

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕКИ ВЯТКИ В СРЕДНЕМ ТЕЧЕНИИ: ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

© 2013 г. А.П. Лепихин^{1,2}, Т.П. Любимова³, Ю.С. Ляхин^{1,2},
А.А. Тиунов¹, А.В. Богомолов¹, Д.И. Перепелица¹,
Я.Н. Паршакова³

¹ Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь

² Камский филиал ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Пермь

³ Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь

Ключевые слова: гидродинамическое моделирование, уречный и скоростной режимы, добыча нерудных строительных материалов, распространение загрязнений, р. Вятка.

Рассмотрена возможность использования гидродинамической модели для оценки изменений скоростного и уречного режимов при добыче нерудных строительных материалов в русле и на пойме р. Вятки в районе городов Кирово-Чепецка и Кирова. Представлены механизмы формирования и распространения загрязнений р. Вятки и результаты модельных расчетов при промыве пойменных водных объектов.

Введение

В настоящее время остро стоит проблема анализа и регламентации техногенных воздействий на водные объекты для обеспечения устойчивого водопользования. Под техногенным воздействием, как это следует из [1], нужно рассматривать не только сброс сточных вод через декларируемые водовыпуски, но значительно более широкий круг воздействий. В этой ситуации требуется оценка разнообразных гидродинамических, гидравлических параметров водных объектов при различных экстремальных гидрологических режимах или значительных внешних воздействиях. Такие оценки достаточно полно могут быть получены только на основе использования адекватных моделей рассматриваемых объектов. При изучении водных объектов применяются и гидравлические (физические), и вычислительные модели. У каждого из этих классов моделей есть свои достоинства и недостатки. Однако учитывая, что за последние 30 лет производительность вычислительных систем возросла

более чем в 10^7 раз, по-видимому, наиболее перспективное направление, основанное на методах математического моделирования.

В настоящее время для описания поверхностных водных объектов используется весьма широкий спектр моделей – от нульмерных до нестационарных моделей в 3D-постановке. Их общая классификация представлена в [2]. Выбор каждой из этих моделей определяется характером решаемой задачи, полнотой и детальностью задания исходных данных и характеристиками доступных вычислительных средств.

Постановка задачи

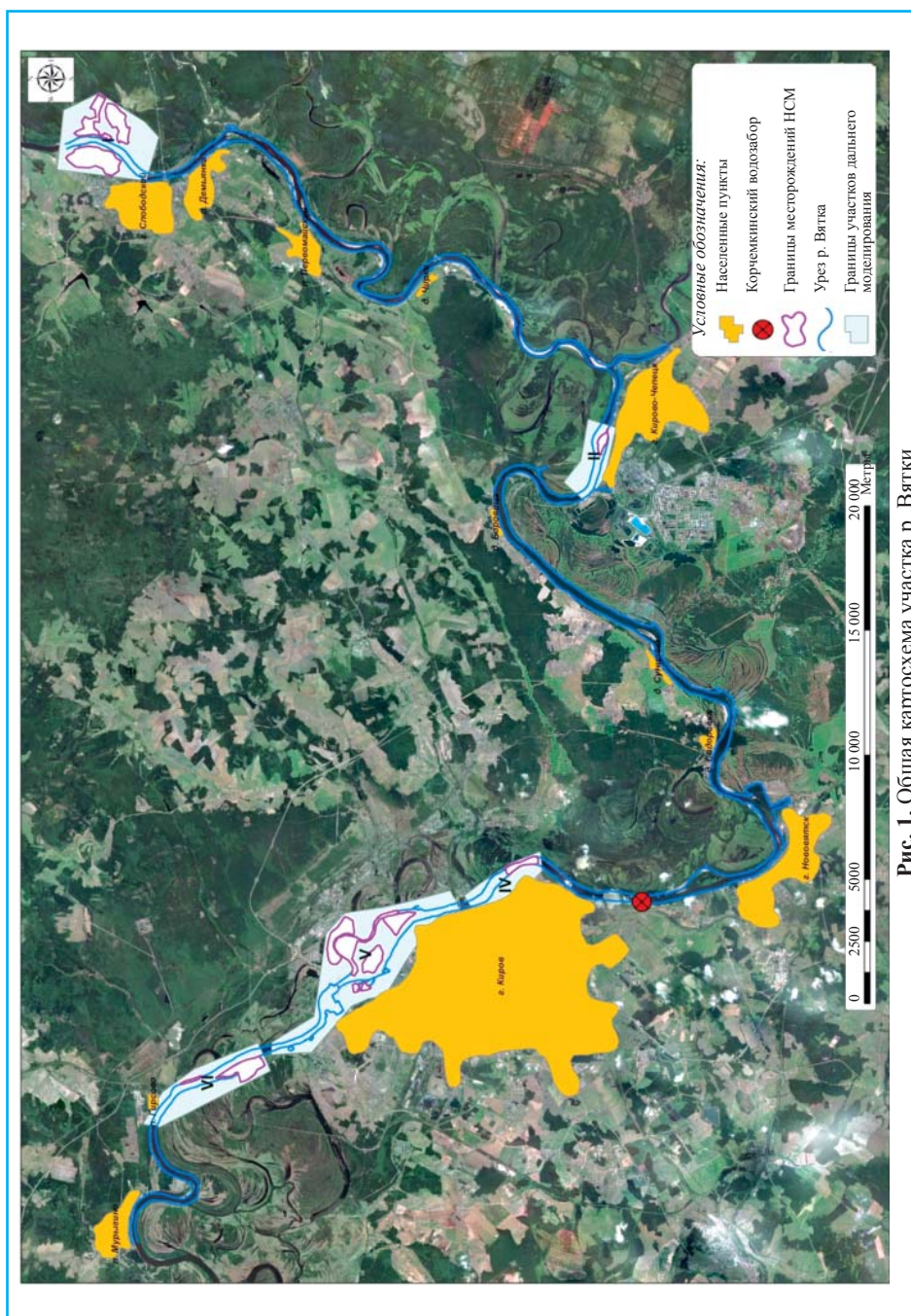
Для решения широкого круга водохозяйственных задач для техногенно нагруженного участка р. Вятки от г. Слободского до пос. Мурыгино протяженностью 100 км разработана двухмерная гидродинамическая модель. Основная задача состояла в оценке гидродинамических характеристик потока при различных гидрологических режимах, что необходимо для оценки динамики русловых процессов, а также последствий крупномасштабной добычи песчано-гравийной смеси из русловых карьеров.

