

Министерство природных ресурсов и экологии РФ
Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу
окружающей среды

ФГБУ «СИБИРСКИЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»
(ФГБУ «СибНИГМИ»)

УДК 551.513

№ госрегистрации 01201180381

Инв. №

УТВЕРЖДАЮ:
Директор института, д.ф.-м.н.
В.Н. Крупчатников
« 31 » _____ 2013 г.



ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Разработать методы расчета пространственной структуры течений в
водоемах и водотоках с помощью математического моделирования на основе
плановых уравнений Сен-Венана для целей мониторинга качества воды
(на примере отдельных участков р.Обь)

(заключительный)

Шифр темы 1.1.8.11

Руководитель темы, д.ф.-м.н



В.А.Шлычков

Новосибирск, 2013

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, д.ф.-м.н

В.А.Шлычков

Исполнители:

Ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н

В.М.Мальбахов

Старший научный сотрудник, к.ф.-м.н

А.А.Леженин

В работе принимали участие:

Нормоконтролер

Т. П. Панькова

РЕФЕРАТ

Отчет 32 с., 3 табл., 8 илл., 8 источников.

Ключевые слова: численное моделирование, водный поток, конечно-разностная схема, перенос и диффузия загрязняющих примесей в естественных водотоках.

Сформулирована численная модель стоковых течений и переноса наносов для Новосибирского водохранилища и участка р. Обь в нижнем бьефе. Выполнен анализ морфометрической информации и построены расчетные области. Построены криволинейные конечно-разностные сетки для аппроксимации плановых уравнений Сен-Венана, выполнена адаптация сеток к геометрии водного зеркала со сгущением узлов вдоль главного водотока. Модель настроена на параметры донного рельефа водоема. Разработана оригинальная численная схема для расчета гидродинамического режима водных объектов сложной плановой геометрии.

Проведены тестирующие расчеты по воспроизведению скоростного режима на основе численной модели. Сопоставление теоретических результатов с данными измерений на Новосибирском водохранилище, проведенных в июле 2009 г., показало, что гидродинамическая модель в целом правильно описывает расходно-уровенную структуру потока и дает приемлемое качество расчетов. Дан пример расчета миграции примеси при аварийном сбросе загрязнителя в водоем.

Гидродинамический и экологический блок модели позволяет получать относительные оценки вклада отдельных сбросов или групп источников водотока.

Изложенные методика и конструкция модели прогноза являются в известной степени универсальными, и в формально-постановочной части не связаны жестко с конкретным положением расчетного речного участка.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Общая геоморфологическая и гидрологическая характеристика реки.....	8
2 Проблема рассеивающих выпусков в нижнем бьефе	15
3 Гидродинамическая модель..... Новосибирского водохранилища	18
4 Гидродинамическая модель участка р.Обь..... под Новосибирском.....	28
Заключение.....	31
Список использованных источников.....	32

ВВЕДЕНИЕ

С развитием вычислительной техники и численных методов решения задач гидравлики водотоков широкие возможности для анализа и прогноза динамики водных систем открывает математическое моделирование. Гидродинамические модели предназначены для расчета пространственно-временной динамики течений, расходов, уровней, распределения температуры, характеристик турбулентности, геометрии свободной поверхности, концентрации примеси, русловой деформации и др. В основу моделей положены фундаментальные законы механики жидкости, обеспечивающие возможность получения надежных количественных оценок.

В современных условиях создание математической модели исследуемого водного объекта стало обязательным в развитых странах. Состав и структура модели определяются потребностями практики и конкретными задачами. Численное моделирование подразумевает использование современного программного обеспечения и парка персональных ЭВМ с целью расчета структуры течения и на основе фундаментальных физико-математических подходов. При этом компьютерная модель является инструментом интеграции разнородной натурной информации в единую концептуально сбалансированную систему знаний, средством регулирования и прогнозирования качества воды при заданных природных и техногенных сценариях внешнего воздействия, обеспечивает разработку аналитических и экспертных оценок, ориентированных на эффективность управленческих решений.

Центральным компонентом модельного ряда должен быть гидрологический блок. Успешность решения конечных прикладных задач прямо связана с качеством воспроизведения водообмена. Вместе с тем, надежно верифицированной гидродинамической модели р.Обь в районе г.Новосибирска а также Новосибирского водохранилища с возможностью детализации пространственной структуры потока до настоящего времени не создано.

Цель настоящей работы - сформулировать систему базовых гидродинамических моделей для описания внутриводоемных процессов в Новосибирском водохранилище и отдельных участков р.Обь, рассмотреть методику численной реализации, провести калибровку параметров и верификацию алгоритмов по натурным данным.

Математическое описание гидродинамических и русловых процессов рек со сложной пространственной геометрией относится к сложнейшим задачам механики сплошных сред [Васильев, 1999]. Сложность численных моделей обусловлена рядом причин и обстоятельств, среди которых можно отметить:

- нелинейность основных уравнений гидродинамики;
- наличие свободных границ в виде береговых линий с заранее неизвестной пространственной конфигурацией;
- турбулентным характером движения речных потоков;
- необходимость привлечения большого объема экспериментальных данных о рельефе русла и пойм, физико-механических характеристиках донного материала;
- созданием сложных алгоритмов обработки данных и оптимизации, средств отображения результатов численного экспериментирования.

Под компьютерной моделью следует понимать систему уравнений, отражающих законы сохранения или их аналоги, численную схему и метод дискретизации, а также натурную информацию, необходимую для адаптации алгоритма под конкретный водный объект [Беликов и др., 2002]. Компьютерные модели участков русел ориентированы на воспроизведение кинематической структуры потока с учетом морфологических особенностей русла (наличие притоков, островов, протоков и т.п.).

Для того чтобы получить информационную модель любого реального объекта или процесса, необходимо рассмотреть его с системной точки зрения. Задача системного анализа упорядочить представления об изучаемом объекте для того, чтобы отразить их в информационной модели. Для гидрологической компьютерной модели обязательным является следующий порядок этапов перехода от реального объекта к информационной модели:

- формулирование цели исследования, выбор схематизации водного объекта;
- анализ естественно-природных факторов и гидравлических особенностей речного участка. Подбор исходных материалов, содержащих натурную гидрометрическую и морфометрическую информацию;
- математическая постановка задачи. Введение системы предположений, отражающих специфику конкретного водного объекта. Разработка методов дискретизации и численного решения систем уравнений;
- формирование цифровой модели рельефа (ЦМР) в узлах регулярной сетки с заданным пространственным разрешением;
- генерация криволинейной конечно-разностной сетки с учетом геометрии области решения и требований к пространственной детализации, обеспечивающей нужную точность расчета;
- интерполяция ЦМР в узлы криволинейной сетки, батиметрический анализ поля глубин и ручная коррекция неверных значений матрицы глубин;
- формирование начальных полей и граничных условий для численной модели;

- исследование чувствительности модели, идентификация констант и функциональных зависимостей, калибровка параметров по фактической информации;
- проведение рабочих расчетов, анализ и интерпретация результатов;
- разработка средств управления программным пакетом с привязкой к координатно-картографической основе.

Целесообразность использования той или иной модели диктуется ее полнотой описания физических процессов и эффективностью применительно к решению изучаемой проблемы. К основным проблемам численного описания процессов в Новосибирском водохранилище относятся:

- прогнозирование морфодинамики берегов и расчет переноса наносов;
- обеспечение качества воды;
- аккумуляция загрязнителей в донных отложениях;
- маловодья и оптимальное использование водных ресурсов;
- эвтрофикация и климатическая устойчивость экосистем водохранилища;
- разработка систем управления и принятия решений.

Методика численного моделирования основана на решении двумерных (плановых) уравнений Сен-Венана.

1 Общая геоморфологическая и гидрологическая характеристика реки

Река Обь - одна из крупнейших воднотранспортных магистралей России, имеет большое народнохозяйственное значение, связывая Новосибирскую и Томскую области, а также Алтайский край с районами добычи нефти и газа на Обском Севере, обеспечивая перевозки грузов в малодоступные районы. Значительная часть Оби находится в ведении Обского государственного бассейнового управления водных путей и судоходства, которое обслуживает 7,5 тыс. км водных Путей, из них 5 тыс. км с гарантированными габаритами судового хода. Сюда входят верхнее и среднее течение Оби с Новосибирским водохранилищем, Бия, Катунь, Томь, Чулым, Кеть, Васюган, Парабель, Чузик и другие реки, относящиеся к классу малых. Изучаемый участок реки Оби расположен в пределах Колывань-Томской складчатой зоны, простирающейся на 36 км ниже принятых границ исследований до с.Батурино (827 км от слияния Бии и Катуни). Затем река Обь, вплоть до устья Томи, пересекает окраину Колпашевской впадины. На изучаемом участке в русле и на берегах (особенно на высоком правом, относительная высота которого достигает 100-170 м) широко распространены выходы коренных пород: песчаников, сланцев, алевролитов палеозойского времени, прорванных цепочкой гранитных интрузивных массивов. Выходы скальных, трудно размываемых коренных пород в значительной степени определяют особенности морфологии долины этого участка Оби. С местами, где к реке подходят гранитные массивы, связаны значительные сужения долины.

