

На правах рукописи

ВЕРШИНИН ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ТЕХНОГЕННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ  
РУСЛА И ГИДРАВЛИКУ ПОТОКА  
(на примере р.Томи)**

**25.00.36 (геоэкология)**

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Томск - 2005

Работа выполнена в Томском государственном университете

Научный руководитель: доктор географических наук, доцент  
Земцов Валерий Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор географических наук, профессор  
Поздняков Александр Васильевич  
кандидат геолого-минералогических наук, доцент  
Емельянова Тамара Яковлевна

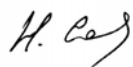
Ведущая организация: Областное государственное унитарное  
предприятие «Территориальный центр Томскгеомониторинг»

Защита состоится 16 февраля 2005 г. в 16-00 час. на заседании диссертационного совета К212.267.07 при  
Томском государственном университете по адресу: г.Томск, пр.Ленина, 36, главный корпус ТГУ, ауд. 119.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета

Автореферат разослан «12» января 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат геолого-минералогических наук, доцент



Савина Н.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В современных представлениях о русловом процессе рек как форме взаимодействия потока и русла наибольшее внимание уделено плановым деформациям русла, т.к. прогноз таких деформаций позволяет принимать решения о расположении различных объектов вблизи рек. Вертикальные деформации в данном контексте считаются вторичными и их расчет, в основном, основывается на проявлении их в естественных условиях. Аллювиальный материал рек – песок, песчано-гравийная смесь, гравий и галька в большом количестве используются в строительстве дорог, различных жилых и промышленных зданий и сооружений и т.п. Добыча нерудных материалов плавучими техническими средствами на русловых затопленных месторождениях или обводненных непродуктивных пойменных землях и перевозка этих материалов водным транспортом экономически эффективны. Многие реки России в течение длительного времени являлись поставщиками песчаного и гравийно-галечного материала и остаются ими по сей день. Естественно, выемка аллювия в количестве, многократно превышающем естественный сток наносов, не могла не отразиться на их русловом режиме (деформациях русла, стоке наносов) и гидравлических характеристиках (уклонах свободной поверхности, скоростях течения). Участки многих рек в результате длительной добычи песчано-гравийных материалов (ПГМ) из их русел необратимо изменились. К ним относятся такие реки, как Иртыш у г. Омска, Белая, Терек, Волга, Томь и т.д.

Кроме выемки ПГМ из русел рек немаловажным фактором, влияющим на гидравлический и русловой режимы реки, является гидротехническое строительство на самой реке, ее притоках и главной по отношению к ней реке. Важно правильно определить возможное влияние, процессы, возникающие в результате такого строительства, и мероприятия по предотвращению переформирования русла и разрушения самих гидротехнических сооружений.

В настоящее время остро встает вопрос о достижении максимума эколого-экономической эффективности добычи нерудных строительных материалов (НСМ) из русел рек. Следует отметить, что до сих пор методы исследования влияния карьеров имеют слабое теоретическое обоснование. Исследования гидравлики потока в речном карьере проводились лишь на лабораторных установках в узком диапазоне размеров и гидравлических характеристик потока. Предлагаемые в различных руководствах и рекомендациях способы оценки влияния карьеров на режим потока и русла применимы, в основном, для одиночных карьеров в однорукавных руслах.

**Целью работы** является научное обоснование и разработка методики исследования и прогнозирования последствий техногенного воздействия на деформации русла и гидравлику потока в результате антропогенных нарушений системы поток-русло, с позиций оценки преимущественно вертикальных деформаций. Для достижения этой цели решались следующие **задачи**:

1. Исследование природных условий формирования долины реки Томи и ее строения в пределах Томской области.
2. Анализ особенностей морфологии русла в нижнем течении реки Томи и определение типов руслового процесса на различных участках.
3. Исследование динамики переформирований русла реки Томи в последнее столетие.
4. Определение влияния карьеров ПГМ на гидравлические характеристики и русловые переформирования в реке.
5. Определение динамики русловых переформирований р. Томи выше и ниже по течению города Томска за период русловой добычи ПГМ и выявление влияния последней на русловую процесс.
6. Исследование стока наносов по деформациям в карьерах, натурным измерениям и на физических и компьютерных моделях.

**Объектом исследования** является русло реки Томи на участке длиной 126 км от устья до границы с Кемеровской областью, гидрологические и гидравлические характеристики потока.

### **Методы исследования:**

1. Классификация участков р.Томи с учетом типизаций различных авторов и ранее проведенных исследований (ГГИ, В.А.Льготин) на данном участке.
2. Сравнение гидрологических, гидравлических и морфометрических характеристик потока и русла (уровней и расходов воды, скоростей течения, уклонов, площадей поперечного сечения, ширины, глубины потока) за многолетний период.
3. Компьютерное моделирование участков русловой сети и вариантов устройства карьеров в русле и протоках с оценкой их влияния на гидравлический режим и деформации русловой системы.

**Исходные материалы.** При выполнении работы использовались фондовые материалы Томского государственного университета (ТГУ), ОАО «Томская судоходная компания», ОАО «Сибречпроект», Гидрометеослужбы (лоцманские карты 1959, 1975, 1990 гг., русловые съемки масштаба 1:5000 1983, 1987, 1991, 1997 гг., геологические карты, данные о результатах бурения на месторождениях ПГМ, кривые свободной поверхности и продольные профили за 1983, 1987, 1991, 1998 гг., гидрометрические данные), а также

материалы, полученные в результате полевых экспедиционных исследований в ходе собственной профессиональной деятельности автора.

**Научная новизна** выражается в том, что в работе впервые:

1. На основе систематизации многочисленных материалов режимных и изыскательских работ, количественно определено индивидуальное и кумулятивное воздействие множественных карьеров ПГМ на вертикальные русловые переформирования и гидравлический режим реки Томи.
2. Выявлен генезис и величина посадки уровней на исследуемом участке реки Томи в условиях различной техногенной нагрузки. На основе выполненных исследований разработана методика определения посадки уровней воды на любом временном промежутке в различные периоды водности потока.
3. Созданы постоянно действующие модели участка реки Томи для прогнозирования последствий отработки карьеров ПГМ, деформаций многорукавных русел и изменений гидравлических условий, учитывающие синергический эффект воздействий. На этой основе предложена программа мониторинга и изысканий русловых месторождений ПГМ.

