

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев Е.К., Жоров В.А., Ловцкая О.В., Яковченко С.Г. О некоторых алгоритмах расчета кривых обеспеченности и их программной реализации // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже третьего тысячелетия: Матер. Междунар. Научн. Конф. – Томск, 2000. – С. 386-388.
2. Гарцман Б.И., Карасев М.С., Степаненко Л.А. Картографирование риска затопления и развития вводно-эрозионных процессов в долинах рек горных стран зоны муссонного климата: методические и прикладные аспекты // Водные ресурсы. – 2000. – Т. 27. №1. – С. 13-20.
3. Постнова И.С., Яковченко С.Г., Дмитриев В.О. Технология оценки с помощью ГИС зон затопления

весенними паводками малой обеспеченности // ЖВТ. – 2005. – Т. 10. – Ч. 2. – С. 39-45.

4. Яковченко С.Г., Жоров В.А., Постнова И.С. Создание и использование цифровых моделей рельефа в гидрологических и геоморфологических исследованиях. – Кемерово: Изд-во ИУУ СО РАН, 2004. – 92 с.

5. Hutchinson M.F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits // Journal of Hydrology. – 1989. – 106. – P. 211-232.

6. Meijerink A.M.J., de Brower H.A.M., Mannaerts C.M., Valenzuela C. Introduction to the use of Geographic Information Systems for practical hydrology. – UNESCO-ITC publication, 1994. – N 23. – 273 p.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ РАСЧИСТКИ РУСЛА

А.Т. Зиновьев, К.В. Марусин, А.А. Шибких, В.А. Шлычков, М.В. Затицкий

В работе предлагается компьютерная модель русловых процессов на участке р. Обь у сел Сибирка и Кучук Шелаболихинского района Алтайского края для определения эффективности инженерных мероприятий с целью создания условий для беззаторного пропуска льда на участке расчистки и судоходства.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность мероприятий по регулированию русел рек и управлению русловыми процессами, устойчивость и надежность инженерных сооружений в руслах рек во многом зависят от того, в какой мере они соответствуют режиму реки и учитывают специфику русловых процессов в конкретной природной обстановке. Использование современных методов математического моделирования и ГИС-технологий предоставляет возможности всесторонне изучать русловые процессы с привлечением всей имеющейся информации по конкретному объекту (морфологической, гидрологической и пр.) и знаний в предметной области.

Этот подход был реализован при выполнении работ по компьютерному моделированию русловых процессов на участке реки для оценки влияния расчистки русла. Объектом исследования является участок р. Обь у сел Сибирка и Кучук Шелаболихинского района Алтайского края. Ледовые затруднения (зато-

ры торошения) на участке расчистки русла р. Обь наблюдаются ежегодно [1] и являются причиной заторных наводнений, подтопляющих в весенний период расположенные у реки населенные пункты. Общим признаком места образования затора является понижение пропускной способности реки на каком-либо участке для раздробленного льда ледяного покрова. Это могут быть участки реки с крутыми поворотами, островами, порогами, суженным руслом, с уменьшением глубины, с уменьшением скорости течения, с ненарушенным ледяным покровом и т.п. [2].

В качестве мероприятия по предотвращению заторообразования предлагается расчистка русла (предупредительная мера [3]) – проведение выправительных работ в русле реки, создание благоприятных условий для прохождения льда, в том числе и посредством изменения скоростного режима потока, путем разработки устойчивых к заилению прорезей через перекаты при минимальных объемах вынимаемого руслового аллювия.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Математическая модель планового течения в открытом русле. Разработанная для расчета двумерного (в плане) поля течения реки гидродинамическая модель предназначена для расчета поля скорости, расходов, уровней, геометрии свободной поверхности, концентрации примеси в природных водных объектах произвольной конфигурации или их части. Пространственные масштабы рассматриваемых гидродинамических процессов определяются спецификой водного объекта и поставленными целями исследования.

Временной период интегрирования также обусловлен конкретной постановкой задачи. Методы решения позволяют задавать временной шаг в довольно широких пределах, однако он должен быть согласован с пространственным разрешением.

Введем декартову систему координат с осями x, y, z , в которой ось z направлена вверх (рис. 1). Пусть поверхность водосбора (включая русловые углубления) задана уравнением $z = \delta(x, y) + i_x x + i_y y$, где i_x, i_y - малые уклоны в направлениях x, y , характеризующие понижение оси главного русла вдоль водотока.

