

П.Ю. Пушистов¹, К.С. Алсынбаев¹, Н.В. Чемляков¹, М.Н. Вторушин²,
И.С. Ермаков², А.Н. Данилин², В.М. Болгова²,
О.Р. Казарина², Д.А. Лисовский²

Численное моделирование пространственно-временной структуры гидродинамики и характеристик качества воды реки Северная Сосьва

¹ Югорский НИИ информационных технологий,

² Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

Поступила в редакцию 17.08.2006 г.

Обсуждаются проблемы и приведены конкретные результаты построения базового моделирующего комплекса речной экосистемы на примере крупного притока Нижней Оби – р. Северная Сосьва, бассейн которой расположен на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры.

Введение

Выбор объекта моделирования (участок среднего течения р. Северная Сосьва между пос. Сосьва и пос. Сартынья) сделан с учетом следующих обстоятельств:

– р. Северная Сосьва имеет уникальную естественно-природную экосистему с эндемиками в составе биоты (в их числе тугун – знаменитая сосьвинская селедка) и одновременно с очень высокими, кратно превышающими ПДК, концентрациями соединений железа, меди, цинка и марганца,

– бассейн верхнего течения реки в ближайшие годы станет зоной активного промышленного освоения, что делает важной задачу разработки системы управления использованием и охраной водных и биологических ресурсов реки на базе информационно-моделирующих систем [1].

1. Подготовка данных

С помощью системы ArcGIS проведена оцифровка лоцманских и топографических карт береговой зоны, построена 3-D-модель участка реки в зоне применения базового моделирующего комплекса (БМК). Ядром БМК является применяемая Югорским НИИ информационных технологий с 2004 г. численная модель гидродинамики и качества воды – SE-QUAL-W2 [2, 3].

На базе указанных материалов была отработана методика создания модели расчетной сетки для водных объектов, к которым применяется БМК. Так, в частности, моделируемый участок р. Северная Сосьва от гидропоста Сосьва до гидропоста Сартынья разбит на 177 сегментов (длина каждого сегмента 400 м, длина участка реки 70800 м).

На основе данных с метеорологической станции, гидропоста Сосьва и гидропоста Сартынья Росгидромета за 2003 г. были сформированы БД

«Метеорология» (8 сроков в 1 сут), «Гидрология» (уровни и температура воды 1–2 срока в 1 сут, 33 расхода в год), «Гидрохимия» (6 проб с 04.03 по 05.10.03 на 25 показателей – гидропост Сосьва).

2. Результаты моделирования гидродинамики участка р. Северная Сосьва

Можно с уверенностью говорить о том, что БМК качественно правильно описывает динамику смены фаз гидрологического режима реки в 2003 г., включая зимнюю межень (январь – апрель), весенне-летнее половодье (май – июнь), летнюю межень (первая половина августа), осенний паводок (конец августа – первая половина сентября) и зимнюю межень (октябрь–декабрь). Определенное количественное представление о сравнении результатов расчетов и наблюдений дает табл. 1, в которой приведены наблюдаемые величины средней скорости течения в поверхностном слое на гидропостах Сосьва и Сартынья и прогностические значения продольной скорости (u) в поверхностном слое, рассчитанные в сегментах 2 и 176 соответственно.

Таблица 1

Сравнение результатов расчетов и наблюдений средних скоростей течений реки (м/с) на гидропостах Сосьва и Сартынья

Участок	Дата (2003 г.)				
	04.04	29.05	02.08	27.08	21.10
Гидропост Сосьва	0,12	1,04	0,22	0,61	0,34
Сегмент 2	0,34	1,20	0,31	0,81	0,48
Гидропост Сартынья	0,14	0,83	0,25	0,49	0,48
Сегмент 176	0,31	0,92	0,31	0,61	0,45

Сравнение результатов расчетов с данными измерения скорости течения на гидропостах Сосьва и Сартынья показывает достаточно хорошее совпа-

дение наблюдаемых и спрогнозированных моделью величин u в период открытой воды.