**Практическая значимость:**

1. Результаты моделирования послужили основой для составления разделов оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) проектируемых карьеров ПГМ и предложений по порядку и объемам отработки месторождения с максимальной эколого-экономической эффективностью.
2. Предложения по составу изысканий для проектов разработки русловых месторождений ПГМ и строительства гидротехнических сооружений, а также составу изысканий по программе мониторинга приняты в таких организациях, как ОАО «Сибречпроект», ОАО «Томскводпроект», ООО «Абрис» и на кафедре гидрологии ТГУ.
3. По результатам натурных измерений стока донных наносов приборами, разработанными под руководством автора работы и с использованием водолазной техники, подобрана формула для расчета стока донных наносов в реках с гравийно-галечным руслом.
4. Результаты исследований используются в преподавании курсов «Динамика русловых потоков и русловые процессы» и «Водная экология и гидробиология» на кафедре гидрологии ТГУ.

**Апробация работы.** Результаты работы доложены на 13 научных конференциях, совещаниях и семинарах: Региональной научно-практической конференции, посвященной 40-летию кафедры гидрологии Томского государственного университета, г. Томск, 1997; II областной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 1998; XIV пленарном межвузовском координационном совещании по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов, г. Уфа, 1999; Международной научно-практической конференции «Экологические, гуманитарные и спортивные аспекты подводной деятельности» г. Томск, 1999; 5 Всероссийской конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей», г. Москва, 1999; XV пленарном межвузовском координационном совещании по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов, г. Волгоград, 2000; II Всероссийском совещании «Экология пойм сибирских рек и Арктики», г. Томск, 2000; Региональной научной конференции геологов Сибири, Дальнего Востока и северо-востока Сибири «III века горно-геологической службы России», г. Томск, 2000; научной конференции «Проблемы геологии и географии Сибири», г. Томск, 2003; Всероссийской научно-практической конференции по проблемам природопользования и охраны окружающей среды, г. Томск, 2003; Региональном совещании по проблеме «Русловые и эрозионные процессы в Сибири», г. Барнаул, 2003; XXVII Пленуме Геоморфологической комиссии РАН «Самоорганизация и динамика геоморфосистем», г. Томск, 2003; III международной научно-практической конференции «Экологические, гуманитарные и спортивные аспекты подводной деятельности», г. Томск, 2004.

Основные положения диссертации и предложенная методика стали основой при составлении разделов ОВОС трех проектов разработки месторождений ПГС и строительства гидротехнических сооружений.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 16 статей и тезисов докладов в отечественных изданиях.

**Содержание и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, а также шести графических приложений. Материал изложен на 187 страницах машинописного текста, содержит 11 таблиц и 56 рисунков, список литературы включает 121 наименование.

Автор выражает признательность своему научному руководителю д-ру. геогр. наук В.А. Земцову за общее и методическое руководство в проделанной работе. Глубокую благодарность автор выражает д-ру. геогр. наук, проф. Д.А.Буракову, канд. геогр. наук А.В. Мезенцеву за ценные советы и замечания при написании диссертации, а также всем сотрудникам кафедры гидрологии ТГУ за доброе, внимательное отношение и неоценимую помощь в написании работы.

## ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. На участках рек, где существенное развитие получили факторы, ограничивающие развитие руслового процесса (общий и местные базисы эрозии, трудно размываемые склоны долины), для выделения гидроморфологически однородных участков типизацию ГГИ необходимо дополнять элементами типизаций других авторов.

Типизация любых процессов важна потому, что она содержит элемент прогноза. Действительно, зная начальные, промежуточные и конечные стадии развития процесса, сравнивая эту схему с наблюдающейся на данный момент стадией развития, можно предвидеть конечную, а, следовательно, и промежуточные стадии развития процесса и планировать воздействие на русло уже с учетом этого развития.

Для исследования руслового и гидравлического режима в настоящей работе выбран участок русловой системы нижнего течения реки Томи, в пределах Томской области (рис. 1.). Длина его составляет 126 км. Выбор участка обусловлен тем, что на его протяжении встречаются, во-первых, практически все типы руслового процесса и, во-вторых, места, подвергшиеся активному антропогенному воздействию, и участки, избежавшие этого.