Отдельно ставили задачу оценки прогнозирования уровня загрязнения р. Вятки в районе водозабора г. Кирова при затоплении и промывке пойменных озер в районе г. Кирово-Чепецка. Общая картосхема участка р. Вятки, для которого построена действующая гидродинамическая модель, представлена на рис. 1.

При проведении вычислительных экспериментов базовой является гидродинамическая модель в 2D-приближении, использующая схему «мелкой» воды и реализованная в программном продукте SMSv.10.1 [3]. Описание данной гидродинамической модели и ее использование при решении различных водохозяйственных задач представлено в [2, 4, 5].

Для получения морфометрических данных р. Вятки на рассматриваемом участке водного объекта была выполнена батиметрическая съемка, определены топографические характеристики затопляемой поймы [6]. Для верификации параметров модели путем сопоставления расчетных и фактически наблюдаемых гидравлических данных были выполнены гидрометрические съемки водного объекта в летний меженный период 2011–2012 гг. [5].

На рассматриваемом участке реки имеется редкая сеть гидрометрических станций и постов, поэтому для эффективного задания начальных и граничных условий для моделей в двухмерной постановке была также использована одномерная модель Сен-Венана на основе программного продукта HEC-RAS [7].



Анализ последствий крупномасштабной добычи нерудных строительных материалов

Актуальной задачей, решаемой на основе созданной модели, является оценка гидродинамических последствий крупномасштабных разработок месторождений нерудных строительных материалов (НСМ). Добыча из водных объектов в больших объемах речного аллювия в качестве НСМ – один из наиболее значимых факторов негативного воздействия на состояние водного объекта и его хозяйственное использование [8]. Масштаб и характер разработок месторождений НСМ в первую очередь регламентируется возможными последствиями изменения гидрологического режима водотока. В качестве лимитирующих факторов, как правило, рассматривают уровенный и скоростной режимы. Так как р. Вятка характеризуется существенной внутригодовой и межгодовой изменчивостью, лимитирующий критерий должен относиться к соответствующему гидрологическому периоду.

Снижение уровня воды (посадка/просадка уровня) вследствие увеличения пропускной способности русла лимитируется сохранением устойчивости функционирования водохозяйственных объектов, в первую очередь водозаборов, в гидрологические периоды с наиболее низкими уровнями воды в естественных условиях. Изменение скоростного режима лимитируется обеспечением неразмывающих скоростей потока, а также неактивизацией эрозионной активности. В качестве лимитирующего гидрологического периода рассматривается период с наибольшими скоростями течения – прохождение весеннего паводка. Поэтому гидродинамические расчеты (вычислительные эксперименты) проводили для двух характерных гидрологических периодов: летне-осенней межени 50 % обеспеченности; весеннего половодья 5 % обеспеченности. Расчеты проводили на основе лицензионного программного продукта SMS v. 10.1 с использованием расчетного модуля TUFLOW [9].

Для каждого рассматриваемого участка р. Вятки получены 4 варианта расчетов:

- 1) для меженного периода в естественных условиях по состоянию на лето 2011 г.;
- 2) для меженного периода при возможном проведении планируемых мероприятий по добыче НСМ как в русле, так и на пойме р. Вятки;
- 3) для периода весеннего половодья в естественных условиях;
- 4) для периода весеннего половодья при проведении планируемых работ по добыче НСМ.

Сопоставляя уровенный и скоростной режимы рассматриваемого водотока на основе выполненных вычислительных экспериментов, представляется возможным достаточно объективно оценить их возможные изменения

при условии проведения добычи НСМ в русле и пойме и дать оценки о целесообразности проведения данных работ.

Характеристики рассмотренных месторождений НСМ в пределах расчетных участков представлены в табл. 1. Следует отметить, что моделирование проводили для условий полной выработки каждого из карьеров (наихудшие условия). Средняя глубина определена через отношение объема к площади. Далее данные карьеры были «вписаны» в рельеф русловой и пойменной частей в единой системе высот и координат. Строили новую модель рельефа территории и проводили расчет.

Так как наиболее значительные запасы НСМ расположены в пределах II и V участков, наибольший интерес представляют результаты моделирования именно для этих участков. Для участка II актуальным является вопрос целесообразности срезки расположенного на данном участке реки острова, так он способствует заилению оголовков водозабора ООО «ЭСО КЧХК». Срезка острова приводит к существенной перестройке поля течения в русловой части р. Вятки как во время прохождения паводка, так и в весенний период. Как следует из рис. 2б, зона максимальных скоростей смещается к левому берегу, тем самым снижается вероятность заиления оголовков водозабора. Кроме того, существенно снижается скорость течения у правого берега и, как следствие, снижается интенсивность его размыва.

Максимальная величина просадки уровня вследствие срезки острова во время прохождения весеннего паводка обеспеченностью 5 % составит на данном участке 3–5 см. В то же время в летне-осеннюю межень значение просадки достигнет 15–18 см. Таким образом, вследствие срезки острова произойдет уменьшение процессов заиления у левого берега (ниже по течению) и уменьшение эрозионной активности у правого берега. Учитывая, что снижение уровня воды на рассматриваемом участке будет незначительным, срезка острова не будет иметь отрицательных последствий.