Проведен анализ чувствительности модели течения реки в период ледостава на основе сравнения результатов расчетов полей u , полученных с помощью БМК на сетке MC1 (177 сегментов, толщина слоя воды 0,2 м) для января 2003 г. При этом в роли варьируемых «параметров» БМК выступали модели расчета коэффициентов вертикальной вихревой турбулентной вязкости RNG и W2N, традиционно применяемые в модели CE-QUAL-W2. Дополнительно к этому была использована современная модель ТКЕ (так называемая «b – ε» модель). В табл. 2 показаны результаты измерений скоростей течения в подледном слое воды на гидропостах Сосьва и Сартынья и результаты расчетов u в сегментах 2 и 176 для указанных выше формулировок соответственно.

Таблица 2

Результаты моделирования скоростей течения в подледном слое воды при использовании различных моделей расчета коэффициентов вертикальной турбулентной вязкости

Пункт или сегмент	Скорость, м/с	Пункт или сегмент	Скорость, м/с
Гидропост Сосьва	0,14	гидропост Сартынья	0,17
Сегмент 2 (RNG)	0,55	сегмент 176 (RNG)	1,01
Сегмент 2 (W2N)	0,32	сегмент 176 (W2N)	0,37
Сегмент 2 (ТКЕ)	0,14	сегмент 176 (ТКЕ)	0,16

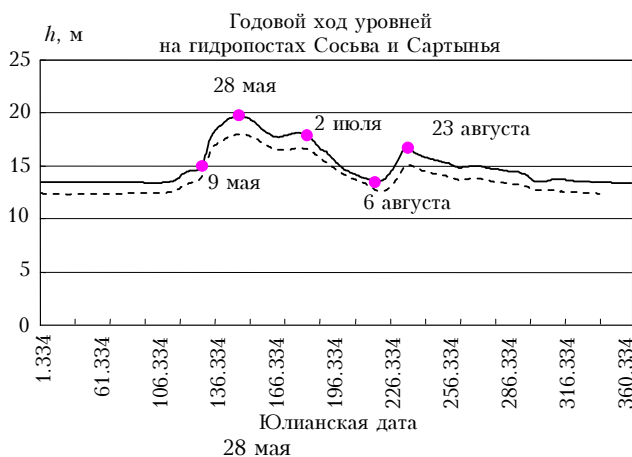


Рис. 1. Кривые распределения h и u в поверхностном слое в период весеннего паводка (28 мая) и летнюю межень (6 августа)

Анализ табл. 2 показывает заметное преимущество по точности расчетов поля u с помощью модели ТКЕ. Однако общее время расчетов вырастает почти на порядок за счет сложности модели ТКЕ по сравнению с моделями RNG и W2N.

Кривые горизонтального распределения уровней воды h и u в поверхностном слое 28 мая (пик половодья) и 6 августа (летняя межень) показаны на рис. 1.

Данных наблюдений для сравнительного анализа изменчивости u вдоль реки нет. Вместе с тем результаты расчетов полей u и w по моделям MC1 и W2N показывают высокую степень изменчивости полей скорости вдоль водотока.

Более детально результаты численного моделирования характеристик гидродинамики (поля продольной скорости и коэффициента вертикальной вихревой турбулентности) в пик половодья 28 мая и летнюю межень 6 августа можно увидеть на рис. 2.

Очевидно, что скорость переноса и диффузии загрязняющих веществ критически зависит от продольно-вертикальных составляющих скорости течения и степени турбулизации водотока. В большинстве 1-D-моделей расчета скорости используется очень грубая сеточная аппроксимация вдоль реки, что приводит к ряду недостатков, которые рассматриваются далее.

Допустимо ли столь грубое приближение, когда речь идет, например, о задаче прогноза скорости распространения загрязняющих веществ вдоль