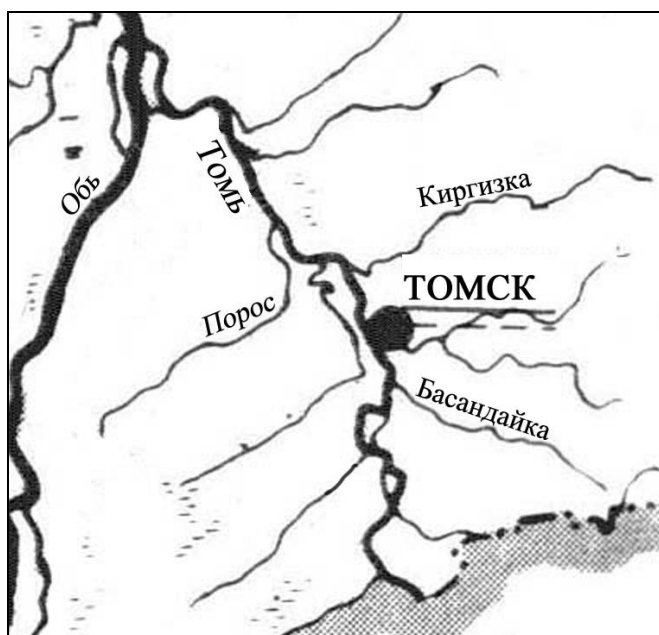


Рис.1. Схема исследуемого участка

В геологическом строении равнинной части бассейна Томи выделяют фундамент и рыхлый мезозойско-кайнозойский чехол. В окрестностях Томска и выше по течению Томи породы фундамента (палеозой) выходят на поверхность и часто встречаются в русле реки в виде трудно размываемых порогов – “бойцов”, которые подвергаются заметному разрушению лишь в период ледохода. Породы палеозоя представлены глинами, сланцами, песчаниками и известняками девона и карбона. Палеозойские породы собраны в пологие складки и местами прорваны дайками магматических пород, которые являются практически не размываемыми. Примером такого выхода магматических пород является порог “Боец” в районе Лагерного сада в г.Томске. Мощность рыхлых осадочных пород мезозойско-кайнозойского чехла в пределах бассейна Томи колеблется от нескольких метров, до 1 км при впадении в Обь. Отложения четвертичной системы заполняют сплошным чехлом междуречья и речные долины в нижнем течении р. Томи, а там, где палеозойские и мезозойские породы выходят на поверхность, их мощность значительно сокращается.

В целом для участка реки Томи в Томской области выявлена следующая особенность – русло в основном притянуто к правому борту долины, а его переход к левому борту долины (у сел. Курлек, Кафтанчиково, Тахтамышево, Козюлино) связан с резкими поворотами русла ( $90^{\circ}$  и более) при встрече с трудно размываемыми породами. Имея в виду транспорт наносов и уклоны водной поверхности, участок р. Томи можно разделить на два: 1) от границы с Кемеровской областью до Лагерного сада в г. Томске, где наблюдается равновесие размыва и отложения наносов с уклонами при  $Q=2420 \text{ м}^3/\text{с}$  0,2-0,3 м/км, и лишь на участках больших карьерных полей происходит аккумуляция наносов, и 2) ниже Лагерного сада до впадения в р.Обь где происходит необратимая аккумуляция донных наносов, усугубляющаяся в результате выемки большого количества аллювиального материала, и пониженные на порядок уклоны – 0,01-0,04 м/км. Участки сужений долины и выходов трудно размываемых пород определены как морфологически подобные, и здесь же расположены контролирующие перекаты – это участки у сел Ярское, Коларово и у Лагерного сада в Томске.

Оценивая морфологию нижнего течения р.Томи, можно выделить по ее длине несколько участков с различными типами руслового процесса. Описание типов руслового процесса здесь проведено специалистами ГГИ на основании изысканий 1983 г., а также В.А. Льготиным (1987). В данной диссертационной работе автором детализированы и уточнены границы участков и наблюдающиеся на них типы руслового процесса, а также выявлены факторы существования этих типов (табл. 1).

Таблица 1

Выделение участков русла р.Томи  
с разными типами руслового процесса

Километры по судовому ходу	ГГИ, 1985	В.А. Льготин, 1987	Автор, 2004
110–130	Ограниченное меандрирование, осередковый тип	Крупная сундучная излучина в стадии роста	Ограниченное меандрирование с элементами незавершенного, осередковый тип (112-116 км)
94–109	Пойменная многорукавность с элементами незавершенного меандрирования	Извилисто разветвленное русло. Ярко выраженных излучин не наблюдается. В районе г.Томска в русле реки масса песчаных островов и осередков	Пойменная многорукавность с элементами незавершенного меандрирования, отдельные протоки развиваются по схеме свободного и ограниченного меандрирования
81–94	Пойменная многорукавность с элементами незавершенного меандрирования	различных размеров	Пойменная многорукавность, адаптированные излучины
74–81	Незавершенное меандрирование		Ограниченное меандрирование, адаптированные излучины
69–74	Незавершенное меандрирование		Русловая многорукавность, необратимая аккумуляция наносов вблизи общего или местного базиса эрозии
60–69	Незавершенное меандрирование и русловая многорукавность	Русловая многорукавность. Русло разветвленно-извилистое и сопряженно-разветвленное	Пойменная и русловая многорукавность
45–60	Вынужденный изгиб		Незавершенное меандрирование
24–45	Крупные осередки		Пойменная многорукавность, в отдельных протоках
18–24	Свободное меандрирование		вынужденные излучины
0–18	Вынужденный изгиб		

Из данной таблицы следует, что на протяжении р.Томи в Томской обл. существуют участки, полностью или частично совпадающие по разделению ГГИ, А.В.Льготина и автора, а также полностью не совпадающие. Несовпадение связано с тем, что в типизации ГГИ недостаточно внимания уделяется формам проявления

разветвленных русел и учету ограничивающих факторов. А.В. Льготиним за основу взята типизация Р.С. Чалова, классификации же ГГИ внимания уделено мало. В связи с этим при описании многорукавных русел в условиях существования ограничивающих факторов возникает необходимость дополнения типизации ГГИ элементами типизаций других авторов, например, Р.С. Чалова (1979) – дополнение ограниченного меандрирования вынужденными и адаптированными излучинами и И.Ф. Карасева (1975) – необратимой аккумуляцией донных наносов вблизи общего или местного базиса эрозии.

**2. В состав методики оценки многолетнего влияния русловых карьеров ПГМ на вертикальные деформации многорукавных русел и гидравлику потока должны входить: 1) многолетний анализ колебаний экстремальных уровней воды; 2) сравнение положений кривой связи расходов и уровней; 3) сопоставление поперечных и продольных профилей и кривых свободной поверхности; 4) анализ гидравлических характеристик потока; 5) сравнение распределения стока по протокам.**

Добыча ПГМ из русловых карьеров является одним из самых заметных видов антропогенной нагрузки, которой подвергаются речные русла в течение последних нескольких десятилетий. Тем не менее, до сих пор не существует нормативного документа, где были бы приведены научно обоснованные экологические нормы и требования к добыче ПГМ на водоемах ввиду сложности и недостаточной изученности проблемы. Предлагаемые в различных руководствах и рекомендациях способы оценки влияния карьеров на режим потока и русла могут быть применены, в основном, только для одиночных карьеров в однорукавных руслах.