Для расположенного в черте г. Кирова участка V крупномасштабная добыча НСМ в русле р. Вятки приведет к существенному перестроению гидродинамического поля потока. При длине около 10 км на нем располагается 6 месторождений НСМ с суммарными разведанными запасами около 17 млн м³. Карьеры располагаются как на пойме, так и в русловой, и островной частях.

В период летне-осенней межени при изъятии аллювия из карьеров происходит кардинальное перестроение структуры потока. В Заводской воложке скорости падают до 0,4–0,5 м/с и становятся меньше, чем в Боровской воложке. Над карьером возникают вихревые потоки и противотечения. После слияния рукавов р. Вятки скорости не превышают 1 м/с, в т. ч. и под

Таблица 1. Характеристики месторождений НСМ в пойме и русле р. Вятки на участке от г. Слободской до пос. Мурыгино

№ п/п	№ расчетного участка	Наименование месторождения	Запасы (ресурсы), тыс. м ³ на 01.01.2011	Площадь карьера, тыс. м ²	Средняя глубина карьера при полной выработке, м	Расположение
1		Слободское	6763	854	7,9	Пойма, левый берег
2	I	Слободское («Западный-1»)	1364	783	1,7	Пойма, левый берег
3		Слободское («Западный-2»)	6998	1552	4,5	Пойма, правый берег
4	II	Девятьярское	1200 (оценочная)	220	5,5	Полуостров, левый берег, 727 км с/х
5	IV	Вересники (русло)	1900	320	6	Русло р. Вятки, 786,2–787,5 км с/х
6		Симановское-2	1667	540	3,1	Приверх Симановского острова
7		Симановское (остров)	4994	580	8,6	Симановский остров
8		Боровская воложка	4547	1020	4,5	Рукав Боровская воложка
9	V	Гнусинское	5177	835	6,2	Пойма, правый берег
10		Симановское (Миронов луг – Северное)	417	69	6	Пойма, левый берег
11		Симановское (Миронов луг)	450	77	6	Пойма, левый берег
12		Ломиховское	5200	868	6	Пойма, левый берег, 670,8–673,1 км с/х
13	VI	Искринское	300	74	4	Приурезная часть, правый берег, 669,4–670,3 км с/х

Примечание: с/х – километраж по судовому ходу.

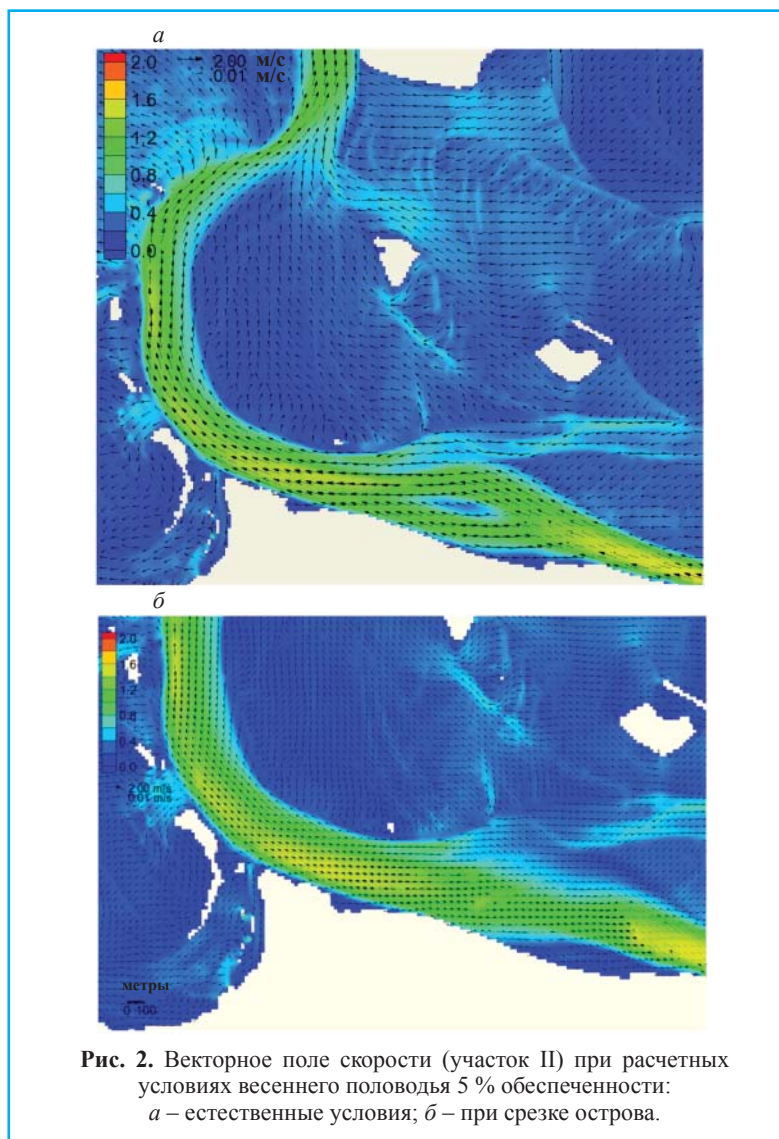
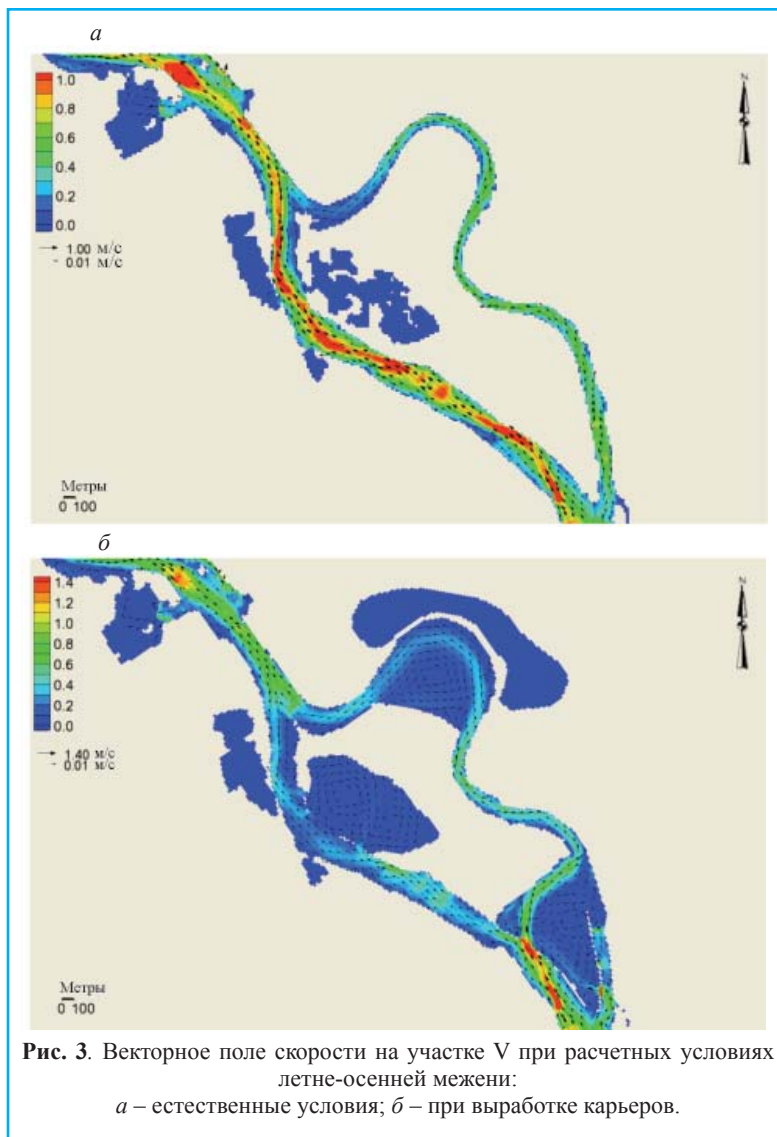