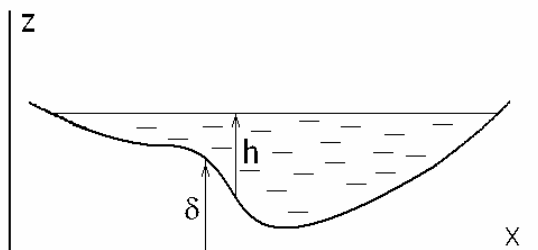


Рисунок 1 – Система координат и введенные обозначения

Исходные уравнения рассматриваются в области, конфигурация которой может меняться со временем – например, в результате повышения или сработки уровня воды.

Большая часть водотоков Западной Сибири характеризуются как мелководные (средняя глубина 2-4 м) и плоскодонные, со слабоврезанными котловинами. Термическая и плотностная стратификация таких водных объектов незначительна, а течения генерируются, в основном, за счет ветра и уклонов дна. Для этих условий можно принять предположение о гидростатичности процессов и перейти к плоской горизонтальной задаче [4,5].

Считая течение турбулентным, уравнения горизонтального (планового) движения воды получим из уравнений Рейнольдса путем их осреднения по вертикали. Рассмотрим

средние по z скорости $\bar{u} = \frac{1}{h} \int_{\delta}^h u dz$,

$\bar{v} = \frac{1}{h} \int_{\delta}^h v dz$, где u, v – компоненты вектора

горизонтальной скорости вдоль осей x, y ; h – глубина потока. Отбрасывая черту у переменных, систему уравнений плановых течений запишем в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} &= -gh i_x - \\ &- gh \frac{\partial(h+\delta)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} h K_x \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} h K_y \frac{\partial u}{\partial y} + \\ &+ \tau_x - r |\bar{u}| u, \\ \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv v}{\partial y} &= -gh i_y - \\ &- gh \frac{\partial(h+\delta)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} h K_x \frac{\partial v}{\partial x} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} h K_y \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_y - r |\bar{v}| v, \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} &= R_a - I, \end{aligned} \quad (1)$$

где τ_x, τ_y – напряжения ветра; r – коэффициент трения о дно; $|\bar{u}|$ – модуль скорости течения; K_x, K_y – коэффициенты турбулентности; R_a – интенсивность источников (осадки); I – инфильтрационный сток и испарение.

Уравнения (1) имеют важную особенность. В отличие от известных плановых моделей [5] в системе (1) не делается предположения о малости амплитуды колебаний уровня. В ряде постановок задач искомая глубина h представляется в виде $h = h_0 + h_1$, где $h_0(x, y)$ – некоторое равновесное (начальное) распределение глубин, а h_1 – малые отклонения от него, $|h_1| \ll h_0$. Последнее соотношение позволяет упростить исходные уравнения, однако ограничивает круг решаемых задач. Так, при $h_0 \rightarrow 0$ система базовых уравнений вырождается, что не позволяет описывать такие процессы, как динамика линии уреза воды и площади зеркала при изменении уровня водотока или продвижение волны паводка по сухой пойме. Система (1) лишена этих недостатков.

Постановка краевых условий определяется морфологическими характеристиками водотока и типом водообмена. Так, на боковых границах при $(x, y) \in \Gamma$ задаются условия непротекания и трения

$$u_n = 0, \quad K \frac{\partial u_s}{\partial n} = -c_u |\bar{u}| u_s, \quad (2)$$

где Γ – граница области; n – внешняя нормаль к ней; u_n, u_s – нормальная и касательная составляющие вектора горизонтальной скорости; c_u – коэффициент сопротивления вдоль линии берега. При наличии открытых (жидких) границ должны быть известны расходы $Q^{(x)}, Q^{(y)}$ в заданных сечениях

$$hu = Q^{(x)}, \quad hv = Q^{(y)}, \quad (3)$$

либо задаваться турбулентные потоки воды на выходных створах – например, в виде

$$hK \frac{\partial u}{\partial n} = hK \frac{\partial v}{\partial n} = 0. \quad (4)$$

Моделирование турбулентного обмена проводится на основе двухпараметрической системы уравнений полуэмпирической теории турбулентности [6]. Система уравнений плановых течений получена путем вертикального осреднения уравнений пространственной модели турбулентности [7]. В представленном виде уравнения описывают, в частности, известные нетривиальные решения, соответствующие горизонтально однородному потоку с вертикальным сдвигом скорости (пристеночный слой постоянных потоков). Это обстоятельство делает правомерным применение уравнений (ε, ε)-модели для расчета горизонтального турбулентного обмена.