Чаще всего посадка уровней определяется по многолетним графикам хода экстремальных (максимальных и минимальных уровней). При этом, однако, можно получить неоднозначные выводы о тенденции процесса, на основе неверно выбранной функции аппроксимации.

В районе Томска уровни воды в реке измеряются на двух постах Росгидромета: первый (Томск-гидроствор) расположен на правом берегу реки в 2 км выше коммунального моста; второй (Томск-пристань) – в районе пассажирской пристани на правом берегу реки в городе, в 0,6 км ниже впадения р. Ушайки. На первом посту наблюдения уровней ведутся с 1964, а на втором – с 1918 г. Расстояние между постами 7 км.

Минимальные уровни воды в период открытого русла (летне-осенняя межень) изменяются следующим образом (см. рис. 2):

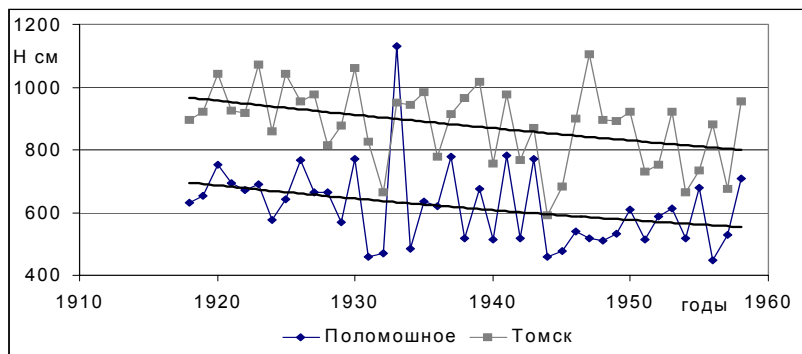
- 1) до середины 1960-х гг. – ежегодные уровни колебались относительно устойчивого среднееголетнего значения и не испытывали однонаправленных изменений;
- 2) с середины 1960-х до начала 1980-х гг. – наблюдается резкое уменьшение уровней приблизительно на 2,5 м, что связано с добычей гравия в русле Томи в районе г.Томска, наибольшая "просадка" уровня наблюдается для водпоста Томск-пристань – 2,5 м (водность реки за это время практически не изменилась);
- 3) на посту Томск-гидроствор уровни понизились на 2 м с начала наблюдений на этом посту;
- 4) с начала 1980-х годов – в результате сокращения объемов добычи гравия ниже г.Томска "просадка" уровней воды прекратилась, и можно отметить некоторую их стабилизацию.



Рис. 2. Изменения минимальных уровней воды на водомерных постах у г.Томска (над «0» соответствующего поста)

Максимальные уровни р.Томи у г.Томска с 1918 г уменьшились в среднем на 3,4 м. Для сравнения – максимальные уровни воды р.Томи у с.Поломошного, расположенного приблизительно в 100 км выше по течению от г. Томска также, приблизительно с середины 1920-х годов, понизились примерно на 1,2 м. Очевидно, что снижение максимальных уровней воды на 1,5 м до начала 1960-х годов не связано с посадкой уровней от влияния выемки гравия, т.к. объемы добычи не превышали годовой сток донных наносов. В этом можно убедиться, построив совмещенный график хода максимальных уровней по водомерным постам Томск-пристань и Поломошное за период до начала активной добычи ПГМ (рис. 3). Здесь по падению линии тренда можно определить посадку уровней на обоих постах порядка 1,5 м. Продолжающееся падение максимальных уровней после 1960 г. на 1,9 м совпадает по времени с периодом активной разработки русловых месторождений

песчано-гравийной смеси у г. Томска. При этом максимальные уровни на водпосту Поломошное, где ПГМ из



русла не добывались, снизились только на 0,8 м.

Рис. 3. Совмещенный график хода максимальных уровней на водомерных постах Томск-пристань и Поломошное

Задачу определения величины посадки уровней можно также решить на основе совместного построения кривых связи расходов и уровней  $Q=f(H)$  за период воздействия на русло реки (рис. 4).

По графику на рис. 4 можно определить, что за 35 летний период произошло снижение уровней на 1,0 м в диапазоне расходов 4000-6000 м<sup>3</sup>/с, которые наблюдаются ежегодно, и на 1,1 м в диапазоне расходов 7000-9000 м<sup>3</sup>/с, которые имеют повторяемость 70%. Увеличение посадки при высоких расходах половодья, по-видимому, связано со снижением частоты выхода высоких вод на пойму. В нижней части кривой  $Q=f(H)$  за эти же годы можно наблюдать следующую картину: 1) при расходах летне-осенней межени 400 м<sup>3</sup>/с посадка уровней составляет 1,8 м (посадка, определенная по хронологическому графику минимальных уровней, составила 1,9 м); 2) при дальнейшем увеличении расходов уровня такова: при  $Q=800$  м<sup>3</sup>/с – 1,4 м, при  $Q=1200$  м<sup>3</sup>/с – 1,3 м, при  $Q=1600$  м<sup>3</sup>/с – 1,2 м. Также можно определить, что в период с 1985 г. интенсивность посадки уровней минимальна, что, скорее всего, связано с прекращением добычи гравия из карьеров ниже и в черте г. Томска.