Между сужениями располагаются обширные расширения поймы, достигающие 15-20 км. Средняя Обь от Новосибирска до Батурино, характеризуется четко выраженным рисунком в плане. Изгибы долины здесь в основном связаны с огибанием рекой отдельных гранитных массивов: так, в районе с. Почта она огибает выступ Барлакского массива, у с. Дубровино поворот связан с Дубровинским массивом. От с.Батурино до устья Томи долина снова сильно расширяется (ниже Батуринского массива), но затем постепенно сужается. Новое резкое расширение долины проходит уже ниже устья р. Томи.

Поверхность Приобского плато возвышается над днищем долины средней Оби на 40-60 м. На участке Новосибирская ГЭС - с. Батурино в отложениях плато преобладают пески с прослоями супеси и суглинков, подстилаемые коренными скальными породами, а на участке с. Батурино - устье Томи в отложениях плато чередуются глинистые и песчаные слои, подстилаемые глинами.

На участке от Новосибирска до устья Томи средняя ширина поймы составляет 12,5 км. Односторонняя, преимущественно левобережная, пойма занимает здесь 70% от общей длины реки. По правому берегу большой массив поймы имеется только на участке Вороново - Кожевникове, протяженностью 40 км. Высота поймы 7-8 м. Преобладание разветвленного на рукава русла обуславливает формирование ложбинно-островной поймы. Отдельные участки гривисто-островной поймы приурочены к местам пересечения рекой дна долины от одного берега к другому, где река собирается в одном рукаве и образует серию излучин.

В составе поверхностного слоя донных грунтов преобладают песчаные наносы. Галька, гравий и каменистая отмостка встречаются там, где имеются местные источники поступления крупного материала в русло, и на участках интенсивной глубиной эрозии.

Закономерного изменения среднего диаметра вниз по течению Новосибирской ГЭС не наблюдается, что объясняется отсутствием тенденции уменьшения уклонов вниз по течению. Чередование сужений и расширений вызывает заметные колебания донных наносов. В сужениях, где ширина потока в период половодий не превышает период 2-3 км, в составе донных наносов преобладают крупнозернистые пески с примесью гравия. Средневзвешенный диаметр колеблется от 1,2 мм до 0,6 мм. В крупных пойменных расширениях преобладают мелко- и среднезернистые пески, со средневзвешенным диаметром 0,4-0,5 мм. В каждом крупном расширении прослеживается изменение обусловленное размывом берегов, а морфология русла (изгиб и разветвление на рукава) благоприятствует образованию перекатов.

Дноуглубительные работы, проводимые на перекатах в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС также играют немаловажную роль в изменении крупности руслового аллювия [Попов, 1969].

При разработке землечерпательных прорезей вскрываются залегающие в нижних слоях аллювия галька, гравий и крупнозернистые грунты, а отвалы крупного песка укладываются в виде выправительных сооружений. В среднем темпы приращения среднего диаметра аллювия в судоходных рукавах несколько выше, чем в несудоходных, за исключением тех случаев, когда укрупнение материала вызвано расположением отвалов грунта при землечерпании или местными особенностями геологии дна.

Размыв потоком гравийных отвалов обуславливает явление увеличения крупности руслового аллювия, причем степень увеличения среднего диаметра частиц грунта в несудоходных рукавах может превышать степень укрупнения среднего диаметра в судоходных в 2-2,5 раза.

Проведение эксплуатационных дноуглубительных работ способствует укрупнению руслового аллювия, приводит к увеличению степени стабильности русла [Чалов, 1999]. Посадка уровней, возникающая при разработке дноуглубительных прорезей на перекатах, исчисляется несколькими сантиметрами и выклинивается в вышележащий плесовой ложине, не распространяясь вверх по течению.

На местные изменения крупности наносов существенно влияют различные выправительные сооружения (дамбы, полузапруды и др.), как правило, армированные галькой и камнями. В районе пристаней и поселков берега часто укрепляются галечниковым материалом, который при выносе потоком в русло существенно увеличивает средний диаметр аллювия вблизи этих сооружений. крупности от начала расширения до его конца. Например, в Печерско-Дубровинском расширении средний диаметр сверху вниз изменяется от 0,68 до 0,47 мм.

Растекание потока по пойме приводит к уменьшению величины удельных формирующих расходов и отложению относительно мелкого материала.

Морфологические особенности самого русла определяют более частые изменения среднего диаметра наносов. На участках сравнительно однородного геологического строения долины и русла наблюдается четкая обратная связь средневзвешенного диаметра наносов со средней шириной русла в пределах пойменных бровок, что связано с тем, что руслоформирующие расходы проходят в бровках пойменных берегов.

На разветвленных участках русла состав наносов является показателем тенденции развития отдельных рукавов. Повышенная крупность наносов в одном из рукавов, по сравнению с другими, входящими в состав узла разветвления, свидетельствует о том, что в период половодья по нему проходит большая доля расхода воды. Наиболее многоводные рукава выстилаются и более крупным аллювием.

На состав донных отложений р. Оби выше Новосибирской ГЭС существенное влияние оказывает локальные источники пополнения руслового аллювия крупным материалом.

Искусственное регулирование стока Оби, способствующее развитию глубинной эрозии, существенно изменило состав донных отложений. На приплотинном участке уже в первые годы после ввода в эксплуатацию гидроузла имел место почти полный смыв аллювия и обнажение подстилающих его коренных пород и базальтовых галечников. Аллювий, представленный песками различной крупности, сохранился в периферийных частях русла возле пойменных берегов, а также в боковых рукавах. Песчано-гравийные отложения имеются также там, где в русло поступает достаточное количество материала,

обусловленное размывом берегов, а морфология русла (изгиб и разветвление на рукава) благоприятствует образованию перекатов.

По характеру водного режима река Обь относится к алтайскому типу, обнаруживающему черты Западно-Сибирского: растянутое весеннее - летнее половодье с двухнедельным гидрографом, повышенный летне-осенний сток и низкая зимняя межень.

Основное питание река Обь получает от таяния снегов и дождевых вод. Доля снегового питания составляет 50%, дождевого-20%, грунтового-16%, ледникового - 8%. Основной объем стока приходится на весенне-летний период -80%, на осенний период приходится 15-16%, зимнюю межень - 5-6%.

Норма годового стока реки Обь у г. Новосибирска составляет 1740 м³/с, среднемноголетний максимум стока 2250 м³/с (1939 г.), исторический максимум -15000 м³/с (1937 г.).

Режимы расходов и уровней нижнего бьефа Новосибирской ГЭС находятся в зависимости от характера питания реки Оби и регулирующего влияния ГЭС, которое определяется "Основными положениями правил использования водных ресурсов Новосибирского водохранилища на р. Обь" (1969 г.). Наблюдения за расходами и уровнями производятся на гидропостах, сведения о которых приведены в таблице 1.1.

По характеру регулирования Новосибирская ГЭС, введенная в эксплуатацию на полную мощность в 1959 году, относится к разряду гидроэлектростанций с сезонным регулированием стока.

Таблица 1 - Сведения о гидропостах, расположенных в черте г. Новосибирска

Наименование гидропоста	Расстояние от устья	Отметка нуля графика гидропоста, м	Повышение проектного уровня над нулем графика, м	Обеспеченность проектного уровня, %
Нижний бьеф	679,4	93,50*	0,00	80,21
		90,36**		
Новосибирск	700	91,26*	+0,80	91,41
		88,12**		

*- Б.С. - балтийская система высот;

** - Г.С. - городская система высот.

Перераспределение стока внутри года по створу г. Новосибирска под влиянием регулирования отражено в таблице 1.2. В средний по водности год зимняя межень (декабрь-март) оказывается повышенной на 40-120%, на подъеме половодья сток

уменьшается на 5-10%, на спаде на 35-40%, в остальную часть года (июнь-ноябрь) уменьшение стока по сравнению с естественным режимом составляет 10%.

Таблица 2 - Распределение стока реки Оби до и после регулирования

Период	Распределение стока по сезонам в %			
	зима	весна	лето	осень
До регулирования	6,0	55,0	23,0	16,0
После регулирования	9,2	48,6	24,2	18,0

В многоводные годы гидрограф сохраняет форму, близкую к естественной, в маловодные годы сток повышен в зимнюю межень на 65-180 %, в половодье и летнюю межень на 30-40%, а в период наибольших сбросов расходы воды близки к естественным.

Уровненный режим нижнего бьефа ГЭС характеризуется наличием периода весеннего половодья и зимней межени. Летняя межень практически отсутствует.

Минимальные летние и зимние уровни после зарегулирования стока повысились на 1 м. В годы средней по водности выход воды на пойму прекратился почти на всем стокилометровом участке.

Боковая приточность на участке от створа ГЭС до г. Новосибирска формируется за счет впадения р. Ини и составляет в среднем за год 2,5% от притока к створу ГЭС.