Рис. 2. Векторное поле скорости (участок II) при расчетных условиях весеннего половодья 5 % обеспеченности: а – естественные условия; б – при срезке острова.

Филейским автодорожным мостом (рис. 3а). Такое перестроение структуры потока приводит к существенным просадкам уровня в летне-осенний период – до 50 см. Зона распространения просадок отмечается с 678 до 685 км судового хода. В нее попадают оба автодорожных моста г. Кирова (рис. 3б).

В период весеннего половодья ввиду подтопления территории изменения в структуре течений не столь значительны. Отмечается смещение линий максимальных скоростей по Боровской воложке. Они достигают значений 1,0–1,2 м/с. Максимальные скорости в естественных условиях и при выра-



ботке карьеров наблюдаются под Филейским мостом и составляют более 2,0 м/с. Просадка уровня не превышает 10–12 см (рис. 4).

Таким образом, добыча НСМ на стрелке острова Симановский приведет к перестроению структуры: поток будет адаптироваться к новым морфометрическим условиям и, как следствие, изменится конфигурация острова.

Ввиду существенных просадок уровня, особенно в меженный период, приводящих к существенному затруднению других видов водопользования,

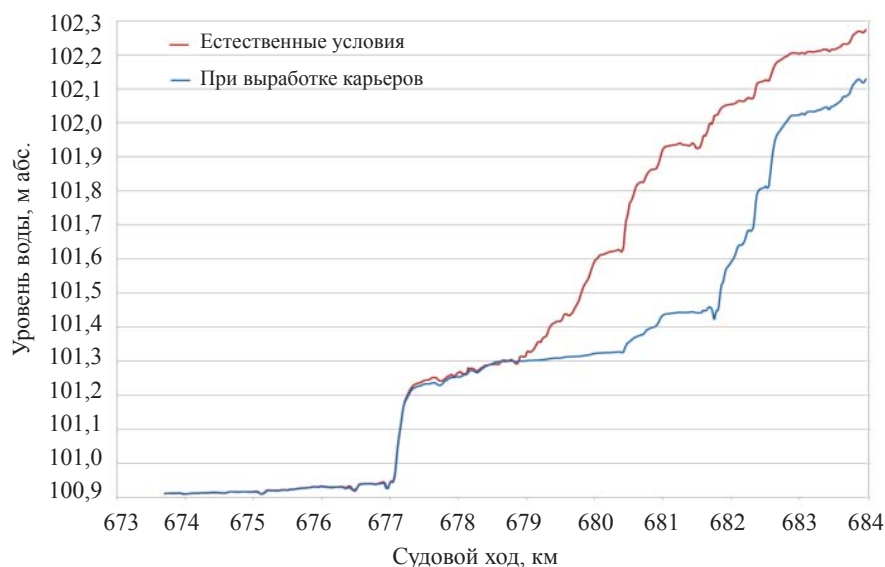


Рис. 4. Совмещенные кривые свободной водной поверхности р. Вятки (участок V) во время летне-осенней межени.

в первую очередь водозаборов, нецелесообразно проводить добычу НСМ на месторождениях Боровская воложка, Гнусинское, Миронов луг.

Вследствие существенных изменений гидродинамического режима потока, в первую очередь просадки уровня более 50 см, разработка рассматриваемых месторождений НСМ в их полном объеме невозможна.

Прогнозирование уровня загрязнения р. Вятки в районе Корчемкинского водозабора

Более сложной задачей является прогнозирование и оценка возможного содержания загрязняющих веществ в районе основного питьевого водозабора г. Кирова – Корчемкинского водозабора. Это связано с промывом загрязненных пойменных водоемов, расположенных в районе г. Кирово-Чепецка, при прохождении достаточно высоких весенних паводков (рис. 5).