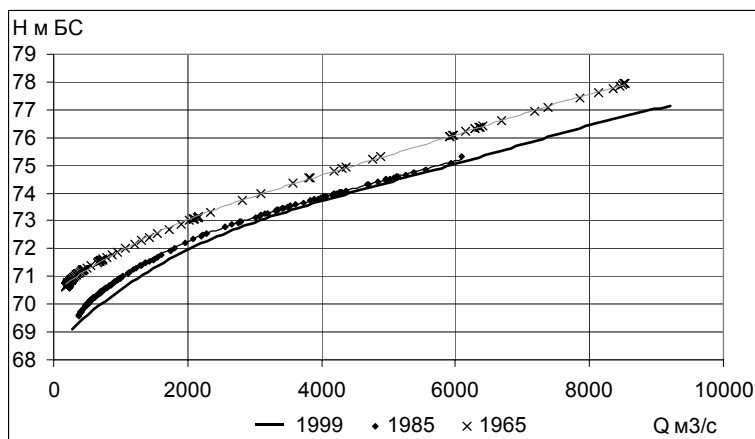


Рис. 4. Положение кривой  $Q=f(H)$  на водпосту Томск-гидроствор

На основе анализа гидравлических характеристик потока, определенных при измерении расходов воды на водомерном посту Томск-гидроствор за разные годы при различных уровнях воды (см. табл. 2), автором выявлены следующие особенности:

- 1) при уровне около 0 за последние 30 лет произошло увеличение расхода практически вдвое, а средние скорости воды возросли на 75 %;
- 2) на фоне значительного увеличения меженных расходов воды (50-35 %) площади поперечного сечения увеличились на небольшую величину – 11%, в период половодья при увеличении расходов на 8-11 % площади поперечного сечения уменьшились на 9-13 %, средняя глубина увеличилась на 21 %, а ширина уменьшилась на 9 %;
- 3) максимальные глубины за этот же период уменьшились на 0,19 м, что соответствует повышению отметок тальвега на 0,15 м.

Таблица 2  
Изменение гидравлических характеристик  
р.Томи в/п Томск-гидроствор за период с 1973 по 2002 гг.

Н ср, см	$\Delta Q$ , %	$\Delta W$ , %	$\Delta V$ ср. %	$\Delta B$ , %	$\Delta h$ , %	Изменение нижней отметки дна, м
3	+93	+11	+75	-9	+21	+0,15
118	+52	+4	+46	-15	+9	+0,22
193	+29	+9	+19	-22	+38	+0,10
426	+12	-13	+27	-23	+16	+0,04
505	+8	-7	+17	-23	+20	-0,28

По данным таблицы можно сделать вывод о том, что наибольшие изменения расходов и скоростей течения произошли при низких уровнях, а при повышении уровня изменения менее заметны. Слабое изменение отметок дна в совокупности с увеличением скоростей течения и расходов при неизменных уровнях позволяют сделать вывод о том, что посадка уровней на водомерном посту Томск-гидроствор связана со врезом русла не на данном участке, а ниже по течению, который был приостановлен выходами неразмываемых пород у Лагерного сада, на самом посту снижение уровней связано с повышением уклонов на данном участке.

При определении посадки уровней, вызванной карьерами ПГМ на протяженном участке, при отсутствии постов с длительными рядами наблюдений необходим анализ положения продольного профиля и кривой свободной поверхности (КСП). Автором проанализирован участок р.Томи от г. Томска до границы с Кемеровской областью и выявлены области влияния карьеров на рельеф дна и КСП на всем участке в различные периоды, охваченные эпизодическими изысканиями. На рис. 5 представлены продольные профили русла р.Томи от 70 до 82 км от устья и КСП при расходе воды 250 м<sup>3</sup>/с на водомерном посту г.Томск-гидроствор (74,7 км от устья).

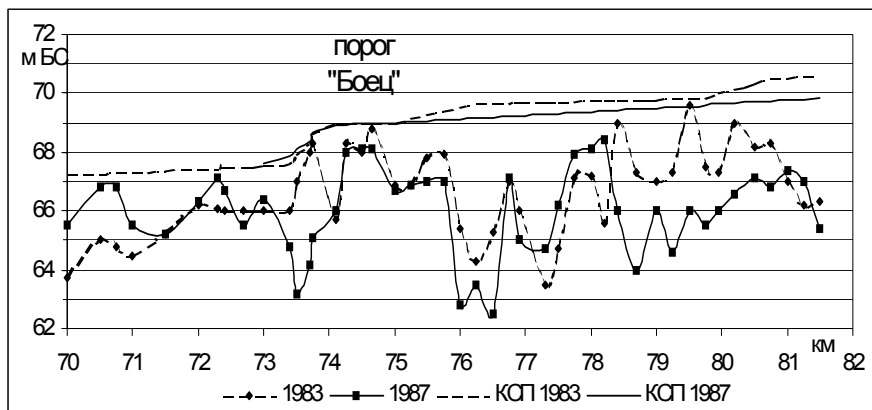


Рис.5. Изменения кривой свободной поверхности и продольного профиля р.Томь по оси судового хода

По совмещенным профилям дна и КСП можно судить о деформации русла за период между съемками а также о распространении влияния карьеров вниз и вверх по течению. При совмещении трех и более разновременных профилей можно судить о тенденции изменения скорости посадки уровней и деформаций русла.

Как было указано выше, данный участок р. Томи характеризуется, в основном, развитием руслового процесса по типу пойменной многоорукавности. Карьеры ПГМ на участках разветвленных русел были расположены неравномерно по рукавам. Это обстоятельство обусловило перераспределение стока в те протоки, расположение карьеров в которых было приурочено к их верхним частям. Так, например, на участке разветвления реки в районе с.Вершинино на три протоки: основное русло, Светлая и Калтайская отмечаются устойчивые тенденции уменьшения стока проток Светлая и Калтайская в период интенсивной добычи НСМ из их русел до 1996 г., причина этому видится в разработке в основном русле двух карьеров – ниже с.Казанка (в середине протоки) и в 1 км ниже верхнего устья Светлой протоки, в то время как добыча в пр.Светлая и Калтайская была сосредоточена именно в нижних их частях. Сток в пр.Калтайской в период низкой водности (повторяемость ниже 50 % ежедневных уровней периода открытого русла) прекратился вообще в связи посадкой русла протоки Светлой в месте соединения с Калтайской протокой. Как видно из табл. 3, меженный сток этой протоки обеспечивался оттоком из пр.Светлой. Некоторое восстановление баланса между пр.Светлой и основным руслом в период низкой водности объясняется увеличением стока по соединяющей их протоке, углубленной в 1996-1999 гг.