Уменьшение паводковых расходов сопровождается соответствующим снижением уровней в нижнем бьефе. По данным С. Г. Бейрона уровень весенне-летнего паводка после создания водохранилища снизился по сравнению с естественным у Новосибирска (23 км от плотины) в среднем на 0,8-1,5 м, у с. Крутикове (157 км от плотины) - на 0,6-1,2 м и у с. Мочаново (429 км от плотины) - на 0,4-1,0 м. В связи с этим затопление поймы стало наблюдаться только в многоводные годы.

Увеличение расходов воды зимней межени вызывало повышение максимального уровня у Новосибирска на 0,4-0,5 м. В результате регулирования стока существенных изменений в величинах интенсивности подъема и спада половодья не произошло.

Помимо сезонного регулирования Новосибирская гидроэлектростанция осуществляет краткосрочное регулирование - суточное и недельное. Величины навигационных расходов, попусков в нижний бьеф в период осенне-зимней сработки водохранилища, уровненный режим в нижнем бьефе ГЭС первоначально были определены в техническом проекте Новосибирской ГЭС.

Величина среднесуточного попуска, обеспечивающая судоходную глубину в 230 см, установлена «Основными положениями» 1969 г., равной 1300 м³/с при базовом попуске 1200 м³/с.

В целях исключения глубоких перебоев в навигационных попусках в результате преждевременной сработай всего навигационного объема водохранилища - 1,28 км³ в период летне-осенней межени (август-октябрь), величина навигационного попуска в случае низкого объема прогнозируемой приточности на оставшуюся часть навигационного периода снижается до 1200 м³/с. На практике такой режим навигационной сработай водохранилища осуществляется почти ежегодно.

Правилами 1969 г. предусмотрено, что при сработке водохранилища до отметки 112,47 м навигационные попуски из водохранилища прекращаются, поддержания минимального уровня у Новосибирска 45-50 см над нулем графика поста до начала интенсивного шугообразования, а в период интенсивного шугообразования до ледостава 80-100 см над нулем графика поста.

Минимальный гарантированный расход в нижнем бьефе в зимний период определен равным 450 м³/с. Минимальный уровень в реке в районе города при устойчивом ледовом покрове должен быть не менее 45-50 см над нулем графика водомерного поста «г. Новосибирск». Величина амплитуды колебаний уровней воды в реке при суточном регулировании нагрузок ГЭС правилами установлена: летом не более 45 см, зимой не более 120 см.

Режим попусков в нижний бьеф в условиях значительной посадки уровней в годы с маловодным стоком (обеспеченностью 80% и более) заметно отличаются от определенного «Основными положениями правил использования водных ресурсов Новосибирского водохранилища на р. Обь» 1969 года, и подчинен основной задаче - обеспечить нормальное и бесперебойное водоснабжение населения и промышленности Новосибирска в течение всего цикла сработай водохранилища и, особенно, в зимний период.

В период навигации, во избежание преждевременного использования навигационной призмы, величина навигационного попуска на специальных совещаниях основных водопользователей, регулярно проводимых в Верхне-Обском бассейновом управлении, уменьшается с учетом прогнозируемого стока и фактического наполнения водохранилища до 1200 м³/с, 1150 м³/с, 1100 м³/с.

Протяженность нижнего бьефа Новосибирской ГЭС составляет 350 км, а влияние недельного регулирования сказывается на 500 км участке до г.Колпашево. Активное

влияние суточных волн попусков сказывается на 40-50 км ниже створа ГЭС, а окончательная трансформация волны попуска проходит на 100 километрах от створа ГЭС.

В связи с созданием Новосибирского водохранилища изменился режим твердого стока на 110 километровом участке створ ГЭС - Дубровино. Объем стока наносов, поступающего в нижний бьеф через створ гидросооружения, составляет лишь 4,4% от бытового. Задержание водохранилищем основного объема влекомых наносов привело к интенсивному компенсационному размыву русла на 100 километровом участке нижнего бьефа.

Как показывают наблюдения, мутность восстанавливается до бытовых значений - 70-130 г/м³ - ниже 100 км.

Задержка наносов в водохранилище, обуславливающая осветления потока в нижнем бьефе гидроузла, характеризуется таблицей 1.3.

Таблица 3 - Соотношение поступления взвешенных наносов с речным стоком и сброса их в нижний бьеф Новосибирской ГЭС

Тип регулирования	Коэффициент водообмена*	Приток взвешенных наносов, млн.м ³	Сброс взвешенных наносов в нижний бьеф	
			млн.м ³	% от притока
сезонное	5,8	6,97(среднегодовой)	0,25	3,6

2 Проблема рассеивающих выпусков в нижнем бьефе

Город Новосибирск располагается непосредственно ниже плотины ГЭС. Это обстоятельство является основным антропогенным фактором, влияющим на русловые процессы в городской черте. Кроме того, значительное влияние на развитие русла оказывают дноуглубительные работы и карьерные разработки в русле. Естественные опасные проявления русловых процессов (размывы берегов, обмеление водозаборов и акваторий портов, подмыв и захламливание водовыпусков) сопровождаются антропогенно обусловленными (размывы дна и «посадки» уровней, активизация размыва берегов) [Барышников,1990]. С другой стороны, размывы берегов и другие виды естественных деформаций сказываются на жизни города, затрудняя работу различных сооружений .

Город с его коммунальным хозяйством, промышленными предприятиями, приречными рекреационными зонами и другими объектами обуславливает необходимость такого регулирования стока, которое учитывало бы не только потребность водного пути, но и необходимость создания внетранзитных ходов, защиту берегов от размывов, функционирования водозаборов и водовыпусков [Беркович,2000].

Водовыпуски очистных сооружений г. Новосибирска испытывают все последствия русловых процессов. Самотечные рассеивающие выпуски находятся на левом берегу реки Оби. Выпуски расположены тремя нитями и выдаются в сторону противоположного берега под углом 10° на расстояние примерно 200 м. Река на данном участке является судоходной.

Водолазной службой ЗАО «Водоканал» с 29.08.03 по 08.09.03 г. было произведено водолазное обследование подводной части самотечных рассеивающих выпусков первой и второй очередей О.С.К. города Новосибирска. Целью было обнаружение размывных участков, визуальное обследование состояния изоляции и футеровки на размывных участках, замеры размывных участков и рассеивающих выпусков с фиксацией наблюдений на видеопленку.

Скорость течения в районе выпусков первой очереди составляет 1,1 м/с. Глубина до 6 метров, грунт песчано-галечный, температура воды на момент обследования составляла $+8^\circ\text{C}$, воздуха $+15^\circ\text{C}$. Прозрачность в районе берега 0,5 метра в районе выпусков 0,2 метра. Скорость течения в районе выпусков второй очереди составляет 1,5 м/с, глубина до 8 метров, грунт песчано-галечный. Температура воды на момент обследования составляла $+8^\circ\text{C}$, воздуха $+12^\circ\text{C}$. Прозрачность в районе берега - 0,4 метра, в районе выпусков - 0,15 метра.

В результате обследования было установлено, что общее состояние первой очереди самотечного рассеивающего выпуска неисправное и требует капитального ремонта, второй очереди - удовлетворительное.

Обследованием установлено:

- на верхней (считая по течению) самотечной линии (выпуск 1), в 6 метрах от контрольной отметки, начинается промыв протяженностью 52 метра. Наибольшая высота промыва от нижней точки трубы до грунта, составляет 2,7 метра. Начиная с 58 метров от контрольной отметки, труба лежит на грунте и замыта на 50%, с частичным сохранением футеровки. С 68 метров труба уходит в грунт и замыта до второго рассеивающего выпуска. В двух метрах от второго рассеивающего выпуска в сторону реки труба размыта, протяженность размыва идет до четвертого рассеивающего выпуска, между вторым и третьим рассеивающим выпуске имеется промыв трубы длиной 15 метров с наибольшим расстоянием до грунта порядка 30 см;

- на средней самотечной линии (выпуск 1), в 3 метрах от контрольной отметки (К.К.-2), начинается промыв протяженностью 63 метра. Наибольшая высота промыва от нижней точки трубы до грунта, достигает 3,20 метра. Начиная с 66 метров от контрольной отметки, труба лежит на грунте и размыта на 40%, с частичным сохранением футеровки. С 76 метров труба уходит в грунт и замыта до 1-го рассеивающего выпуска. От первого рассеивающего выпуска, труба размыта, лежит на грунте, протяженность размыва идет до четвертого рассеивающего выпуска. Между вторым и четвертым рассеивающими выпусками имеется промыв трубы длиной 25 метров с наибольшим расстоянием до грунта порядка 60см;

- на нижней самотечной линии (выпуск 1), в 3,5 метрах от контрольной отметки, начинается промыв грунта под трубой протяженностью 42 метра. Наибольшая высота промыва от нижней точки трубы до грунта, достигает 2,10 метра. Начиная с 45,5 метров от контрольной отметки, труба оголена на 20% длиной 8 метров, футеровка отсутствует. Затем начинается промыв длиной 12 метров и наибольшим расстоянием до грунта 25 см. С 65,5 метров труба уходит в грунт и замыта до 1-го рассеивающего выпуска. От первого рассеивающего выпуска труба размыта, протяженность размыва идет до середины пятого рассеивающего выпуска. Между вторым и четвертым рассеивающим выпуском имеется промыв трубы длиной 40 метров с наибольшим расстоянием до грунта порядка 1,3 метра;