Математическая модель транспорта речных наносов. Для расчета русловых преформирований система уравнений (1) - (4) дополняется двумерным уравнением русловых деформаций

$$(1-p) \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0. \quad (5)$$

В уравнении (5) x, y – декартовы координаты; t – время; z – отметка дна; p – коэффициент пористости грунта; Q_x, Q_y – компоненты расхода руслообразующих наносов в потоке по осям координат.

Касательные напряжения на дне в соответствии с квадратичным законом сопротивления имеют вид

$$\tau_b = -\lambda_b |\bar{u}| \bar{u}, \quad \lambda_b = gn_b^2 h^{-1/3}, \quad (6)$$

где λ_b – гидравлическое сопротивление на дне реки; λ_b – коэффициент шероховатости русла; g – ускорение силы тяжести.

При замыкании системы уравнений используются полуэмпирические зависимости, связывающие расход наносов с параметрами потока. К примеру, зависимость Р. Бэгнольда

$$Q = \rho / \rho_s \frac{|\bar{u}|^3}{C^2} (0.24 + 0.01 \frac{u_* C}{\omega g^{1/2}}), \quad (7)$$

где ω – гидравлическая крупность руслоформирующих наносов. u_* – динамическая скорость, C – коэффициент Шези, ρ_s – плотность наносов; ρ – плотность воды, кг/м³;

Другой часто используемой зависимостью является формула Аккерса-Уайта [8]

$$Q = K \cdot \bar{u} \cdot d_{35} \cdot \left(\frac{\bar{u}}{u_*} \right)^n \cdot \left(\frac{Y - Y_{cr}}{Y_{cr}} \right)^m, \quad (8)$$

где $[Q] = \text{м}^2/\text{с}$; $\bar{u}$ – средняя по глубине скорость потока, м/с; d_{35} – характерный «ситовый» диаметр наносов (35% веса пробы – мельче), м; $u_* = \sqrt{\tau / \rho}$ – «динамическая» скорость, м/с; τ – касательное напряжение на дне, Н/м²; ρ – плотность воды (1000), кг/м³; Y – коэффициент мобильности частиц (mobility number). Коэффициент Y определяется из соотношения

$$Y = \left(\frac{u_*^n}{\sqrt{(s-1)gd_{35}}} \right) \cdot \left(\frac{\bar{u}}{5.66 \cdot \log(10h/d_{35})} \right)^{1-n},$$

где $s = \rho_s / \rho$ – удельная плотность наносов (2,65 – для кварцевых песков); ρ_s – плотность наносов (2650 – для песков), кг/м³; g – гравитационное ускорение, м/с²; h – глубина потока, м.; Y_{cr} – критическое (неразрывающее) значение фактора мобильности; K, n, m – эмпирические коэффициенты.

Значения K, n, m, Y_{cr} зависят от «динамической» крупности материала D_*

$$D_* = d_{35} \left(\frac{(s-1)g}{\nu^2} \right)^{1/3}, \quad ([D_*] = \text{м}),$$

где ν – кинематическая вязкость воды.

Результаты выполненного анализа показали, что формула (8), используемая для расчета руслообразующих наносов, очень чувствительна к крупности мелкозернистого материала. В качестве исходных данных для расчетов по формуле (8) необходимо задавать касательные напряжения, среднюю ско-

рость и глубину потока, характерный («ситовый») диаметр наносов.

Близкие результаты дает более простая формула Энгелунда-Хансена [9,10]

$$q = \frac{0.05|u|^5}{(s-1)\sqrt{gd_{50}C^3}}, ([q]=\text{м}^2/\text{с}), \quad (9)$$

где q – суммарный (по глубине) расход наносов через единицу поперечной длины; U – средняя по глубине скорость потока, м/с; $s=\rho_s/\rho$ – удельная плотность наносов (2,65 – для кварцевых песков); ρ_s – плотность наносов (2650 – для песков), кг/м³; ρ – плотность воды, кг/м³; g – ускорение силы тяжести, м/с²; C – коэффициент Шези, м^{0.5}/с.