Таблица 3

Распределение расходов по основным протокам  
на 97 км по лоцманской карте 1990 г.

Год	Основное русло		Пр.Светлая		Пр.Калтайская	
	Q м <sup>3</sup> /с	%	Q м <sup>3</sup> /с	%	Q м <sup>3</sup> /с	%
Расходы половодья						
1984	2100	42	2130	43	750	15
1998	2525	46	1945	35	1030	18
2001	2400	48	1800	36	800	16
Среднегодовые расходы						
1984	500	52	310	32	160	16
1998	600	67	300	33	-	
2001	575	62	348	38	-	
Меженные расходы						
1984	160	57	79	28	42	15
1998	235	78	65	22	-	
2001	336	70	142	30	-	

Таким образом, все вышеотмеченные способы объединены автором и вместе образуют достаточно целостную методику, использование которой для определения воздействия русловых карьеров ПГМ на деформации русла и изменения гидравлических характеристик потока на многорукавных участках позволяет наиболее точно определить масштабы воздействия и причины изменений тех или иных характеристик, что может быть использовано при оценке воздействия намечаемых антропогенных воздействий в системе русло-поток.

### 3. Использование одномерных компьютерных моделей для прогноза воздействия русловых карьеров ПГМ на гидравлический режим рек является результативным и дает достаточно точные результаты.

При проектировании русловых карьеров ПГС и оценки их воздействия на окружающую среду возникают задачи, связанные с изменением гидравлических характеристик потока, русловыми деформациями и транспортом наносов: 1) расчет изменения кривой свободной поверхности; 2) расчет деформаций русла выше и ниже карьера; 3) расчет занесения карьера наносами; 4) для разветвленных русел – оценка перераспределения стока и прогноз ускорения естественных процессов развития и отмирания проток. Эти характеристики необходимо оценивать на несколько лет или десятилетий вперед, и количественно они могут быть определены с использованием моделирования.

Очевидно, что наиболее полно гидравлические процессы могли бы быть описаны физической моделью размываемого русла, включающей также решение задачи транспорта наносов. Однако организация таких моделей весьма трудоемка и требует значительных материальных затрат. На основе физического моделирования задача получения реалистичных прогнозов решается надежно лишь в том случае, если есть уверенность, что явления в натуре и на модели подобны. Тем не менее, до сих пор не преодолены разногласия о принципах даже геометрического подобия – для некоторых случаев допускается и даже рекомендуется искажение линейных масштабов. Из-за малого диаметра донных наносов в равнинных реках требование равенства геометрических масштабов модели и донных наносов также выполнить не всегда удается.

Суть математического моделирования физических, в частности гидравлических, процессов заключается в описании их с помощью системы уравнений, называемых математической моделью процесса, и исследования зависимостей их решений от изменения исходных параметров. Благодаря огромному быстродействию современных ЭВМ при наличии составленных программ по расчету КСП можно решить эти задачи в считанные секунды, гораздо больше времени уходит на подготовку исходных данных и анализ полученной информации.

Следует отметить, что многие отечественные программы остаются весьма дорогостоящими и требуют постоянного участия разработчика программного обеспечения в процессе компьютерной имитации участков русла и русловых сетей.

Обеспечивая решение перечисленных выше задач, программа для ПЭВМ, реализующая модель русла и потока, должна быть как минимум применима к значительным по протяженности и сложности конфигурации участкам русловой сети, реализуемой на персональных компьютерах несложной конфигурации, а также доступной в обращении и для обучения выполняющего расчеты персонала.

Более полно русловые деформации и движение наносов можно описать двух- и трехмерными моделями размываемого русла, но их использование ограничено нехваткой адекватной информации, основанной на многочисленных и точных полевых измерениях. В диссертации обосновано, что в случае создания карьеров в многорукавном русле перечисленным требованиям, а также решению поставленных выше задач отвечают одномерные модели, разработанные Корпусом гражданских инженеров армии США – Hydrologyc Engineering

Centre (HEC). Преимущества моделей HEC – в том, что их применение относительно дешево, а сами модели позволяют рассматривать процессы не фрагментарно, а в единой системе.

Принципиальная схема моделирования с помощью компьютерных программ HEC-RAS и HEC-6, принятая в качестве рабочей, показана на рис.6. Она отражает основные этапы моделирования и решаемые при этом конкретные задачи.

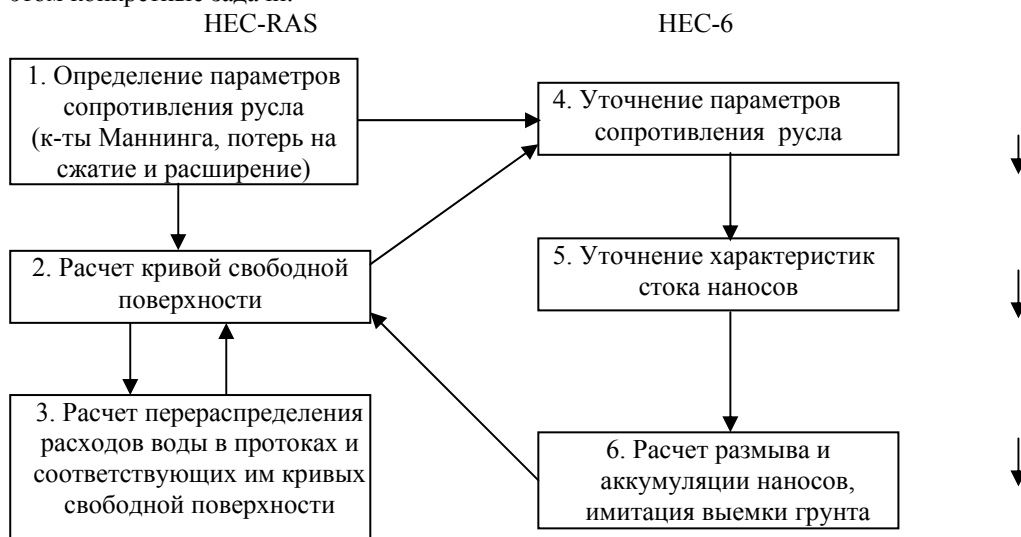


Рис.6. Принципиальная схема моделирования

Профили водной поверхности от нижнего поперечного сечения к верхнему вычисляются методом конечных разностей с использованием решения одномерного уравнения энергии, известного как уравнение Бернулли. При этом HEC-RAS используется для создания «мгновенных снимков» гидравлического состояния потоков при фиксированных расходах воды и подбора распределения стока между главным руслом и протоками.