- верхняя самотечная линия (выпуск 2) в районе первого рассеивающего выпуска обнаружен размыв грунта под трубой длиной 10 метров с максимальным расстоянием от дна трубы до грунта 20см, в районе второго рассеивающего выпуска труба лежит в грунте и оголена на 50%, отвод выпуска лежит параллельно дна на грунте по течению, через один

метр после второго выпуска труба уходит в грунт, третий выпуск рабочий, далее труба находится в грунте;

- средняя самотечная линия (выпуск 2) в районе первого, второго и третьего рассеивающих выпусков обнаружен размыв грунта длиной 20 метров с максимальным расстоянием от дна трубы до грунта 40см. Выпуски 1,2,3- рабочие. Через два метра после выпуска 3 труба уходит в грунт и оголена на 20% до четвертого выпуска. Далее труба замыта, и лежит в грунте;

- нижняя самотечная линия (выпуск 2) ,от второго рассеивающего выпуска идет размыв до четвертого рассеивающего выпуска, максимальным расстоянием от дна трубы до грунта 50см. Выпуск рабочий. Далее труба размыта на 30%, и лежит на грунте два метра и уходит в грунт до седьмого выпуска.

Помимо этого при водолазном обследовании обнаружено захламление грунта реки вокруг самотечных труб первой и второй очереди следующими предметами: стальные тросы, якоря с цепью, мотки проволоки, обрывки сетей, топляки, веревки, автомобильные покрышки и другие посторонние предметы. Практически все рассеивающие выпуски в ненадлежащем состоянии, окна полностью либо частично забиты и не осуществляют выпуск вод в требуемом объеме.

По итогам проведенного обследования был проведен ряд мероприятий по очистке переливных окон рассеивающих выпусков первой очереди. Результатом проведенных работ является очистка от посторонних предметов всех забитых окон, кроме третьего окна на средней нитке. Это восстановило работоспособность выпусков, но по-прежнему остается проблема с размывом грунта и оголением участков труб.

Данная проблема имеет место быть и на данный момент: за три прошлых года могло произойти еще более глубокий размыв грунта, либо заилиение оголовков. Оголенные части труб испытывают нагрузки как от течения реки так и от различных посторонних предметов, переносимых потоком реки. Не исключено, что участки труб и рассеивающие выпуски могут подвергнуться разрушению. При образовании трещин, либо поломки отдельных частей стоки начинают бить прямо из воронки. Что является недопустимым, т.к. теряется необходимая рассеивающая способность водовыпусков.

Существующая проблема обусловлена значительными деформациями, происходящими на данном участке в русле реки. Проанализировав русловые съемки за 1999, 2000, 2001, 2003 и 2004 года (рисунок 2.1) и построив совмещенные поперечники, очевидны серьезные деформации за год. Они составляют величины до трех метров.

3 Гидродинамическая модель Новосибирского водохранилища

В данном разделе излагается численная модель водного объекта с вертикальным осреднением по глубине, основанная на двумерных уравнениях Сен-Венана. Она обычно применяется для расчета русловых потоков сложной плановой геометрии, каким является Новосибирское водохранилище и отдельные участки р.Обь в нижнем бьефе.

Осреднение трехмерных гидростатических уравнений по вертикали приводит к системе, включающей слагаемые горизонтального турбулентного перемешивания, сил Кориолиса и ветровых напряжений

$$\begin{aligned} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} &= -gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{hC_s^2} |\mathbf{u}| u + fhv + \frac{\partial}{\partial x} hK_x \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} hK_y \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_x, \\ \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hvv}{\partial y} &= -gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{g}{hC_s^2} |\mathbf{u}| v - fhu + \frac{\partial}{\partial x} hK_x \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} hK_y \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_y, \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где t - время, $\zeta = h + z_b$ - уровень свободной поверхности, h - глубина потока, u, v - компоненты осредненной по вертикали скорости, C_s - коэффициент Шези, f - параметр Кориолиса. При использовании формулы Маннинга запишем [Гришанин, 1990]

$$C_s = \frac{h^{1/6}}{n}, \text{ где } n - \text{коэффициент донной шероховатости.}$$

Сформулируем краевые условия. Рассматривая входной створ, который условно позиционируем на поперечнике $x = x_1$ (створ г.Камень-на-Оби в Новосибирском водохранилище), будем считать известным речной расход на нем. Распределение расхода поперек русла формировалось в предположении равновесного значения скоростей. Эти значения рассчитывались по одному из уравнений импульса в системе (1), в котором пренебрегалось инерционными слагаемыми. Из условия баланса сил гидравлического сопротивления и пьезометрического уклона в предположении отсутствия касательного компонента скорости на границе получим соотношение

$$0 = -gh i_x - \frac{g}{C_s^2} u^2.$$

Отсюда, с учетом формулы Маннинга находится поперечное распределение скорости

$$u^2 = -\frac{h^{4/3} i_x}{n^2}, \quad (2)$$

которое должно удовлетворять условию $\int u h dx = Q_1$, где интегрирование проводится вдоль поперечника входного створа.

На выходном створе $x = x_2$ используемое краевое условие формулируется исходя из наличия натуральных данных. В частности, при известных уровнях на плотине можно использовать условие

$$h = h_2, \text{ при } x = x_2 \quad (3)$$

Постановку задачи замыкают начальные условия на компоненты скорости u, v и пространственное распределение глубин h в момент $t = 0$.

$$h = h_0(x, y), \quad u = v = 0 \text{ при } t = 0 \quad (4)$$

Ветровые напряжения вычислялись по формуле [Суходольский, 1991]

$$\tau_x = \tau \cos(\alpha), \quad \tau_y = \tau \sin(\alpha), \quad (5)$$

где α - угол между вектором скорости ветра и направлением северного меридиана,

$$\tau = 10^{-3} \frac{\rho_a}{\rho_w} (0.69 + 0.107 |U_2|) |U_2|^2, \quad |U_2| - \text{модуль скорости ветра (м/с) на высоте 2 м,}$$

ρ_a плотность воздуха.

Криволинейные границы расчетной области задавались с учетом плановой структуры водного зеркала и необходимостью оптимальным образом вписать в область сеточную совокупность конечно-разностных узлов. Рабочий момент построения крупноблочной структуры сеточной области демонстрирует рис. 1,б. Результирующие граничные линии (контур на рис. 1,в) будут служить основой для построения сеточной области применительно к ее использованию в гидродинамической модели. Можно видеть, что граничный контур охватывает как главное русло, так и затопленные пойменные участки вплоть до границ влияния подпорных уровней. Представленные батиметрические характеристики водохранилища в целом соответствуют очертаниям водного зеркала.