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ РУСЛОВОГО ПОТОКА

Аппроксимация границ расчетной области проводится путем ее проецирования на сеточное пространство с регулярными ячейками. Узлы, не попадающие в область, выводятся из рассмотрения при численном интегрировании в соответствии с методом фиктивных областей. Граничные контуры представляют собой кусочно-линейную поверхность, образованную конечными элементами касательных гиперплоскостей. Ограничения на топологию границ не накладывается и допускается многосвязность расчетной области.

Методы уравнений основаны на дискретизации исходных систем в сеточной области. Используются неравномерные прямоугольные сетки с узлами, разнесенными по граням элементарного пространственного бокса. "Расшатанные" сетки позволяют строить консервативные разностные схемы, а применяемые неявные методы обеспечивают устойчивость метода при долгопериодном интегрировании.

Пространственная аппроксимация дифференциальных операторов основана на современных представлениях о монотонных схемах и схемах с невозрастанием полной вариации (Total Variation Diminishing, TVD). Следует отметить, что разностные схемы на расширенном шаблоне выше первого порядка аппроксимации не являются монотонными [11]. Это приводит к необходимости вводить сглаживающие операторы, которые устраняют осцилляции решения. В последнее время конструируются разностные схемы высокого порядка точности, обеспечивающие монотонность решения путем использования перестраиваемого шаблона за счет подходящего выбора аппроксимации производных в различных участках численного решения [12].

TVD-свойство гарантирует, в частности, неотрицательность таких численных полей, как толщина слоя воды, концентрация примеси.

Для построения неявной TVD-схемы рассмотрим модельное уравнение адвекции

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial u q}{\partial x} = 0, \quad (10)$$

где u – заданная скорость; $q(x,t)$ – искомое решение. Будем считать, что величины u, q изменяются внутри разностной ячейки по линейному закону. Линейное распределение строится по принципу минимума производной [13], а именно, наклон кривой концентрации полагается равным минимальному по модулю наклону сеточных функций, построенных по значениям в данной ячейке и в соседних, если они имеют одинаковые знаки и нулю в противном случае. Такой подход, основанный на восстановлении структуры сеточных функций внутри элементарного бокса по их средним, называется реконструкцией, а правило выбора наклонов получило название "ограничитель".

Пространственная дискретизация уравнения (10) определяется соотношением второго порядка точности

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} = C_{i+\frac{1}{2}}(q_{i+1} - q_i) - D_{i-\frac{1}{2}}(q_i - q_{i-1}), \quad (11)$$

где i – номер сеточного узла; $C_{i+1/2}$, $D_{i-1/2}$ – неосциллирующие интерполянты, определенные на 5-точечном шаблоне с узлами i , $i\pm 1$, $i\pm 2$ и зависящие от значений q в этих узлах. Конкретные выражения для коэффициентов зависят от принятой формы функции-ограничителя и, например, в рамках полиномиального распределения в схеме Ошера-Чакравати приведены в [14]. Трехточечная на неявном слое консервативная TVD-схема первого порядка по Δt для уравнения (10) запишется в виде

$$\frac{q_i^{n+1} - q_i^n}{\Delta t} = C_{i+\frac{1}{2}}^n (q_{i+1}^{n+1} - q_i^{n+1}) - D_{i-\frac{1}{2}}^n (q_i^{n+1} - q_{i-1}^{n+1}), \quad (12)$$

где n – номер временного шага. Комбинируя правую часть (12) с явными слагаемыми по схеме Кранка-Николсона легко получить второй порядок временной аппроксимации.

Алгебраические системы конечно-разностных уравнений решаются итерационно с применением методов неполной факторизации, для интегрирования по времени используются неявные методы расщепления.

Численная модель была апробирована на расчетах кинематики участка р. Обь в районе барнаульского водозабора № 2 [15].

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассматриваемый участок расчистки реки (370-382 км от места слияния рек Бия и Катунь) относится к верхнему течению р. Обь, плес Барнаул – Камень-на-Оби (рис. 2).