Расчет наносов и русловых деформаций осуществляется программой HEC-6. Она реализует одномерную численную модель течения в открытом русле с подвижными границами, созданную для того, чтобы моделировать и предсказывать изменения профилей реки, происходящие в результате размыва и (или) отложения наносов в течение периодов времени, обычно составляющих несколько лет. Расчет продольных профилей выполняется подобно программе HEC-RAS. Затем вычисляется транспортирующая способность потока для каждого поперечного сечения. Её значения, в сочетании с продолжительностями стояния расходов, позволяют в объемном виде оценить размыв и отложение наносов на каждом участке, и соответственно корректируется поперечное сечение. Расчеты продолжаются с другим расходом в последовательности (согласно заданному ступенчатому гидрографу стока) и цикл повторяется, начинаясь с обновленной геометрии русла. Расчеты переотложения наносов осуществляются по фракциям с разным размером зерен, тем самым позволяя моделировать гидравлическую сортировку и отложение. Возможности HEC-6 также включают учет руслоглубительных работ и влияния различных береговых и других воздействий. При этом используется несколько формул вычисления расхода наносов.

В первую очередь производится калибровка модели современного состояния реки. При этом подбираются и уточняются коэффициенты шероховатости, определенные по материалам полевых наблюдений, а также уточняется распределение расхода воды по протокам.

На втором этапе моделирования сравнивается влияние на гидравлические характеристики предлагаемых проектировщиком вариантов расположения и размеров карьеров ПГМ без учета заполнения карьеров наносами, с использованием программы HEC-RAS. На основе полученных результатов выбирается вариант, обеспечивающий максимум эколого-экономической эффективности отработки месторождения.

На третьем этапе для решения задач землечерпания и определения деформаций русла в результате землечерпания используется программа HEC-6. Существенным ограничением имеющейся в распоряжении автора версии программы является то, что она не может, в отличие от модели HEC-RAS для недеформируемого русла, обходить участки речной сети сложной конфигурации, в частности, петлеобразные участки и разветвления потоков. Расчет расходов донных наносов во входном поперечном сечении потока выполнялся по вертикалям по формуле В.Н. Гончарова (1962) для отдельных фракций.

После расчета деформаций в программе HEC-6 за 1 расчетный год новые геометрические данные передаются в программу HEC-RAS для уточнения изменения распределения стока воды по протокам и получения новых гидравлических характеристик потока. После чего расчет повторяется на период времени отработки карьеров и выбранный восстановительный период после отработки месторождения.

Выполненные расчеты позволяют представить целостный сценарий происходящих в естественном состоянии изменений на рассматриваемом участке и тех изменений, которые произойдут в результате добычи ПГМ карьерным способом по выбранному варианту, наиболее приемлемому с эколого-экономических позиций.

В связи с тем, что некоторые выводы о степени влияния карьеров на изменения гидравлических характеристик основаны на качественных оценках и, кроме того, не исключены катастрофические последствия (например, при прохождении исключительно высоких расходов воды) для корректировки технологии производства работ при выполнении долгосрочных проектов необходимо производить экологический и гидрологический мониторинг, включающий в себя следующее:

1. Вести наблюдения за плановыми деформациями берегов на участках расположения карьеров.
2. Вслед за отработкой участков карьера производить подробные съемки рельефа дна в межень и после прохождения последующего половодья – для анализа деформаций и стока влекомых наносов.
3. В связи с тем, что слабее всего модель обеспечена фактическими данными о расходах влекомых наносов, определять сток влекомых наносов на нетронутых участках выше карьеров.
4. Проводить наблюдение за изменением уклона водной поверхности во все фазы водного режима.
5. Более подробно осветить кривые связи расходов и уровней по протокам и распределение расходов воды между ними.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Значительная антропогенная нагрузка на русло р.Томи в виде изъятия большого количества аллювиального материала привела к некомпенсируемым в течение нескольких столетий деформациям как русла реки, так и гидравлических характеристик потока: режима уровней воды, уклонов свободной поверхности, скоростей течения и т.д.

2. На протяжении р.Томи в Томской области существуют участки, полностью или частично совпадающие по разделению ГТИ и автора, и участки, полностью не совпадающие. В связи с этим, при описании многорукавных русел в условиях существования ограничивающих факторов возникает необходимость ее дополнения, учитывая типизации других авторов, например, Р.С. Чалова (1979) – дополнение ограниченного меандрирования вынужденными и адаптированными излучинами и И.Ф. Карасева (1975) – необратимая аккумуляция донных наносов вблизи общего или местного базиса эрозии.

3. Посадка уровней на некоторых участках не всегда обусловлена врезом русла на этом же участке: когда продвижению попятной эрозии мешают трудно размываемые породы, посадка уровня возникает за счет изменения гидравлических характеристик – увеличения скоростей воды.

4. Увеличение транспортирующей способности в районе Лагерного сада в связи с посадкой уровней ниже по течению, совместно с дефицитом донных наносов, обусловленным осажением их в вышележащих русловых карьерах, может привести к ускорению темпов плановых деформаций, и уже потребовало укрепления берегов выше и ниже коммунального моста и ограждающей дамбы в г. Томске.