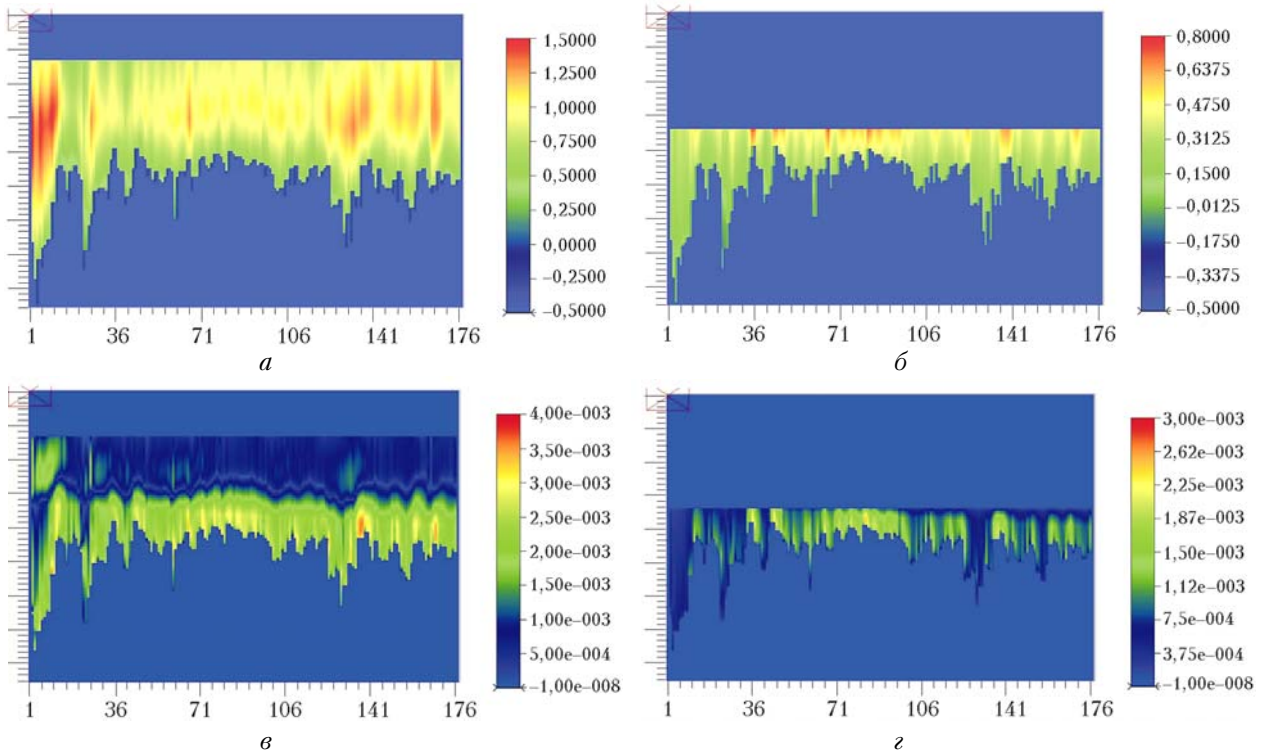


Рис. 2. Поля продольной скорости (*a*), м/с, и коэффициента вертикальной турбулентной вязкости (*b, g*), м²/с, на 28 мая в 12 ч и соответствующие характеристики на 6 августа (*б, z*). По горизонтальной оси – номера сегментов, по вертикальной – глубина реки

реки при аварийных залповых сбросах? Для ответа на этот вопрос нами была проведена серия из трех расчетов с помощью БМК на сетках с разным горизонтальным разрешением: сетка МС1 высокого разрешения (177 сегментов), сетка МС2 низкого разрешения (38 сегментов), сетка МС3 очень низкого разрешения (19 сегментов). Пример результатов расчета скорости течения в поверхностном слое в пик половодья (28 мая) при различных вариантах

горизонтального разрешения модели показан на рис. 3.

Анализ рис. 3 и других материалов данной серии численных экспериментов позволяет сделать однозначный вывод о том, что количественные характеристики поля течения очень сильно зависят от детализации геометрической модели руслового канала. Так, загробление горизонтальной аппроксимации на порядок приводит к увеличению макси-