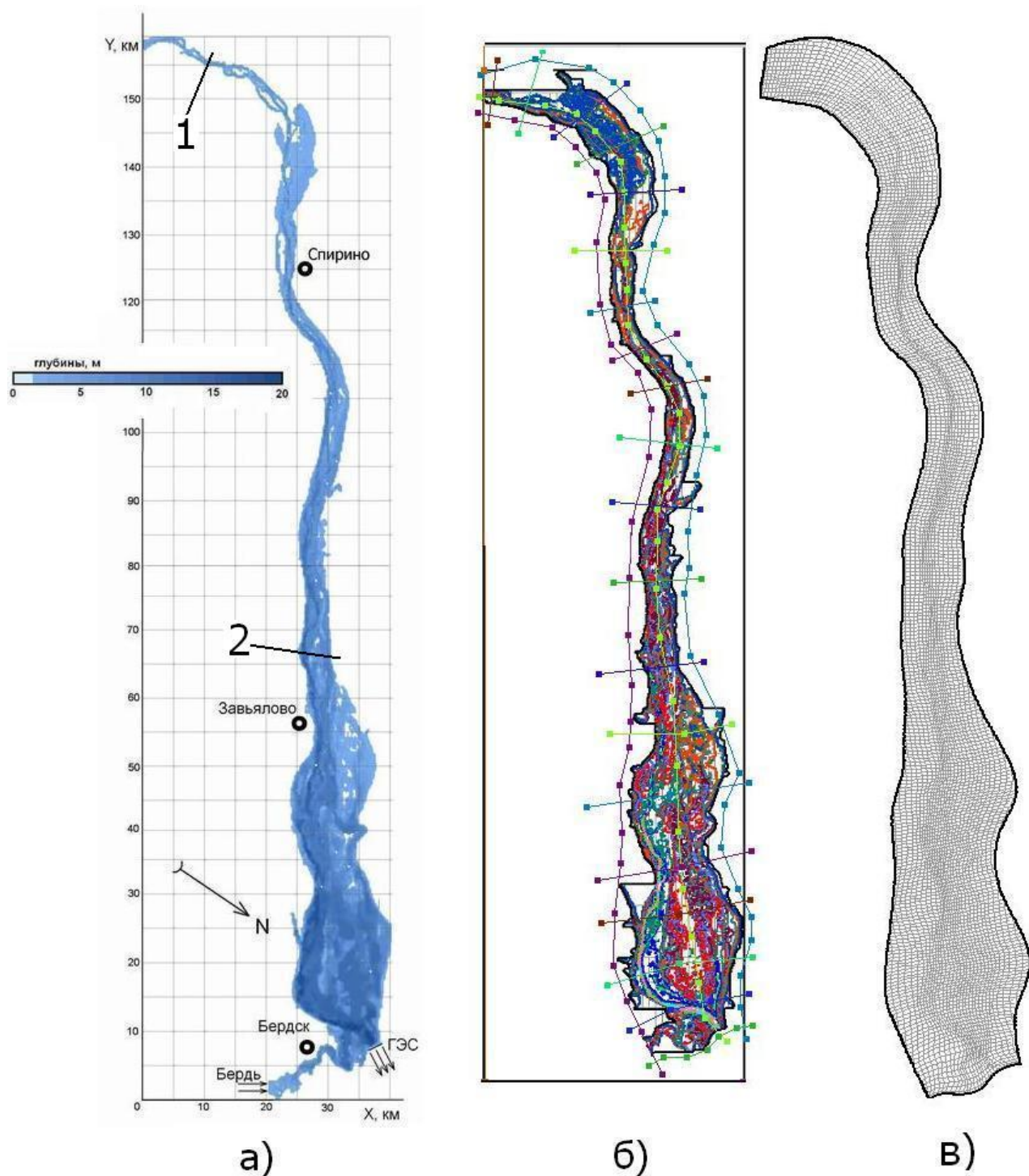


Рис. 1 – а) плановая геометрия Новосибирского водохранилища и принятая система координат; б) рабочий момент построения сеточных блоков; в) граничный контур расчетной области с координатными линиями сетки.

Оценка коэффициента шероховатости для Новосибирского водохранилища проведена на основе методов оптимизации параметра Шези по данным наблюдений.

С целью сопоставления расчетных параметров течения с натурными данными использованы результаты измерения гидрологических характеристик (глубин, скоростей

течения и расходов воды) в Новосибирском водохранилище. Измерения выполнялись с помощью аппаратно-программного комплекса Sontek RiverSurveyor, включающего акустический доплеровский измеритель-профилограф скорости течения и программное обеспечение для управления аппаратурой, сбора и обработки данных. Комплекс позволяет в динамическом режиме, при движении судна по створу наблюдения, получать мгновенную картину вертикального распределения скорости и направления течения с разрешением по горизонтали 4 - 8 м и по вертикали 0.25 м.

Контрольные створы выбраны в верхней и средней частях водоема. Поперечное сечение 1 располагается в верховьях водохранилища (12 км ниже г. Камень-на-Оби). Течение имеет здесь выраженный русловый характер, размер поперечника составляет примерно 500 м. Рис.2,а показывает распределение модуля скорости по длине поперечника (маршевая координата ℓ увеличивается от правого берега к левому). Отдельные точки на рисунке отражают значения $|\mathbf{u}|$, полученные в результате измерений и осредненные по вертикали. Заметный разброс амплитуд фактической скорости обусловлен турбулентным характером реальных течений и наличием стохастического компонента в потоке. Если провести статистическую фильтрацию случайных факторов в данных, то получим распределение средней упорядоченной скорости переноса. Точечная кривая 2 на рис. 2,а построена сглаживанием данных измерений методом скользящего среднего, а кривая 1 показывает профиль модельной скорости, полученный в расчете. В силу единой статистической природы (обе функции суть математическое ожидание) кривые могут быть корректно сопоставлены. Рассматривая рис.2,а, можно констатировать, что достаточно малый локальный шаг сетки на поперечнике (около 40 м) позволяет удовлетворительно детализировать структуру потока. Сравнительный анализ кривых 1,2 показывает, что модель дает несколько заниженные скорости течения (кривая 1). Ошибка модельного профиля скорости составляет в среднем 15 %, так что с учетом статистической неопределенности точность численного решения представляется приемлемой. Максимальные значения скоростей достигаются в глубоководной части поперечника и по величине оказываются близкими (0.7 – 0.8 м/с).

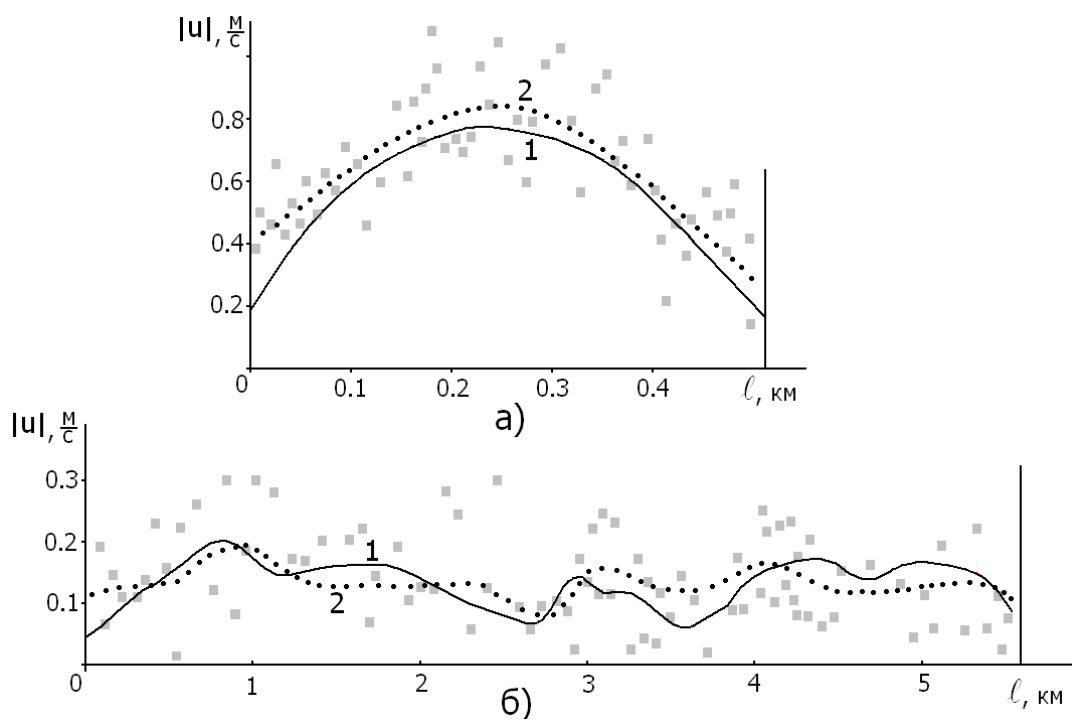


Рис. 2 – Расчетные (кривые 1), измеренные (отдельные точки) скорости и сглаженная эпюра измеренных скоростей течения (кривые 2) на створах 1,2 (рисунки а,б соответственно).

Оценим точность воспроизведения скорости в средней части водохранилища. Ширина водного зеркала по маршруту движения судна составляла 5700 м. Данные измерений на рис. 2,б (отдельные точки) показывают, что течение характеризуется сильной неоднородностью, а скорость испытывает резкие колебания от нуля до максимума (0.3 м/с) в различных, порой соседних, узлах зондирования. Амплитуда сглаженных скоростей, вместе с тем, сравнительно невелика (0.1 – 0.2 м/с, кривая 2 на рис. 2,б). Пульсационный характер скорости можно, по-видимому, объяснить сложной трехмерной структурой потока: представленные на рисунке данные получены как результат осреднения мгновенных вертикальных профилей по глубине. Последние формируются под влиянием инерционных механизмов и эффектов нестационарности, турбулентного перемешивания, обтекания неровностей рельефа и др. и могут иметь тонкое вертикальное строение с мелкомасштабными вариациями. Процедура осреднения данных по глубине нивелирует вертикальные особенности течения, что выражается в отмеченной сильной изменчивости средних значений на створе. При слабых течениях, характерных для рассматриваемой озерной части водохранилища, возрастает также роль стохастического фактора, связанного с ветром, который генерирует собственные возмущения скорости.

Сравнивая кривые 1,2 на рис. 2,б, видим, что приведенный теоретический профиль скорости довольно близок к измеренному; с достаточной точностью совпадают участки спада и возрастания скорости и положение экстремумов.

Приведенные результаты позволяют утверждать, что численная модель с достаточно высокой точностью воспроизводит скоростную структуру потока и может быть использована для решения теоретических и практических задач, касающихся Новосибирского водохранилища.

В качестве примера представим результаты расчета, когда расход воды по главному руслу задан значением $Q=3000 \text{ м}^3/\text{с}$. Это отвечает летнему периоду, следующему после периода половодья.