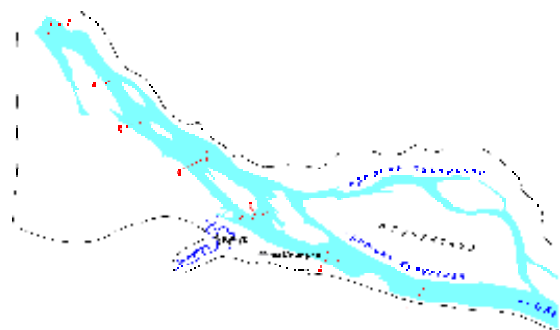


Рисунок 2 – Участок р. Обь в районе сел Сибирка и Кучук: цифрами обозначены перекаты

Современный этап развития руслового процесса р. Обь у сел Сибирка и Кучук характеризуется отступлением пойменных берегов, увеличением общей ширины русла и значительным нарастанием площади островов. Наличие в русле большого количества островов – осередков сильно усложняет гидравлическую схему речного потока. Наблюдаются постоянные блуждания судового хода. При вскрытии реки заклинивания крупных льдин в сужениях между островами при проходе транзитного льда периодически приводят к образованию крупных заторов и, как следствие, подтоплению сел Сибирка и Кучук.

Цель проектируемой расчистки русла состоит в том, чтобы путем разработки дноуглубительных прорезей сконцентрировать поток в одном направлении, предотвратить его растекание между островами и создать условия для заилиения и отмирания второстепенных проток (рис. 3).

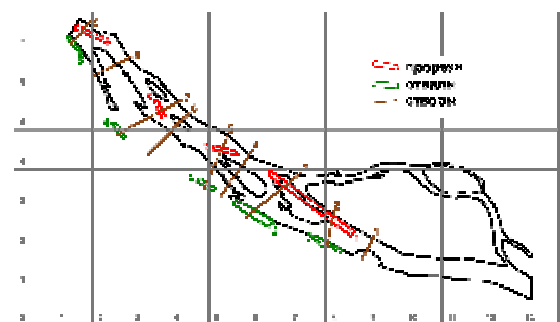


Рисунок 3 – Схема инженерных мероприятий

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ РЕЛЬЕФА РЕЧНОЙ ДОЛИНЫ

Цифровая модель рельефа (ЦМР) речной долины представлена в виде матрицы высот с разрешением по горизонтали 10 метров. Область определения данной матрицы ограничена следующим образом:

- с востока: четырьмя километрами восточнее зоны расположения первой по течению реки прорези;
- с запада: западная отметка зоны расположения последней прорези;
- с юга: коренным берегом долины р. Обь;
- с севера: значением высот не менее двух метров над расчетным уровнем воды.

Для построения ЦМР исследуемого участка использовались следующие материалы:

- карта глубин участка русла, приведенная к масштабу 1:10 000, содержащая данные о глубинах (изолинии глубины) и отметки расчетного уровня воды (точки с абсолютными отметками высот);
- топоплан масштаба 1:10 000 на участок поймы исследуемой территории 1972 г. издания. Пойменная часть территории была оцифрована до бровки террасы по левому берегу и до участков, превышающих расчетный уровень воды не менее чем на 2 метра – по правому;
- план расположения створов относительно координатной сетки, соответствующей километровой координатной сетке топоплана масштаба 1:10 000;
- план расположение скважин, пробуренных для изучения гранулометрического состава руслообразующих наносов, относительно координатной сетки, соответствующей километровой координатной сетке топоплана масштаба 1:10 000.

Процедура построения ЦМР на участке расчистки изложена в работе [16]. ЦМР может быть представлена в двух вариантах. В первом варианте значениями узлов, соответствующих руслу реки, являются значения глубины относительно расчетного уровня воды. Во втором варианте значениями узлов, соответствующих руслу реки, являются значения высоты в абсолютной (балтийской) системе высот. В обоих случаях значениями узлов, соответствующих сухой части, являются значения высоты в абсолютной (балтийской) системе высот.

Первый способ представления цифровой модели рельефа применяется при расчете объемов выборки речного материала. Кроме того, визуальное представление такой

модели является более удобным при оценивании общей гидрологической ситуации на участке расчистки.

Второй способ представления цифровой модели рельефа применяется при математическом моделировании для расчета гидрологических параметров модели и собственно гидрологического моделирования при различных уровнях и расходах воды.