На данном участке в пойме р. Вятки расположено несколько водоемов – озера Березовое, Бобровое и карьер оз. Березовое. В меженный период они накапливают значительное количество загрязненных подземных вод, содержащих большое количество аммонийного азота.

Суммарная площадь указанных водоемов около $1,9 \cdot 10^5 \text{ м}^2$ при средней глубине около 7 м. По ориентировочным оценкам в них может содержаться более 1000 т аммонийного азота. Таким образом, данные водные объек-

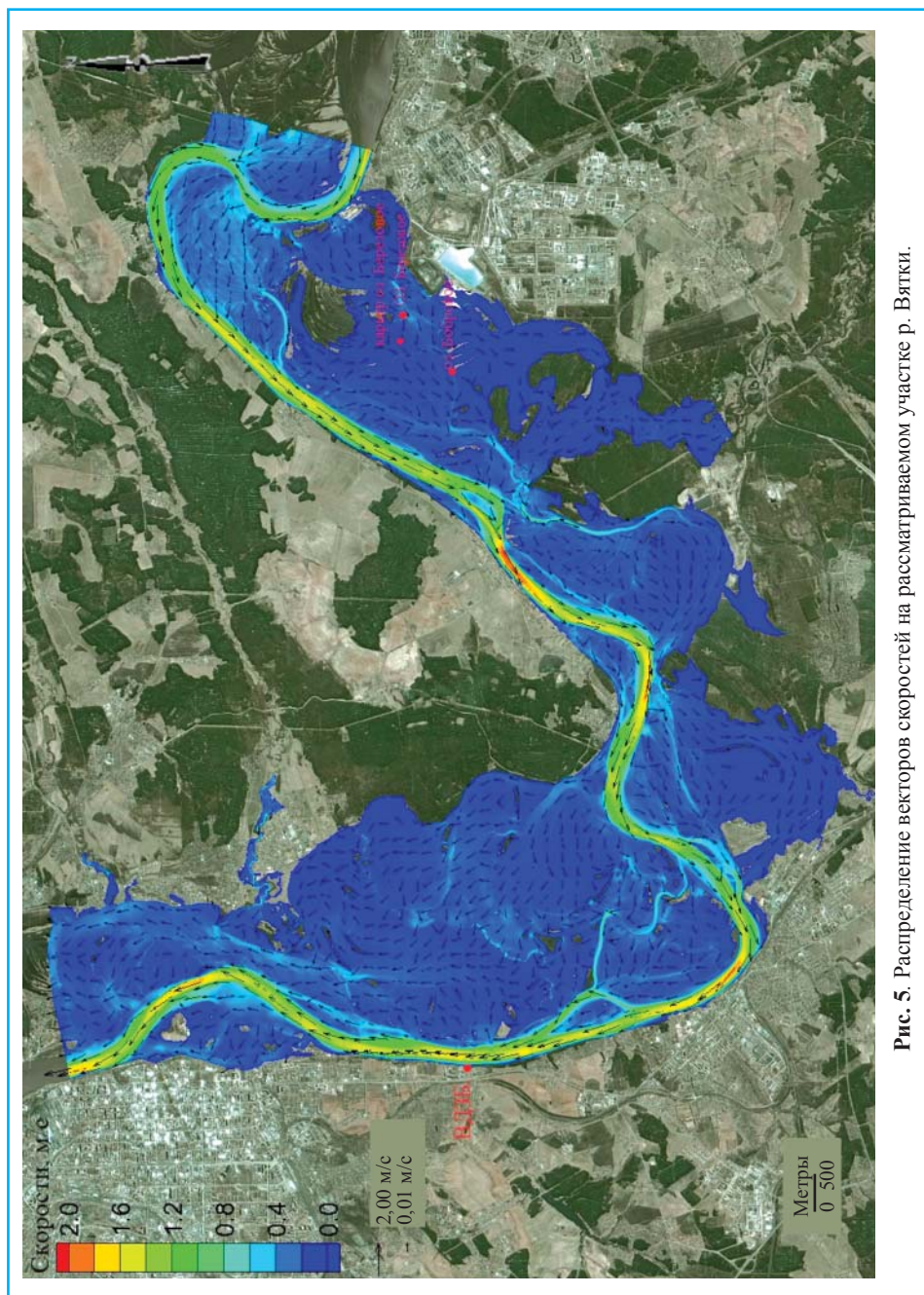


Рис. 5. Распределение векторов скоростей на рассматриваемом участке р. Вятки.

ты являются своеобразными аккумулятивными источниками загрязнения, действующими при прохождении достаточно интенсивных весенних паводков. Необходимо решить задачи переноса загрязняющих веществ в р. Вятку вследствие их выноса при «промывке» пойменных водоемов.

Задача распространения загрязнений в р. Вятке из-за значительного интенсивного вертикального перемешивания может решаться в двухмерной постановке в приближении «мелкой» воды или даже одномерной постановке. Однако при решении задачи промывки рассматриваемых пойменных водоемов необходимо учитывать распределение загрязняющих поллютантов по глубине. Поэтому для получения достаточно строгих оценок необходимо использовать модели в 3D-постановке. Особенности применения модели в 3D-постановке для решения задач речной гидравлики рассматривались в [2].

Однако для предварительной оценки максимальных концентраций загрязняющих веществ в районе данного водозабора, что имеет принципиальное значение для обеспечения устойчивости питьевого водоснабжения, задача может быть рассмотрена более просто. Для ее решения принципиальное значение имеет оценка параметров «выноса» загрязняющих веществ из рассматриваемых пойменных водоемов. При оценке максимальной интенсивности выноса примем допущение, что содержание загрязняющих веществ в поверхностном слое водоемов постоянно на протяжении начального рассматриваемого периода.