Линии тока в стационарном течении отражают траектории частиц, и, вместе с тем, образуют трубки тока, в которых значение расхода воды постоянно. Рис.3 показывает расчетные изолинии функции тока – траекторий части жидкости (общая картина представлена в виде двух фрагментов а,б для верхней и нижней частей водохранилища). Расстояние между соседними линиями, образующими трубки тока, соответствует одинаковым расходам 300 и 150 $\text{м}^3/\text{с}$ (приращение $\Delta\psi$ в трубках тока каждый раз подбиралось из соображений отчетливости при визуализации картины течения и лучшей различимости линий на рисунке). Согласно рис.2,а центральная часть Крутихинского мелководья при данных гидрологических условиях оказывается проточной и пропускает около 1000 $\text{м}^3/\text{с}$ общего расхода. Из рис.3,б можно заключить, что в озерной части водохранилища поток прижат к правому берегу, где проходит старое русло реки.

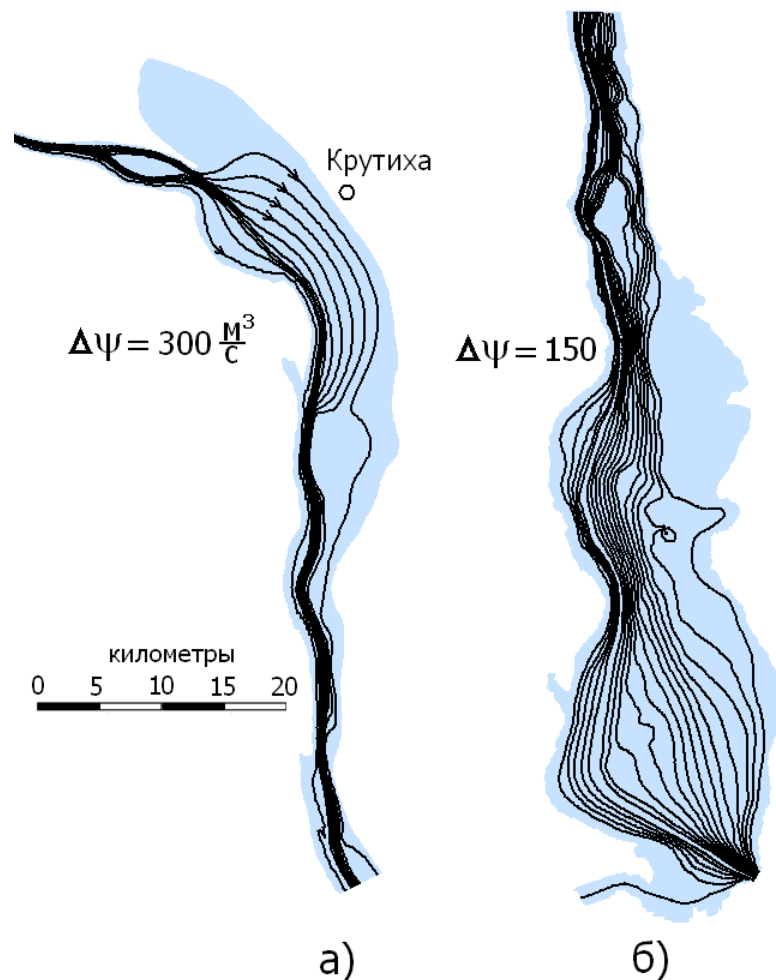


Рис. 3 – Изолинии функции тока в верхней (а) и нижней (б) части водохранилища при расходе $Q=3000 \text{ м}^3/\text{с}$.

Рис. 4 показывает распределение модуля расчетной скорости $|u| = \sqrt{u^2 + v^2}$ по акватории верхней и нижней части водохранилища. На рисунке выделены 10 диапазонов скорости от 0 до 1 м/с, причем каждому диапазону соответствует своя цветовая заливка контрастных сочетаний для отчетливой идентификации зон больших или малых скоростей. В верховьях основного русла характерная скорость составляет 1 м/с, на пойменных участках $|u|$ падает до 0.1 м/с и менее. В озерной части водохранилища течение отличается сравнительно небольшими скоростями. Так, ниже с.Завьялово (заливка голубого цвета на рис. 4,б) скорость не превосходит значения 10 см/с, а в приплотинном сегменте она составляет 2-5 см/с.

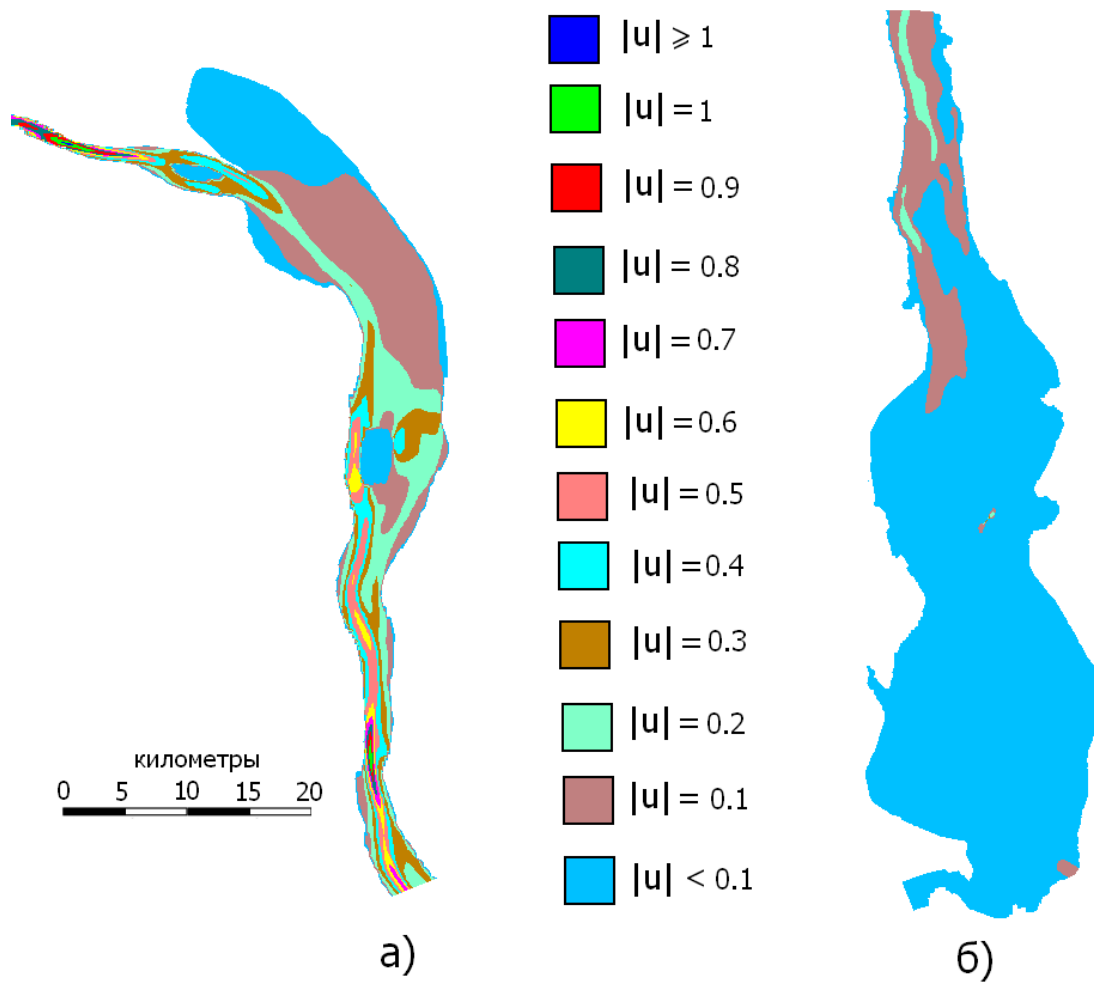


Рис. 4 – Распределение модуля скорости (м/с) в верхней (а) и нижней (б) части водохранилища при расходе $Q=3000 \text{ м}^3/\text{с}$.

Расчетные кинематические характеристики позволяют сформировать важный параметр водохранилища – проточность. Проточность водоема P характеризует быстроту обновления вод и в гидрологии определяется по формуле

$$P = \int_0^T \frac{Q_s}{V_s} dt,$$

где $Q_s(t)$ - суммарный расход на входном створе, V_s - объем чаши водохранилища, T - временной период (обычно один год). Проточность Новосибирского водохранилища по многолетним данным довольно велика и равна 6.7, т.е. годовой объем водного стока составляет 6.7 объемов чаши. В водоохранной проблематике интерес представляет скорость водообмена в разных частях водохранилища (в том числе, на крупных мелководьях и в береговых зонах), т.е. показатель локальной проточности. Обобщение показателя P проведем по формуле

$$p = \int_0^T \frac{q_n}{V_s} dt,$$

где $q_n(x, y, t)$ - распределение расходов вдоль линии тока, V_s - локальный объем водного участка, для которого проводится расчет. В численной модели в качестве V_s логично задать элементарный объем $V_s = S \cdot h$ (S - площадь бокса), а величина q_n рассчитывается по искомым полям расходов.

Рис. 5 показывает распределение коэффициента проточности по акватории водохранилища. Максимальное значение величина ρ достигает на русловом участке, а в озерном сегменте, где скорость течения невелика, интенсивность водообмена падает до значений 2-4. В верхнем течении водохранилища на быстротоке имеет место максимум проточности, равный, согласно расчетам, 85.