Для различных вариантов расположения прорезей и их параметров, а также мест отвала песка (см. рис. 3) были построены модифицированные цифровые модели рельефа и рассчитаны объемы переносимого материала. Модификация ЦМР заключается в изменении значений высот ячеек сетки в границах прорези, если они превышают определенное значение относительно уровня воды, по следующей формуле

$$z' = \min(z, u - d), \quad (13)$$

где z' – значение в узле модифицированной ЦМР; z – значение в узле исходной ЦМР; u – значение уровня воды в узле; d – параметр глубины прорези.

Объем переносимого материала для каждой прорези рассчитывается по формуле

$$V = \sum_{i=1}^n (z_i - z'_i) \cdot x \cdot y, \quad (14)$$

где V – объем переносимого материала; n – количество ячеек сетки, попадающих в область расположения прорези; z_i – высота

ячейки исходной ЦМР; z'_i – высота ячейки модифицированной ЦМР; x – значение шага сетки по оси абсцисс; y – значение шага сетки по оси ординат.

ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

На основе математических моделей кинематики речного потока, транспорта руслообразующих расходов и цмр речной долины построена компьютерная модель русловых процессов на участке расчистки. Выбор расчетной области (рис. 4) определяется рядом критериев, связанных с конечно-разностной аппроксимацией дифференциальных уравнений в граничных точках. Так, координатные линии цмр ($x=\text{const}$, $y=\text{const}$) в среднем должны быть направлены вдоль основного русла. Это позволяет более оптимально выбрать параметры сеточной области, соотношение шагов по x и y и в конечном итоге повысить точность расчетов. Нормальное к границе расположение русла облегчает задание рас-

пределения расхода по границе области - не возникает необходимости вводить косые производные и «разгонные» области.

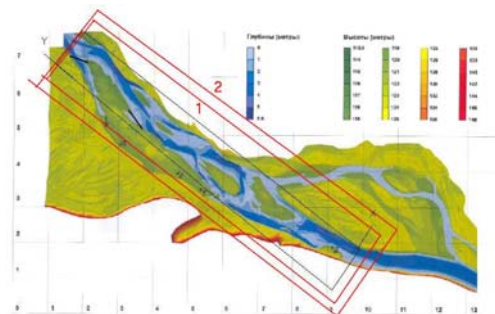


Рисунок 4 – Схема расчетной области

На рис. 5 приведены результаты расчетов глубин речного потока на участке расчистки в бытовых условиях при расходах $q=1050 \text{ м}^3/\text{с}$, качественно и количественно совпадающие с данными промеров русла при соответствующих расходах.

Результаты расчета расхода русловых наносов в бытовых условиях при расходах $q=1050 \text{ м}^3/\text{с}$ подтверждают известные представления о размыве перекатов и заилении плесов в меженные периоды.

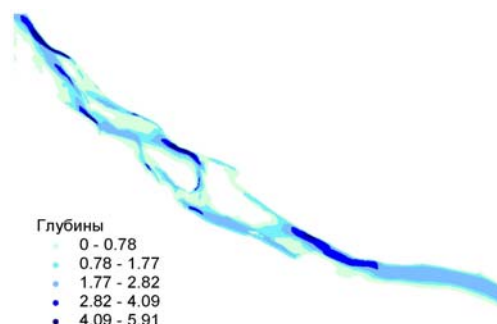


Рисунок 5 – Расчет глубин в период межени

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для выбора варианта расчистки русла с использованием компьютерной модели участка расчистки были выполнены расчеты кинематики потока и русловых переформирований при различных расположениях дноуглубительных прорезей.

Если проанализировать положение динамической оси потока на исследуемом участке реки в бытовых условиях, то можно предположить, что крутые повороты потока в русле с островами, наряду с перемежающимися перекатами и плесами, вызывающими уменьшение скорости течения, являются непосредственной причиной заторообразования. При ненарушенном ледовом покрове на данном участке влекущей силы волны вскры-

тия недостаточно как для разрушения сплошного ледяного поля, так и для транспортировки ранее разрушенного льда. В случае расчистки русла путем разработки системы прорезей по схеме на рис. 3 обеспечивается спрямление динамической оси как при межженных расходах, так и при расходах, характерных для периода весеннего половодья. Расчеты аккумуляции наносов показали, что при выбранном варианте системы прорезей в целом обеспечивается гидродинамическая промывка прорезей, и даже их размыв в нижних частях (рис. 6). Возможное заиливание на начальных участках прорезей необходимо своевременно выявлять (путем разработки системы мониторинга) и устранять, изымая сравнительно небольшие объемы речного аллювия в верхних частях прорезей.