В этом случае удельная интенсивность выноса загрязняющих веществ составляет

$$j \cong \frac{K_{zz}}{H} (C_0 - C_\phi), \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), \quad (1)$$

где C_0 – содержание рассматриваемых загрязняющих веществ в поверхностном слое водоема до начала их промывки;

C_ϕ – фоновое содержание загрязняющих веществ в р. Вятке;

K_{zz} – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии.

Как показано в [9], $K_{zz} \cong 0,07\kappa V_*H$,

где V_* – динамическая скорость потока;

H – глубина потока на затопленном водоеме;

κ – постоянная Кармана, $\kappa = 0,41$.

Так как $C_0 \gg C_\phi$, то учитывая, что $(V_*/V_{cp}) = g^{0,5}/C_{ш}$, имеем

$$j = 0,07 \cdot V_* \cdot \kappa \cdot C_0 \cong \frac{0,07V \cdot \sqrt{g}}{C_{ш}} \cdot \kappa \cdot C_0, \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}),$$

где $C_{ш}$ – коэффициент Шези; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

В простейшем случае принимаем, что $C_0 \gg C_\phi$, а формирование максимальной интенсивности выноса загрязняющих веществ из рассматриваемых

мых водоемов происходит при промывке верхнего достаточно тонкого слоя воды, поэтому максимальная интенсивность выноса загрязняющих веществ q_{\max} (г/с) имеет вид:

$$q_{\max} = j_{\max} \cdot F_{\text{эф}}, \quad (2)$$

где $F_{\text{эф}}$ – эффективная суммарная площадь рассматриваемых пойменных водоемов.

Рассчитав распределение поля течения на рассматриваемом участке р. Вятки при затоплении поймы на основе гидродинамического моделирования в 2D-постановке, нетрудно оценить интенсивность данного источника загрязнения.

На рис. 5 представлено распределение поля скоростей течения при характерных уровнях воды в р. Вятке для паводка в мае 2012 г. Учитывая, что суммарная площадь озер составляет $1,9 \cdot 10^5$ м², и принимая, что содержание аммонийного азота в поверхностных слоях составляет ~600 мг/л или 600 г/м³, при максимальной удельной интенсивности выноса аммонийного азота ~0,5 г/м²·с интенсивность выноса будет составлять ~100 кг/с. При данной интенсивности выноса аммонийного азота должна происходить очень быстрая «промывка» верхнего приповерхностного слоя воды в пойменных загрязненных озерах. В этом случае поступление загрязняющих веществ в р. Вятку резко снижается, что приводит к существенному падению содержания аммонийного азота в районе водозабора при сохранении или даже повышении расхода воды.

При полном перемешивании и продолжительном действии источника загрязнения $T_{\text{ист}} \gg T_{\text{доб}}$ и $C_0 \gg C_{\text{ф}}$, тогда

$$C_{\max} \cong \frac{q_{\max}}{Q}, \quad (3)$$

где $T_{\text{доб}}$ – характерное время добега.

В рассматриваемом случае необходимо учитывать снижение содержания загрязняющих веществ за счет продольной дисперсии, поэтому

$$C_{\max} \cong \frac{q_{\max}}{Q} \lambda_d, \quad (4)$$

где C_{\max} – максимальная концентрация в створе водозабора;

Q – расход воды в реке (м³/с);

λ_d – коэффициент снижения концентраций загрязняющих веществ в расчетном створе водотока вследствие продольной дисперсии.

Модель исходит из предположения, что все время из водоемов поступает один поток вещества $q_{\max} = j_{\max} F$. И этот поток поступает во весь расход воды в реке. Из уравнения баланса следует

$$q_{\max} T_{\text{ист}} = M = FHC_0,$$

где M – масса загрязняющего вещества в озерах. Отсюда

$$T_{\text{ист}} = FHC_0/q_{\text{max}} = H^2/K_{zz}.$$

В первом приближении λ_d можно оценить следующим образом:

$$\lambda_d \sim T_{\text{ист}} / \left(T_{\text{ист}} + \frac{\left(\frac{K_{xx} \cdot L_{\text{рас}}}{V} \right)^{1/2}}{V} \right) \sim \frac{1}{1 + \frac{\left(\frac{K_{xx} \cdot L_{\text{рас}}}{V} \right)^{1/2}}{V \cdot T_{\text{ист}}}}, \quad (5)$$

где $T_{\text{ист}}$ – продолжительность истечения из водоемов в реку;

K_{xx} – величина коэффициента продольной дисперсии в реке;

$L_{\text{рас}}$ – протяженность реки от участка, где происходит поступление загрязненной воды из водоемов, до контрольного створа;

V – средняя скорость течения на этом участке.

Предполагается, что протяженность загрязненного участка, первоначально равная $V \cdot T_{\text{ист}}$, увеличится до величины

$$\left(\frac{K_{xx} \cdot L_{\text{рас}}}{V} \right)^{1/2}.$$

В более общем случае имеем, когда расчетная область разделяется на N расчетных участков

$$\lambda_d \cong \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^N \frac{\left(\frac{K_{xxi} \cdot L_{\text{рас}i}}{V_i} \right)^{1/2}}{V_i \cdot T_{\text{ист}}}}, \quad (6)$$

где K_{xxi} – значение коэффициента продольной дисперсии на i -м участке;

L_i, V_i – соответственно длина и скорость течения на i -м участке.

При распространении загрязнений от затопленных озер до рассматриваемых питьевых водозаборов выделяется два участка с принципиально различным гидравлическим режимом. Первый, как следует из рис. 5, пойменный участок с малыми глубинами и низкой скоростью течения. Второй участок – русловой со значительной глубиной и высокой скоростью течения.