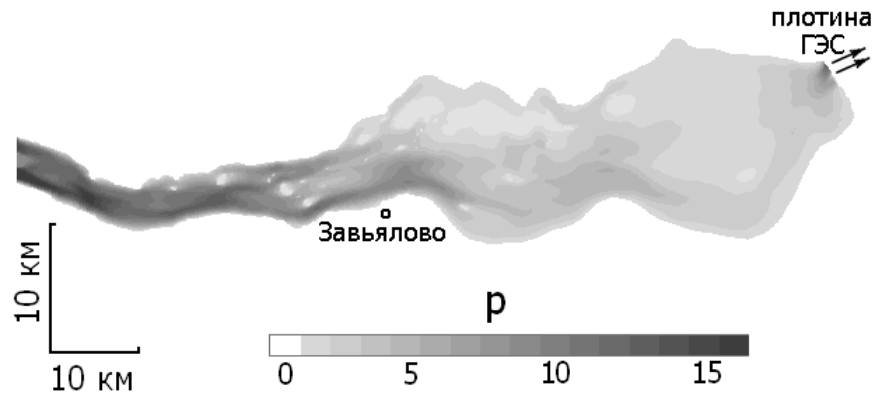


Рис. 5 – Поле локального коэффициента проточности ρ в озерной части Новосибирского водохранилища.

Обратимся к решению задачи миграции загрязняющих примесей по акватории водоема. Пусть c – средняя по глубине концентрация примеси в воде. Задача моделирования распространения шлейфа примеси в плановой постановке сводится к интегрированию уравнения

$$\frac{\partial hc}{\partial t} + \frac{\partial huc}{\partial x} + \frac{\partial hvc}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} hE_x \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} hE_y \frac{\partial c}{\partial y} - w_g c + R \delta(x_0, y_0), \quad (6)$$

где R - интенсивность сброса вещества в воду, функция $\delta(x_0, y_0)$ указывает положение точечного источника в расчетной области.

Расчет рассеяния, обусловленного вертикальным сдвигом скорости и диффузией, проводился в рамках модели [Brown et al, 1987], обобщенной на плановое течение согласно формулам

$$E_x = 0.35 B n \frac{|u|}{\sqrt{u^2 + v^2}} h^{\frac{5}{6}}, \quad E_y = 0.35 B n \frac{|v|}{\sqrt{u^2 + v^2}} h^{\frac{5}{6}} \quad (7)$$

где n - коэффициент сопротивления Маннинга, B – безразмерная константа дисперсии.

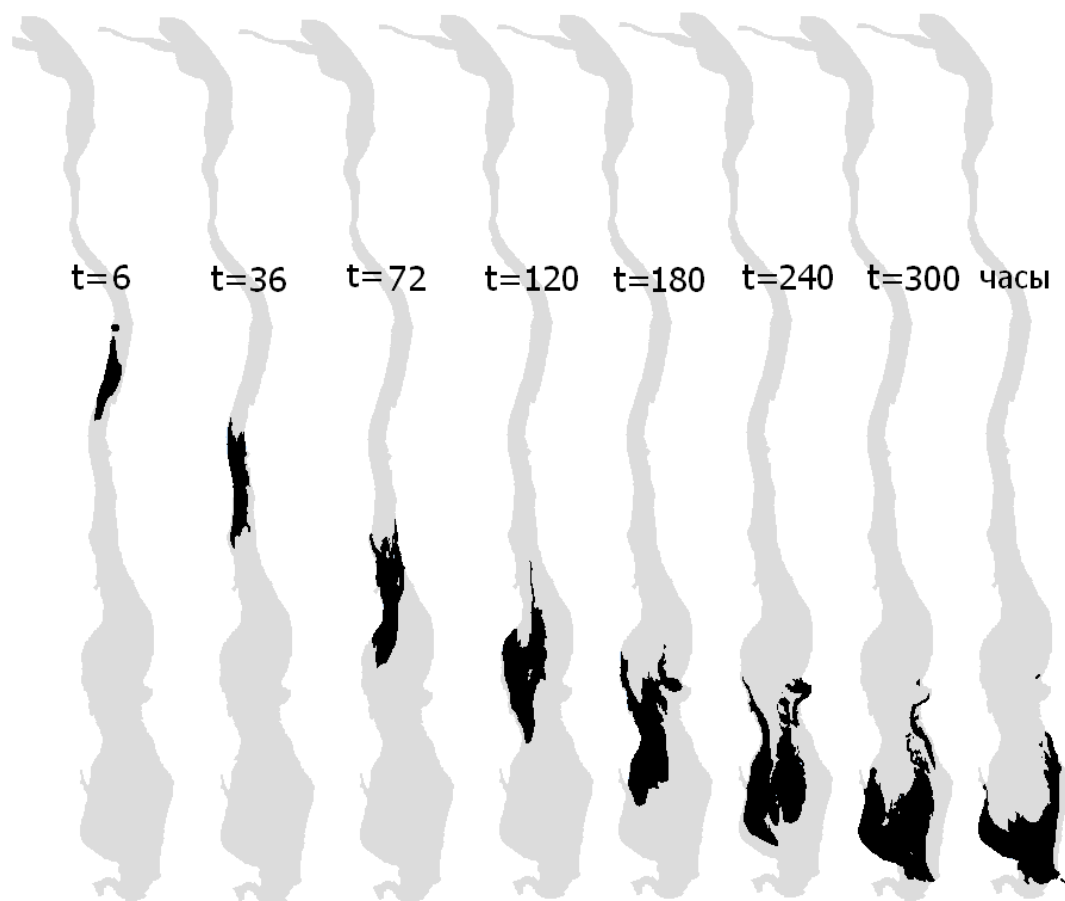


Рис. 6 –Последовательные стадии распространения пятна примеси.

Рассмотрим пример расчета перемещения пятна примеси, в котором использованы поля скорости, полученные при расходе $Q=3000 \text{ м}^3/\text{с}$. Предположим, что источник примеси, находящийся на участке Кирза - Ордынское, осуществляет аварийный сброс загрязняющей субстанции в водоем в течение одного часа (положение источника показано на первом поле рис.6 жирной точкой). Примесь считается пассивной и монодисперсной, мощность источника принята равной единице.

В процессе миграции пятно продвигается вниз по потоку и одновременно расплывается по акватории с соответствующим уменьшением концентрации за счет механизмов дисперсии. Рис.6 показывает в динамике контуры шлейфа с дискретностью 36-60 часов. Общая масса примеси в водоеме $\iint h c dx dy$ остается неизменной со временем. С приближением пятна к створу плотины ГЭС примесь со сбрасываемой водой начинает покидать расчетную область. При этом суммарное содержание примеси со временем уменьшается.

4 Гидродинамическая модель участка р.Обь под Новосибирском

Цель настоящего раздела состоит в исследовании процессов переноса примеси на морфометрически сложном участке р. Обь вблизи г.Новосибирска в районе подводных переходов с помощью численной модели плановых течений.

Задачи исследования:

- рассчитать гидродинамический режим на участке реки в районе Кудряшлвского бора:
- адаптировать двумерную (плановую) численную модель переноса примеси к условиям р. Обь в районе г. Новосибирска;
- разработать цифровую модель рельефа р. Оби в районе г. Новосибирска на основе данных натурных измерений;
- изучить особенности динамики поля концентрации в результате аварий-ного попадания загрязненных вод в реку.

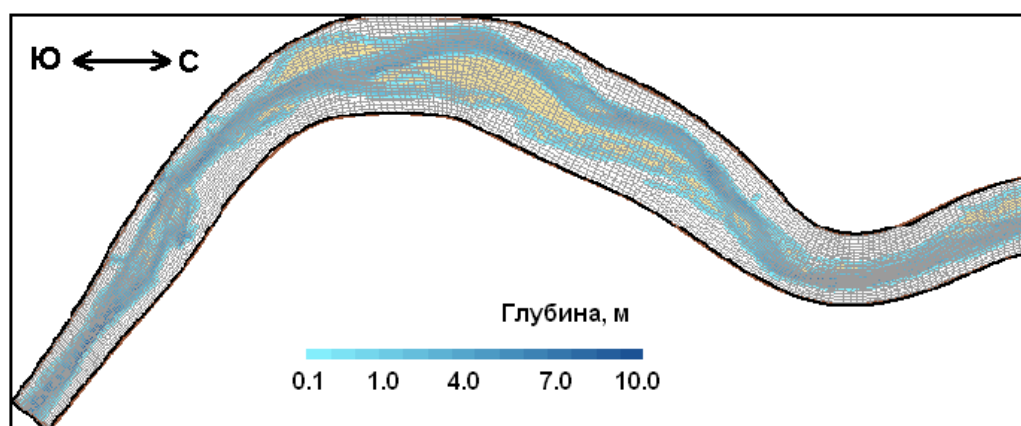


Рис.7 – Геометрия речного участка, расчетная область и криволинейная сетка.