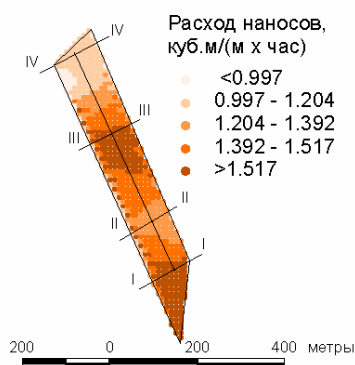


Рисунок 6 – Расход наносов в прорези № 2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчеты показали, что на исследуемом участке р. Обь у сел Сибирка и Кучук возможно создание благоприятных условий для транзита ледяного материала. Данная цель может быть достигнута спрямлением крутых поворотов путем разработки русловыправительных прорезей. Дополнительной возможностью создания сосредоточенного водного потока может быть частичное перекрытие вынимаемым речным аллювием левого рукава на участке разветвления потока. Отсыпка аллювия в район спускающегося побочня также решает задачу требуемого переформирования кинематической структуры речного потока. Разовое изъятие значительных объемов речного аллювия на участке расчистки не вызовет существенной посадки уровня реки. Проведение проектируемой расчистки русла также обеспечит благоприятные условия для судоходства.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействию малых форм предприятий в научно-технической сфере (проект № 5752).

ЛИТЕРАТУРЫ

1. Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. - Л.: Гидрометеиздат, 1987. - 248 с.
2. Бузин В.А. Затопы льда и затопные наводнения на реках. - С.-Пб.: Гидрометеиздат, 2004. - 204 с.
3. Методические указания по борьбе с затопами и зазорами льда. - Л.: Энергия, 1970, ВСН-028-70. - 151 с.
4. Бреховских В.Ф., Былина Ю.А., Перекальский В.М. Моделирование процесса распространения загрязняющих веществ в Северной Двине // Водные ресурсы. - 2000. - Т. 27. - № 5. - С. 574-578.
5. Квон В.И., Квон Д.В., Зонон С.Д., Карамышев В.Б. Численный расчет течений и дальнего переноса примеси в равнинных речных водохранилищах // ПМТФ. - 2003. - Т. 44. - № 6.
6. Мониин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Т.1. - СПб.: Гидрометеиздат, 1992. - 694 с.
7. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. - М.: Мир, 1990. - 726 с.
8. Askers P., White W.R. Sediment Transport: New Approach on Analysis // Journal of Hydraulics division, ASCE. -No. HY 11. -1973.
9. Engelund F., Hansen E. A monograph on Sediment transport In Alluvial Streams // Nordic Hydrology. - No 7. -1967.
10. Van Rijn Leo C. Sediment transport by Currents and Waves. The Handbook. - Delft Hydraulics, 1989. - 360 p.
11. Ковеня В.М. Разностные методы решения многомерных задач. Курс лекций. - Новосибирск: Изд-во НГУ, 2004. - 145 с.
12. Пинчуков В.И., Шу Ч.-В. Численные методы высших порядков для задач аэрогидродинамики. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. - 231 с.
13. Беликов В.В., Семенов А.Ю. Численный метод распада разрыва для решения уравнений теории мелкой воды // ЖВМиМФ. - 1997. - Т. 37. - № 8. - С. 1006-1019.
14. Карамышев В.Б. Монотонные схемы и их приложения к газовой динамике. - Новосибирск: Изд-во НГУ. 1994. - 109 с.
15. Зиновьев А.Т., Марусин К.В., Шлычков В.А., Затицацкий М.В. Численное моделирование динамики речного потока на участке размываемого русла // Материалы VIII Всероссийской конференции "Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф", 2005, Кемерово, (www.ict.nsc.ru/ws/hazards2005/).
16. Зиновьев А.Т., Марков А.М., Шибких А.А., Котовщиков А.В. Построение цифровой модели рельефа русла р. Катунь для математического моделирования русловых процессов // Фундаментальные и прикладные исследования по приоритетным направлениям науки и техники. Ч.2 – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2005. -С. 176-178.