Сенном перекате (71,5...70,5 км от устья), к правому берегу – в 73,4...73,2 км от устья и ниже по течению от корпуса ТГУ № 6, расположенного примерно в 72 км от устья.

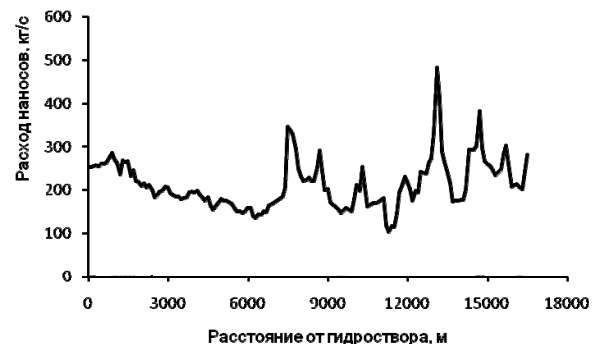


Рис. 3. Изменение суммарных расходов наносов р. Томи на участке 74,8...58,3 км от устья (гидроствор – устье р. Большой Киргизки); $Q=6860$ м³/с

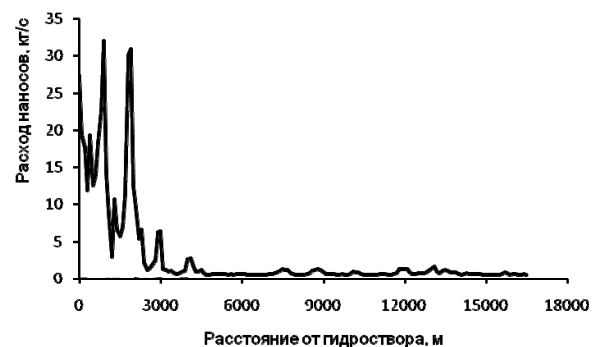


Рис. 4. Изменение суммарных расходов наносов р. Томи на участке 74,8...58,3 км от устья; $Q=472$ м³/с

Сток наносов. Анализ пространственно-временного изменения расходов наносов по длине реки от гидроствора до г. Северска показал, что максимальные их значения приурочены: по времени – к весеннему половодью, в пространстве – к участку р. Томи от п. Нижний склад до грузового речного порта в 68...59 км от устья (рис. 3); минимальные: по времени – летне-осенней межени, в пространстве – на участке от устья р. Ушайки (в 69 км от устья р. Томи) до г. Северска (рис. 4). По мере уменьшения водного стока в конце мая – начале июля происходит не только абсолютное, но и относительное изменение расходов наносов по длине ре-

ки, характеризующееся максимумами в южной части г. Томска (в районе выхода скальных пород в 74,0...73,8 км от устья). Кроме того, при уменьшении расходов воды снижается доля взвешенных частиц в суммарном стоке наносов. Тем не менее, в целом за год для р. Томи в черте г. Томска характерно закономерное преобладание взвешенной составляющей твердого стока.

Деформации речного дна. Пространственные и временные изменения деформаций определяются не только величиной расхода наносов, но и геометрией русла. С учетом этого тенденции деформации русла могут существенно отличаться от тенденций изменений твердого стока. Наибольший размыв дна по результатам моделирования выявлен для участка «боец», но в данном случае деформации русла оцениваются как потенциальные, а не фактические, поскольку в модели не учтена низкая размываемость скальных пород в этом месте. Также следует отметить, что при относительно незначительном изменении по длине реки средней по сечению величине деформации дна на разных участках поперечного профиля русла могут наблюдаться одновременно размыв и аккумуляция. Причем аккумуляция наносов у островов может наблюдаться даже при очень высоких расходах воды в весенний период (рис. 5).



Рис. 5. Изменение средней по сечению интенсивности деформаций дна р. Томи на участке 74,8...58,3 км от устья; $Q=6860 \text{ м}^3/\text{с}$

Уже на спаде половодья, либо в половодье низкой водности, может происходить аккумуляция взвешенных наносов на большем протяжении исследуемого участка р. Томи и одновременно — размыв дна реки за счет переноса влекомых частиц на отдельных участках, приуроченных к сужениям русла и перепадам глубин в местах проведения руслоисправительных работ. В конце половодья — начале летней межени на всем протяжении реки в среднем по сечению наблюдается незначительная аккумуляция взвешенных наносов и чередование участков размыва дна и аккумуляции влекомых наносов. Некомпенсируемый аккумуляцией взвешенных частиц размыв дна отмечен только в районе «бойца» и верхнего моста (рис. 6). В период летне-осенней межени наблюдается в основном аккумуляция наносов, преимущественно — взвешенных. Наиболее интенсивное отложение наносов отмечается в основном у осередков в районе корпу-

са ТГУ № 6, выше устья р. Ушайки и у островов Боярского, Нижнего Боярского и Собачьего.

Фактическое и прогнозное изменение русловых процессов в результате руслоисправительных работ, выполненных в 2005–2006 гг. После проведения руслоисправительных работ в южной части г. Томска произошло выравнивание потока и его смещение к центру русла за счет углубления участков русла. Во время половодья непосредственно на участке проведения работ средние по сечению отрицательные деформации дна реки уменьшились или фактически прекратились, что свидетельствует об определенной эффективности выполненных мероприятий. В летне-осеннюю межень характер и масштаб деформаций дна в целом изменились незначительно.