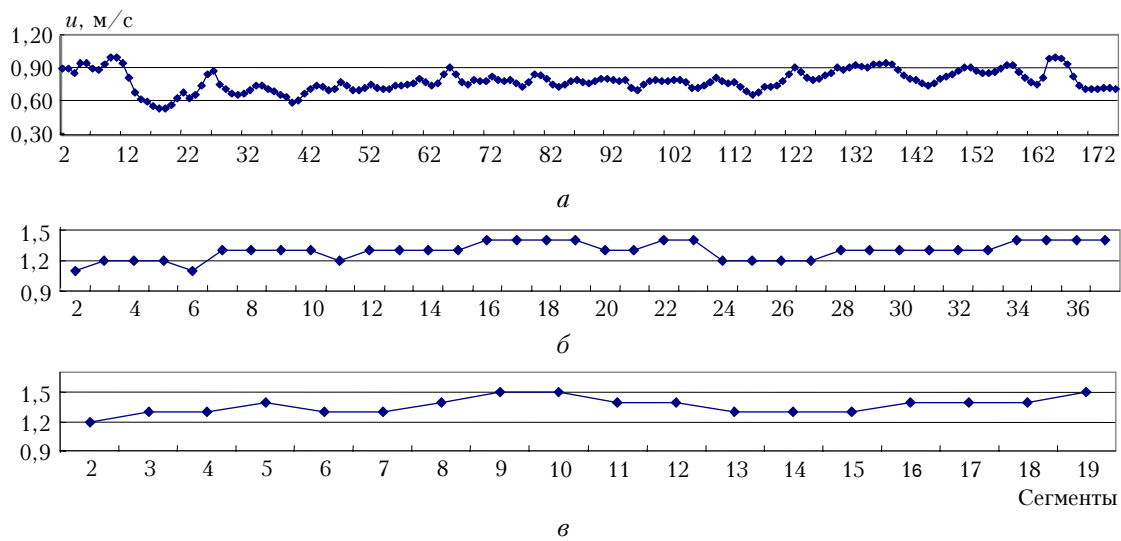


Рис. 3. Кривые распределения горизонтальной скорости потока в поверхностном слое в пик половодья (28 мая), полученные с различными моделями сетки: МС1 (*a*), МС2 (*б*), МС3 (*г*). Средняя скорость 0,78 м/с, время добегаания до пос. Сартынья 23,5 ч (*a*); 1,29 м/с, 15,3 ч (*б*); 1,37 м/с, 14,4 ч (*г*)

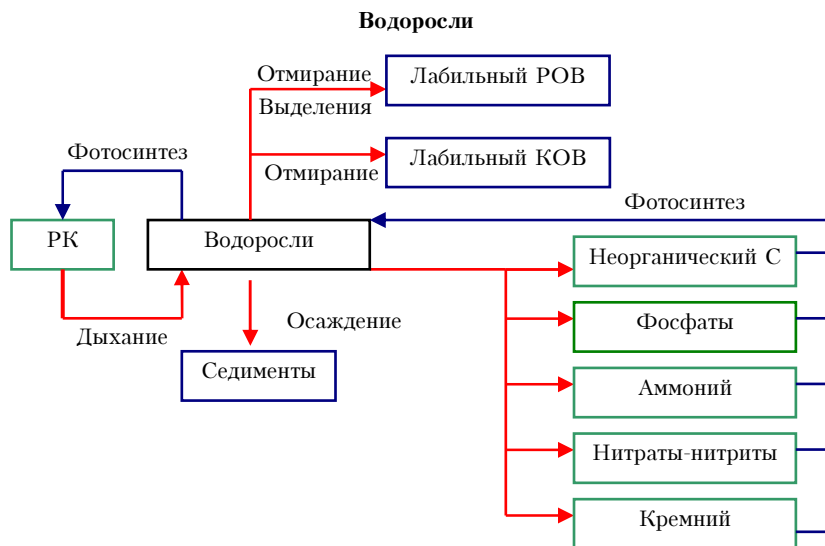
мальных величин поверхностной скорости почти в 2 раза. Это в свою очередь будет приводить к неверным оценкам скорости и времени добегания и большим ошибкам в прогнозе скорости переноса загрязняющих веществ.

3. Моделирование характеристик качества воды

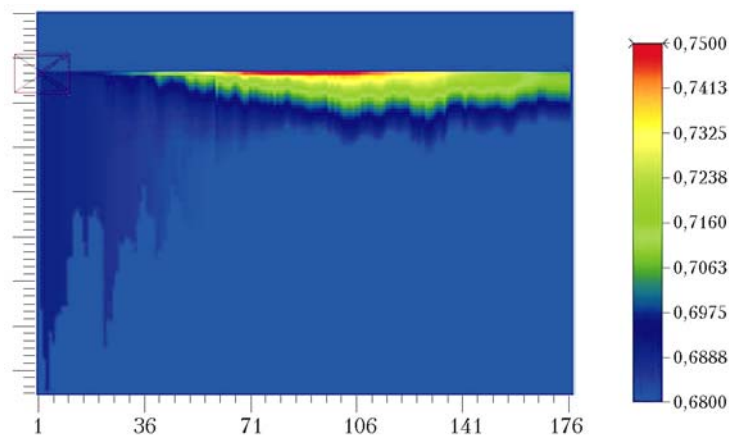
Модель рассчитывает достаточно большое количество параметров, среди которых можно выделить основные: TDS – суммарные растворенные вещества; трассер (Generic 1) – пассивное загрязняющее вещество с нулевой скоростью осаждения; резидентное время (Generic 2) – характеристика гидродинамики с правой частью, равной -1 и нулевым граничным условием на входном створе; кишечная палочка (Generic 3); ISS – неорганические взвешенные вещества; лабильное растворенное органическое вещество (Labile DOM); устойчивое растворенное органическое вещество (Refrac-