Численные эксперименты были проведены для участка русла реки Оби в районе г. Новосибирска, длина которого по судовому ходу составляет около 30 км. Количество расчетных узлов 100 000, которые обеспечивают разрешение 20 м на криволинейной сетке. Геометрия русла с сеточными боксами показана на рис.7

Объектом являются дюкерные переходы, которые находятся в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС. Русловые процессы на этом участке характеризуются островной многоруканностью и обусловлены влиянием сбросов ГЭС – резкими повышениями-понижениями уровней воды. В течение года выделены руслоформирующие расходы, которые являются репрезентативными для данного участка реки

Возможная авария предполагается в тех местах дюкера, где наблюдались наибольшие деформации и размывы дна, а также провисание трубопровода (см. главу 2). Поэтому рассмотрены варианты мест разрушения недалеко от правого берега и в середине русла на обоих дюкерных переходах. Через один подводный трубопровод проходит в сутки около 100 - 150 тыс. м³ (т.е. в среднем, 1,45 м³/с).

Авария на канализационных дюкерах г. Новосибирска может быть ликвидирована в течение около 10-12 часов от начала попадания неочищенных сточных вод в реку. Следует отметить, что меньшее время, затраченное на ликвидацию, характерно лишь для новой нитки Саратовского дюкерного перехода, введенного в эксплуатацию осенью 2011 года. Среднее же время составляет около 10 - 12 часов.

Особенности распространения примеси в результате воз-никновения аварийного разрыва на подводном трубопроводе на расстоянии 100 м от правого берега с длительностью истечения 10 часов, при расходе воды в реке 1300 м³/с. Наблюдается интенсивное перемешивание, фронт примеси в плане принимает криволинейную форму, следуя геометрии водотока, на протяжении около 3 км. Спустя 2,5 часа после сброса фронт примеси немного сужается и смещается к левому берегу, где глубины и скорости больше. В этом случае загрязнение Заельцовского пляжа будет меньше, т.к. основная масса загрязнений не движется вдоль правого берега. Далее фронт примеси распространяется в основном по судоходному левому рукаву р. Обь (слева от о. Медвежий), и лишь небольшая масса загрязнений попадает в правый рукав.

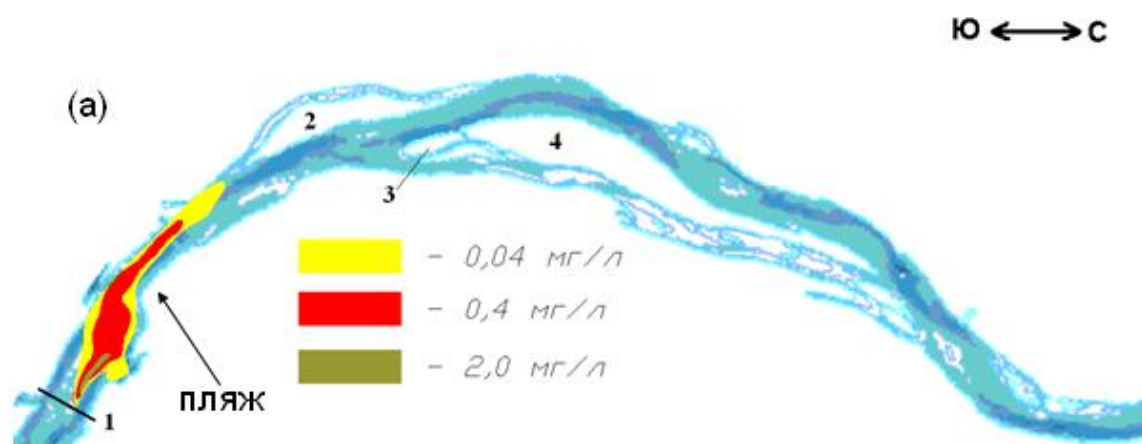
При расходе 2600 м³/с примесь интенсивно перемешивается по ширине потока и распространяется по всем протокам и рукавам в русле реки. Спустя 6 часов после начала аварии шлейфы загрязнения огибают о. Медвежий с двух сторон и движутся далее по течению. Часть примеси остается в мелководной зоне правого рукава и на некоторых участках русла.

Анализ поперечных профилей концентрации проведен на 8 характерных сечениях для выявления особенностей распространения примеси и ее накопления на отдельных участках. Следует отметить неоднородность распределения максимальных концентраций на поперечниках в различные моменты времени от начала аварии. Так, на поперечнике со сложным морфологическим строением русла: у левого берега - пережат Кривошековский, на некотором расстоянии от правого берега находится о. Саранок. Спустя 50 минут после начала аварии максимальные концентрации находятся в прямой зависимости от глубины участка русла, то есть, чем выше скорость течения на более глубоких участках, тем с быстрее разбавляется и распространяется примесь вниз по течению. Однако через 150 минут (2,5 часа) примесь скапливается в районе пристани, довольно медленно вымываясь

оттуда. В середине же русла и у правого берега концентрации загрязнителя имеют незначительные величины, поскольку основная масса примеси находится ниже по течению. Аналогичная ситуация прослеживается на всех участках с мелкими протоками.

При расходе $3000 \text{ м}^3/\text{с}$ в некоторых створах графики имеют 2 пика максимальной концентрации, что объясняется постепенным вымыванием примеси из зон с замедленным водообменом и эффектами запаздывания.

Результаты проведенных модельных расчетов по появлению "вторичных волн" подтверждают данные натурных экспериментов при распространении красителей.



1 – дюкер, 2 – о. Кудряш, 3 – о. Заячий, 4 – о. Медвежий

Рис.8 – Распределение примеси в русле при расходе $1300 \text{ м}^3/\text{с}$ через 70 мин после начала аварийного сброса.

По результатам численных экспериментов можно заключить, что наиболее опасной является авария у правого берега на обоих дюкерных переходах, т.к. вследствие особенностей течения загрязненные воды увлекаются быстрым течением к левому берегу и попадают в протоку острова Кудряш, вдоль которой находится п. Кудряши и множество дачных участков. При возникновении аварийной ситуации в середине подводного трубопровода, загрязненные воды распространяются с основным течением вдоль речного русла.

Выявлено, что с повышением водности, и следовательно, увеличением скоростей потока, загрязняющие вещества попадают во все протоки ниже по течению, скапливаясь на некоторых участках русла. Аккумуляция массы примеси наблюдается за п. Затон, в левом рукаве Оби от о. Кудряш - в районе Кудряшовских дач, в правой протоке от

островов Заячий и Медвежий (Чкаловские дачи и пос. Мочище). Эти особенности отображены на рис.8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен обзор и анализ теоретических и экспериментальных исследований распространения загрязнений в естественных водотоках и лабораторных условиях, показавший необходимость применения гидродинамического моделирования для детализации течений и процессов миграции примеси в руслах рек сложной геометрии.

Сформулирована численная гидродинамическая модель для Новосибирского водохранилища и для участка р. Обь в районе г. Новосибирска. Проведено тестирование и выполнена калибровка параметров на экспериментальных материалах и натурных данных.

Проведен расчет сложной пространственно-временной динамики шлейфа примеси при возникновении аварийной ситуации на различных участках подводного трубопровода. Показано, что наиболее опасной является авария у правого берега, т.к. в этом случае происходит более интенсивное перемешивание примеси в водном потоке, тогда как при аварии в середине русла р. Обь примесь движется со скоростью течения реки, практически нигде не скапливаясь. На основе проведенных расчетов выявлены особенности распространения загрязняющих веществ в русле морфологически сложного строения. Показано, что при определенных гидрологических условиях возможно появление двух последовательных пиков при распространении примеси в водном потоке - непосредственно после сброса и в результате вымывания скопившейся на мелководьях примеси.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Барышников Н.Б. Антропогенное воздействие на русловые процессы / Н.Б. Барышников. – Л.: Изд-во ЛГМИ, 1990. – 190 с.
- 2 Беликов В.В., Зайцев А.А., Милитеев А.Н. Математическое моделирование сложных участков русел крупных рек // Водные ресурсы. – 2002. – Т. 29, № 6. – С. 698-705.
- 3 Беркович К.М. Экологическое русловедение / К.М. Беркович, Р.С. Чалов, А.В. Чернов. – М.: ГЕОС, 2000. - 332 с.
- 4 Васильев О.Ф., Воеводин А.Ф., Никифоровская В.С. Численное моделирование стратифицированных течений в системах открытых русел и водоемах разветвленной формы. // Вычислительные технологии. 2004. – Т. 9, № 2. – С. 26-41.
- 5 Гришанин К.В. Основы динамики русловых потоков. – М.: Транспорт, 1990. – 320 с.
- 6 Попов И.В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство (гидролого-морфологическая теория руслового процесса и ее применение) / И.В. Попов. - Л.: Гидрометеиздат, 1969.- 88 с.
- 7 Чалов Р.С. Сток наносов и русловые процессы на больших реках России и Китая. / Р.С. Чалов, Пю Шугуан, Н.И. Алексеевский. – М.: Изд-во МГУ, 1999. – 212 с.
- 8 Brown L.C., Barnwell T.O. The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS. Athens: EPA, 1987. 189 p.