Принимая, согласно [9]:

$$\frac{K_{xx}}{V_* \cdot H} \sim 200V_1 \sim 0,1 \text{ м/с} - \text{характерная скорость течения на затопленной пойме};$$

$H_1 \sim 0,5$ м, $L_{\text{пойм}} \sim 6 \cdot 10^3$, где $L_{\text{пойм}}$ – характерная протяженность пойменного участка;

$L_{\text{рус}}$ – характерная протяженность руслового участка $\sim 12 \cdot 10^3$ м;

$C_{\text{ш}} \sim 20 \frac{\text{м}^{1/2}}{\text{с}}$, $H \cong 1$ м, $L \sim 12 \cdot 10^3$, $C_{\text{м}} \sim 30 \text{ м}^{1/2}/\text{с}$.

В то же время имеем $T_{\text{ист}} = (H^2/K_{zz})$, где $T_{\text{ист}}$ – характерное время промывки верхнего загрязненного слоя в водоемах; H – толщина верхнего промываемого слоя.

Нетрудно видеть, что при данных значениях гидравлических характеристик на пойменных и речных участках, при подстановке данных значений в (6), имеем

$$\lambda_d = \frac{1}{1+5+2} = 1/8.$$

В этом случае $C_{\text{max}} \sim (1,9 \cdot 10^5 / (3,3 \cdot 10^3 \cdot 8)) \sim 7,2$ мг/л.

Данное значение, как следует из рис. 6, хорошо согласуется с фактически наблюдаемым максимальным значением содержания аммонийного азо-

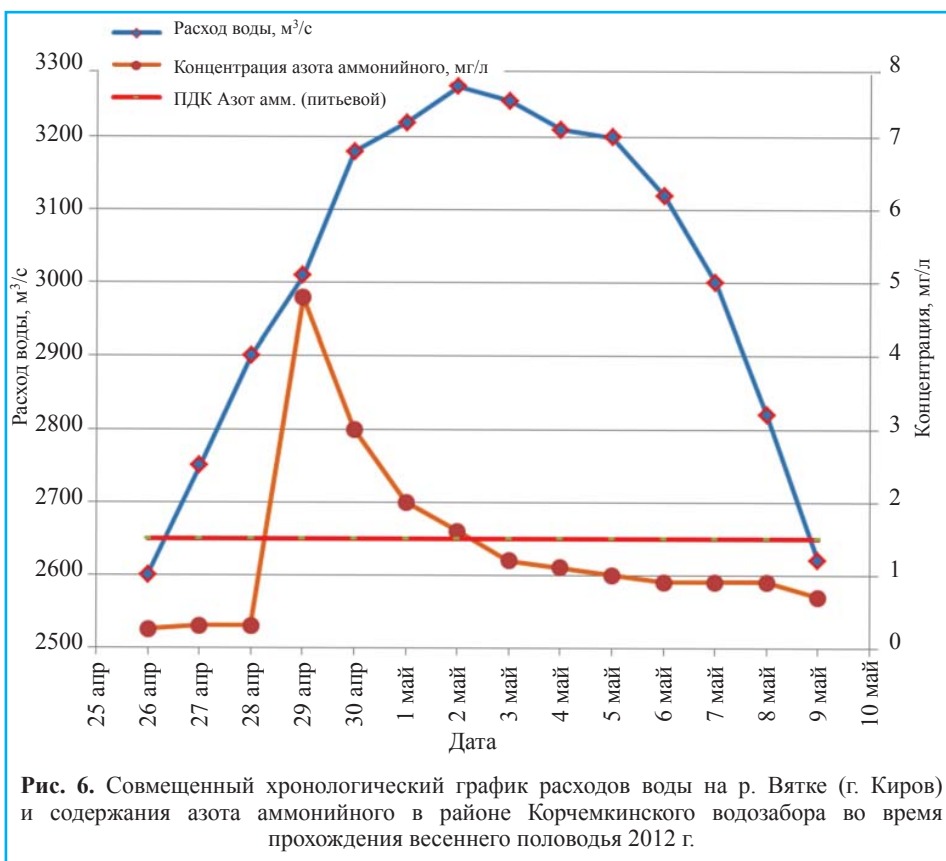


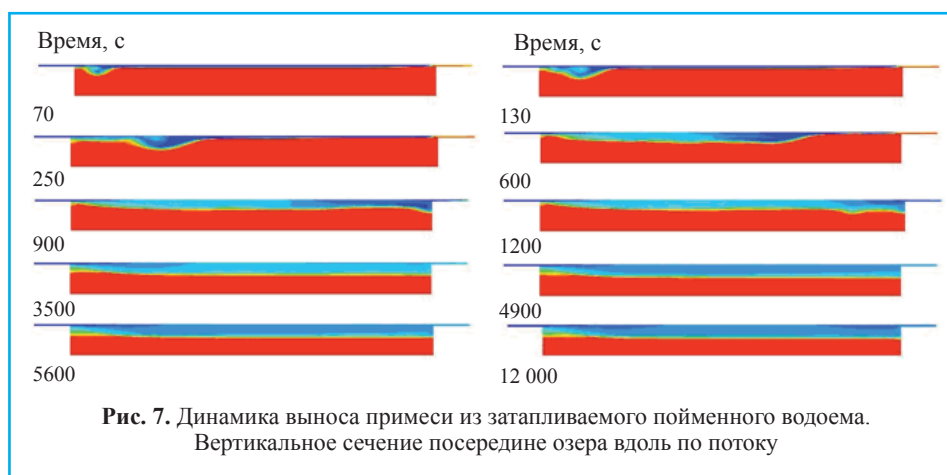
Рис. 6. Совмещенный хронологический график расходов воды на р. Вятке (г. Киров) и содержания азота аммонийного в районе Корчемкинского водозабора во время прохождения весеннего половодья 2012 г.

та, учитывая характер задания исходных параметров, а сам характер распределения $C(t)$ подтверждает рассмотренный выше механизм формирования экстремально высоких загрязнений в р. Вятке.

Учитывая важность данной задачи для устойчивого водообеспечения г. Кирова в период прохождения весенних паводков, было проведено моделирование процесса промывки пойменных водоемов в 3D-постановке. Для описания рассматриваемого процесса использовали пакет Fluent6.3.26. Характеристика и опыт его применения для описания гидродинамики поверхностных водных объектов был рассмотрен в [10, 11].