tory DOM); лабильное корпускулярное органическое вещество (Labile POM); водоросли (Algae); фосфаты (Phosphate); аммонийный азот (Ammonium); нитрат-нитритный азот (Nitrate-Nitrite); растворенный кремний (Dissolved Silica); общее железо (Total Iron); растворенный кислород – РК (Dissolved Oxygen). Выбор тех или иных параметров моделирования обусловлен наличием данных наблюдений. Кроме того, в ряде случаев, как показано на рис. 4,а, моделирование одних параметров приводит к необходимости включения и ряда других параметров, взаимосвязанных друг с другом в цепочки-круговороты веществ.

На рис. 4,б показан результат моделирования водорослей в период пика половодья. Хорошо видны естественные процессы, происходящие в природе, когда в фотической, хорошо прогретой зоне водной толщи наблюдаются рост численности водорослей и их распространение в более глубокие слои в результате турбулентного перемешивания и под действием силы земной гравитации.



а



б

Рис. 4. Схема взаимосвязи моделирования водорослей с другими моделируемыми параметрами (а) и поле концентрации водорослей ($\text{г}/\text{м}^3$) на 28 мая 17 ч 30 мин (б). По горизонтальной оси – номера сегментов, по вертикальной – глубина реки

Заклучение

Идеально модель должна использоваться как стартовая позиция для исследователей водных объектов с дальнейшим непрерывным улучшением исходных данных и алгоритмов модели для того, чтобы достичь лучшего понимания структуры экосистемы и временной динамики происходящих в ней процессов. К сожалению, такой подход редко реализуется на практике в связи с необходимостью больших затрат времени и средств, но к еще большему сожалению, в связи с неспособностью к сотрудничеству между собой гидробиологов, гидрофизиков, гидрохимиков и математиков.

Объединение усилий экспериментаторов и теоретиков привело к замечательным достижениям в физике, химии и в какой-то мере в биологии (например, генетические исследования) в прошлом столетии, но такой союз — редкое явление в области моделирования качества воды.

Глубокое понимание моделируемых процессов, а также знание воспроизводимой экосистемы оказываются абсолютно необходимыми, если мы хотим достичь цели, на которую направлено само моделирование. Именно на этой основе должны быть решены проблемы:

— создания полной концептуальной модели гидродинамики и качества воды, изучаемой речной системы;

— практических применений математической (численной) модели для решения задач управления водными ресурсами.

Авторский коллектив благодарит профессора Василия Лыкосова и профессора Скотта Веллса за поддержку и внимание к нашей работе.

Настоящая работа проводится в рамках проекта Enviro-RISKS.

1. *Pushistov P.Yu., Vtorushin M.N.* Management and Protection of the Lower Ob and the Irtysh basin Water Bodies on the basis of Information-Simulation Hydrodynamics and Water Quality systems // Proc. Inviro-RISKS Kick-off Meeting. DMI. Jan. 2006. P. 24–30.
2. *Cole T.M., Wells S.A.* CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.2: Instruction Report EL-03-1. US Army Engineering and Research Development Center, Vicksburg, MS. 2003. 634 p.
3. *Wells S.A.* Surface water Hydrodynamic and Water Quality Models: Use and Misuse // 23rd Annual Water Law Conference. San Diego, CA, 2005. P. 1–10.

P.Yu. Pushistov, K.S. Alsynbaev, N.V. Chemlyakov, M.N. Vtorushin, I.S. Ermakov, A.N. Danilin, V.M. Bolgova, O.R. Kazarina, D.A. Lisovskii. **Numerical simulation of spatiotemporal structure of hydrodynamics and water quality characteristics of Severnaya Sos'va river.**

Problems of designing basic modeling complex for a river ecosystem are discussed. Severnaya Sos'va river (Khanty-Mansi autonomous region, Yugra) is used as an example.