В ближайшие годы следует ожидать определенное выравнивание потока примерно в 71 км от устья и смещение части водных масс к левому берегу в 70,3...68,8 км от устья. С учетом этого возможны размыв левого берега и дна реки с последующим переотложением наносов на нижерасположенном участке и формированием осередков. Изменение стока наносов в период весеннего половодья ожидается незначительным. В межень расходы наносов уменьшатся как непосредственно в месте проведения дноуглубительных работ в 71 км от устья, так и на вышерасположенных участках. Изменения стока наносов в районе речного вокзала (68,1 км от устья) будут незначительными. Аналогичные тенденции характерны и для пространственной динамики русловых деформаций. Так, изменение деформаций дна при прохождении пика половодья как на Нижне-Сенном перекате, так и у речного вокзала, предположительно, будет несущественно, но в межень уменьшится аккумуляция наносов выше по течению от места размещения карьера в 71 км от устья р. Томи. Непосредственно в карьерах будет происходить определенная аккумуляция наносов.



Рис. 6. Изменение средней по сечению интенсивности деформаций дна р. Томи на участке 74,8...58,3 км от устья; $Q=1090 \text{ м}^3/\text{с}$

Прогнозное изменение русловых процессов в результате размещения подводных складов ПГМ в русле р. Томи. Анализ результатов математического моделирования показал, что размещение складов ПГМ вблизи от берега может привести (в отсутствие дополнительных руслоисправительных работ) к смещению потока и усилению размыва дна

между складом и ближайшим берегом. При этом влияние складов будет наиболее заметно на спаде половодья. В частности, размыв части береговой полосы в межень возможен при размещении склада в 70,3 км от устья. Менее заметное, но все существенное смещение водных масс к середине русла ожидается и в районе устья Эуштинской протоки (60,4...60,2 км от устья). Относительно заметное изменение (увеличение) стока наносов возможно на спаде половодья — в начале летней межени, когда в результате сужения живого сечения произойдет увеличение скоростей течения. В периоды высокой и, напротив, низкой водности изменения расходов наносов будут малозаметны. Влияние складов проявится не только в изменении твердого стока и размыве береговой полосы, но и в усилении аккумуляции взвешенных наносов в межень на участках, в пределах которых произойдет снижение скоростей течения.

Выводы

1. Разработана и апробирована математическая модель русловых процессов на примере р. Томи в черте г. Томска, позволяющая прогнозировать изменение скоростного поля, твердого стока и русловых деформаций; эффективность дальнейшего ее использования определяется необходимостью обновления и уточнения данных о рельефе дна и прибрежной части.
2. В течение года по длине реки происходит существенное изменение расходов наносов и интенсивности русловых деформаций в зависимости от величины водного стока и геометрии русла.
3. В результате руслоисправительных работ произошло определенное смещение водных масс к центру русла в районе корпуса ТГУ № 6 (примерно в 72 км от устья); в целом воздействие на русло в 2005–2006 гг. оцениваются как умеренное, а эффективность руслоисправительных работ — как удовлетворительная.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савичев О.Г., Шварцев С.Л., Рассказов Н.М., Шварцева Н.М. Гидрогеоэкологическая ситуация в бассейне реки Томи // География и природные ресурсы. — 2004. — Спец. выпуск. — С. 192–199.
2. Лыготин В.А., Савичев О.Г., Нигороженко В.Я. Состояние поверхностных водных объектов, водохозяйственных систем и сооружений на территории Томской области в 2000–2005 гг. — Томск: АГРАФ — ПРЕСС, 2006. — 88 с.

4. В ближайшей перспективе (при отсутствии дополнительных антропогенных изменений русла) следует ожидать определенное выравнивание потока примерно в 71 км от устья и смещение части водных масс к левому берегу в 70,3...68,8 км от устья; с учетом этого возможен размыв левого берега и дна реки с последующим переотложением наносов на нижерасположенном участке и формированием осередков.
5. Размещение складов песчано-гравийных материалов вблизи от берега может привести к смещению потока, усилению размыва дна между складом и ближайшим берегом (особенно на спаде половодья), а также (в период ледохода) к увеличению плотности шугохода.
6. С учетом этого не рекомендуется размещать склады в местах сужения потока и на криволинейных участках; наименьшие негативные последствия ожидаются при размещении складов песчано-гравийных материалов в нижней части острова Энеков (примерно в 63,0...61,5 км от устья) при предварительной сработке части косы и размещения склада в пределах старых границ острова.
7. Русло р. Томи в г. Томске в южной части города (в створе верхнего моста в 73 км от устья) в течение 2003–2006 гг. лет в целом стабильно; ниже по течению от моста отмечаются значительные деформации в пределах той или иной части поперечного сечения (более погрешности определения 0,58 м), но в среднем по сечению вертикальные деформации незначительны (менее 0,58 м).
8. При сохранении природно-антропогенных условий формирования твердого стока р. Томи в черте г. Томска вероятно определенное понижение в ближайшее десятилетие отметок дна ниже по течению от верхнего моста в 73 км от устья.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант Р_ОФИ 06-05-96924).

3. Международное руководство по методам расчета основных гидрологических характеристик. — Л.: Гидрометеиздат, 1984. — 247 с.
4. Савичев О.Г. Сток влекомых наносов реки Томь (Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. — 2007. — Т. 310. — № 3. — С. 22–25.

Поступила 12.04.2007 г.