При моделировании рассматривали затопляемый во время прохождения весеннего паводка пойменный водоем глубиной 8 м, шириной 20 м, длиной 100 м в период паводка. Принимали, что глубина потока воды над затопленным водоемом составляет 0,5 м, а его скорость 0,2 м/с. Численное моделирование проведено в рамках нестационарного подхода с использованием $k-\varepsilon$ -модели турбулентности. Результаты вычислений представлены на рис. 7. Значительное изменение концентрации в водоеме наблюдается в течение первых двух часов, затем быстрая стадия заканчивается и в дальнейшем концентрация меняется медленно. Мощность (глубина) промываемого слоя, в котором наблюдается максимальное снижение концентрации загрязняющих веществ за первые 2 часа, составляет 2–3 м.

В дальнейшем для повышения надежности данных прогнозных оценок, имеющих важное значение для функционирования основного питьевого водозабора г. Кирова, необходима разработка постоянно действующей гидродинамической модели для данного участка р. Вятки в сопряжении с моделями промывки загрязненных пойменных водоемов. При этом данные модели должны строиться уже в 3D-постановке, как это уже использовалось в [10, 11].



Заключение

Разработанная гидродинамическая модель р. Вятки позволяет решить ряд важных для водопользователей данного региона задач. На ее основе проведена оценка последствий крупномасштабной добычи из русла реки нерудных строительных материалов. Выполненные расчеты позволили оценить возможные изменения как для скоростного, так и для уровненного режима водного объекта вследствие добычи НСМ для различных лимитирующих гидрологических условий.

Исследован механизм и выполнен модельный расчет резкого увеличения содержания загрязняющих веществ в воде р. Вятки в районе питьевого водозабора г. Кирова при прохождении весеннего половодья вследствие промывки загрязненных пойменных водоемов, расположенных в районе г. Кирово-Чепецка. Предложены пути совершенствования гидродинамических моделей для решения важных вопросов повышения устойчивости питьевого водоснабжения г. Кирова.

Благодарности. Авторы выражают признательность руководителям Отдела водных ресурсов по Кировской области Камского бассейнового водного управления А.С. Тимонову и Д.В. Дудину за предоставление материалов по загрязнению р. Вятки при прохождении весеннего паводка 2012 г. и активное участие в обсуждении проблем качества воды Корчемкинского водозабора (г. Киров).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания по разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты. Утв. Приказом МПР России от 12.12.2007 № 328.
2. Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Тиунов А.А. Численное моделирование разбавления и переноса высокоминерализованных рассолов в турбулентных потоках // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. № 5. С. 68–79.
3. Donnell B.P., Letter J.V., McAnally W.H. and others, «Users Guide for RMA2 Version 4.5» [09 Sept] 2009. Режим доступа: <http://chl.wes.army.mil/software/tabs/docs.htm>
4. Лепихин А.П., Перепелица Д.И., Тиунов А.А. Анализ и обоснование возможных схем защиты г. Кунгура от наводнений // Водное хозяйство России. 2007. № 2. С. 80–93.
5. Лепихин А.П., Перепелица Д.И., Тиунов А.А. Разработка схемы оптимизации использования Юмагузинского и Нугушского гидроузлов // Водное хозяйство России. 2009. № 2. С. 34–48.
6. Исследование русловых деформаций р. Вятка на участке от г. Слободского до пос. Мурыгино и разработка научно обоснованных рекомендаций по предотвращению их негативных воздействий // Отчет по НИР / ООО «УПНИИЭК и ВХ». Пермь. 2012.
7. HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual (CPD-69) / Gary W. Brunner. Version 4.1. January 2010. 411 p.
8. Добыча нерудных строительных материалов в водных объектах. Учет руслового процесса и рекомендации по проектированию и эксплуатации русловых карьеров. СТО ФГБУ «ГТИ». 52.08.31–2012. СПб.: Изд-во Глобус, 2012.

9. TUFLOW User Manual. GIS Based 2D/1D Hydrodynamic Modelling. 2008 (Build 2008-08-AC). 475 p.
10. *Лепихин А.П., Любимова Т.П., Тиунов А.А., Паршакова Я.Н.* Использование стратификационных эффектов для улучшения качества воды, забираемой из поверхностных водных объектов на питьевые нужды // Водное хозяйство России. 2011. № 5. С. 89–104.
11. *Любимова Т.П., Лепихин А.П., Тиунов А.А., Паршакова Я.Н.* Численное моделирование разбавления и переноса высокоминерализованных рассолов в турбулентных потоках // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. № 5. С. 68–79.

Сведения об авторах:

Лепихин Анатолий Павлович, д. г. н., профессор, заведующий лабораторией, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (УрО РАН), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78; директор, Камский филиал ФГУП РосНИИВХ, 614007, г. Пермь, ул. Народовольческая, 33; e-mail: lepin49@mail.ru

Любимова Татьяна Петровна, д. ф.-м. н., профессор, заведующая лабораторией вычислительной гидродинамики, Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (УрО РАН), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail: lubimova@psu.ru

Ляхин Юрий Сергеевич, инженер, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (УрО РАН), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78; инженер, Камский филиал ФГУП РосНИИВХ, 614007, г. Пермь, ул. Народовольческая, 33

Тиунов Алексей Александрович, м. н. с., Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (УрО РАН), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78

Богомоллов Андрей Владимирович, аспирант, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (УрО РАН), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78; инженер, Камский филиал ФГУП РосНИИВХ, 614007, г. Пермь, ул. Народовольческая, 33; e-mail: whitewing85@mail.ru

Перепелица Дмитрий Ильич, м. н. с., Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (УрО РАН), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78

Паршакова Яна Николаевна, к. ф.-м. н., научный сотрудник, Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (УрО РАН), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1