5. Исследование величины воздействия антропогенного вмешательства в естественные процессы в руслах многорукавных рек должно включать следующий комплекс способов исследований гидрологических, гидравлических и морфометрических характеристик за многолетний период: 1) анализ графиков хода экстремальных уровней в месте воздействия, а также выше и ниже по течению; 2) анализ кривых связи расходов и уровней; 3) сопоставление поперечных и продольных профилей русла реки, а также кривых свободной поверхности; 4) распределение стока по протокам.

6. Выявление воздействий проектируемых карьеров ПГМ более оперативно и экономически целесообразно с применением компьютерного моделирования на основе программ, подобных программам серии НЕС. Такое моделирование на порядок дешевле физического и позволяет определить максимальный набор гидравлических характеристик потока, проигрывая всевозможные варианты мест расположения и объемов добычи ПГМ, и выбрать наиболее экономически и экологически эффективный.

7. Недостаток данных по стоку донных наносов необходимо компенсировать натурными измерениями с использованием батометров с более тщательной проверкой формул для подсчета расхода донных наносов

**Направления дальнейших исследований** будут сосредоточены на уточнения влияния карьерных разработок на перераспределение стока в разветвленных руслах, отработку методики измерения и расчета стока влекомых наносов р.Томи на нарушенных и ненарушенных участках, установлении критериальных зависимостей типов руслового процесса и уточнении типизации на Сибирских реках.

### Список публикаций по теме диссертации:

1. Лещенко П.Н., Вершинин Д.А., Малевич В.Г. Проблемы экологии при добыче ПГС в пределах речных комплексов (методы наблюдения и контроля) // Мат. науч. практ. конф. посвященной 40-летию кафедры гидрологии Томского государственного университета, Томск, ТГУ, 1997. С. 40-41.

2. Вершинин Д.А. Влияние добычи ПГС на русловый режим р. Томь у г.Томска // II областная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Тез. докл. – Томск, 1998. С.48-49.

3. Земцов В.А., Лещенко П.Н., Вершинин Д.А. Опыт компьютерного моделирования русловых процессов при проектировании карьеров ПГС на р.Томи // XIV пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов: Тез. докл. – Уфа, 1999. С. 125-126.

4. Вершинин Д.А. Использование водолазного труда при исследованиях донных наносов в руслах рек. // Тр. межд. науч. прак. конф. “Экологические, гуманитарные и спортивные аспекты подводной деятельности” 10-11 сентября 1999 г. – Томск, 1999. С.78-79.
5. Земцов В.А., Инишев Н.Г., Лещенко П.Н., Вершинин Д.А., Гарагатая Ю.С. Опыт использования компьютерного моделирования при составлении раздела ОВОС проекта карьеров ПГС // Тр. 5 конф. “Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей”. – М., 1999. С. 282-285.
6. Земцов В.А., Крутовский А.О., Льготин В.А., Егоров Б.А., Вершинин Д.А. Оценка деформаций берегов на крупных реках западной Сибири // XV пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов: Тез. докл. – Волгоград, 2000. С.95-96.
7. Земцов В.А., Вершинин Д.А., Инишев Н.Г. Добыча нерудных строительных материалов в русле и пойме Томи и проблема оценки воздействия на окружающую среду // Экология пойм сибирских рек и Арктики. Тр. II совещания. – Томск, 2000. С. 267–273.
8. Крутовский А.О., Льготин В.А., Егоров Б.А., Вершинин Д.А. Исследование эрозионной деятельности р.Чулым у с. Зырянское // “III века горно-геологической службы России”: Тез. докл. рег. науч. конф. геологов Сибири, Дальнего Востока и северо-востока Сибири 18-23 сентября 2000. – Томск, 2000. Т. 2. С. 214-215.
9. Вершинин Д.А., Копысов С.Г., Лещенко П.Н. Результаты исследования расходов влекомых наносов для рек с гравийным руслом (на примере р.Томи). // Вестн. ТГУ. – 2001. – Т. 274. С.114-117.
10. Состояние поверхностных водных объектов, водохозяйственных систем и сооружений на территории Томской области в 2001 г: Информационный бюллетень / О.Г.Савичев, Б.А.Егоров..., Д.А.Вершинин и др.; под ред. А.В.Льготина. – Изд-во Территориального центра Томскгеомониторинг, 2002. – 70 с.
11. Земцов В.А., Вершинин Д.А., Инишев Н.Г., Лещенко П.Н., Нарожный Ю.К. Добыча гравия в русле Томи: уроки и возможности // Томское отделение СНИИГГиМС: 30 лет на службе Томской геологии: Сборник научных трудов / Под ред. В.Е.Пешкова, Н.Л.Падалко. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2002. С.222-225.
12. Состояние поверхностных водных объектов, водохозяйственных систем и сооружений на территории Томской области в 2002 г: Информационный бюллетень / О.Г.Савичев, Б.А.Егоров..., Д.А.Вершинин и др.; под ред. А.В.Льготина. – Изд-во Территориального центра Томскгеомониторинг, 2003. – 84 с.
13. Вершинин Д.А. Изменения гидравлики и режима деформаций русла реки Томи под влиянием антропогенной нагрузки // Вест. Том. гос. ун-та. Прилож. № 3 (IV).– Томск, 2003. С. 126-128.
14. 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: Изд-во Алт. ун-та, 2003. С. 97-102.
15. Крутовский А.О., Льготин В.А., Егоров Б.А., Четвергов Д.Н., Краснощеков С.Ю., Вершинин Д.А. Усиление геоэкологической напряженности в г.Томске как следствие процесса самовосстановления дна русла Томи // Самоорганизация и динамика геоморфосистем: Мат. XXVII Пленума Геоморфологической комиссии РАН 25.08-02.09.2003. – Томск, Изд-во ИОА СО РАН. 2003. С.297-298.
16. Вершинин Д.А. Практические исследования влекомых наносов для рек с гравийным руслом (на примере р.Томи) // Тр. 3 межд. науч. прак. конф “Экологические, гуманитарные и спортивные аспекты подводной деятельности” 21-23 октября 2004 г. – Томск, 2004. С.91-98