

УДК 556.013

*А.Т. Будяну, Е.В. Викторов, П.Ю. Пушистов***Результаты применения информационно-вычислительной системы MIKE11 для моделирования переменных гидродинамики среднего течения реки Северная Сосьва***A.T. Budyanu, E.V. Victorov, P.Yu. Pushistov***Technology and Results of Applying Software System MIKE11 HD for Simulating Hydrodynamic Variables of the Middle Current of the River Severnaya Sosva**

Обсуждаются технология и результаты применения программного комплекса MIKE11 HD для моделирования переменных гидродинамики среднего течения реки Северная Сосьва, бассейн которой станет основным объектом техногенной нагрузки при реализации мегапроекта «Урал Промышленный – Урал Полярный».

Ключевые слова: река Северная Сосьва, пакет программ, численное моделирование, переменные гидродинамики, анализ данных.

The paper contains the discussion about the technology and results of applying software system MIKE11 HD for simulating hydrodynamic variables of the middle current of the river Severnaya Sosva. The basin of the river will be the main object of man-made loading in the implementation of mega-project «Ural Industrial — Ural Polar».

Key words: river Severnaya Sosva, software package, numerical simulation, hydrodynamic variables, data analysis.

Введение. Река Северная Сосьва — самый крупный приток Нижней Оби с длиной русла 720 км и площадью бассейна 89 тыс. км², расположенного на территории Ханты-Мансийского автономного округа-Югры. Река обладает уникальной естественно-природной экосистемой с эндемиками в составе биоты (в их числе тугун — знаменитая сосвинская селёдка), с нерестилищами особо ценных видов рыб, в том числе занесенных в Красную книгу РФ и ХМАО-Югры. В бассейне реки расположены природные территории, отнесенные к категории особо охраняемых, а также родовые угодья представителей коренных малочисленных народов Севера [1]. Бассейн верхнего течения реки в ближайшие годы станет зоной активного крупномасштабного транспортно-энергетического и промышленного освоения (мегапроект «Урал промышленный — Урал Полярный») [2], что делает актуальной проблему разработки проекта системы поддержки принятия решения для интегрированного управления водными ресурсами (СППР ИУВР) бассейна Северной Сосьвы [3]. Принципиально важной при разработке проектов СППР ИУВР является задача выбора адекватного инструментария вычислительной основы СППР, в частности, моделей гидродинамики и качества воды рек, озер, водохранилищ и эсту-

ариев [4, 5]. Югорским НИИ информационных технологий и Югорским государственным университетом в период 2004–2006 гг. накоплен положительный опыт применения модели гидродинамики и качества воды CE-QUAL-W2 (далее — W2) для воспроизведения гидрологического, термического и гидрохимического режимов участка среднего течения реки Северная Сосьва от гидропоста Сосьва до гидропоста Сартынь с использованием данных наблюдений сети Росгидромета, а также данных батиметрии русла с лоцманских карт [6]. Осенью 2007 г. лаборатория экосистемных наблюдений и проблем водопользования ЮГУ и вновь созданный Территориальный центр мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций ХМАО-Югры провели совместные экспедиционные исследования на указанном участке реки Северная Сосьва, программно ориентированные на использование полученных данных для разработки, калибровки и верификации численных моделей гидродинамики и термического режима водотока [7]. База гидрологических и гидрографических данных высокого пространственного разрешения (всего 31 промерный створ на участке реки длиной 70 км), созданная на основе обработки результатов экспедиционных работ, позволила разработать как новую версию модели W2 [7], так

и провести адаптацию и апробирование информационно-вычислительной системы MIKE11, которой оснащен Территориальный центр анализа и прогноза угроз безопасности жизнедеятельности ХМАО-Югры. Цель настоящей статьи — представить технологию и результаты применения системы MIKE11 [8] для моделирования переменных гидродинамики среднего течения реки Северная Сосьва.

Технологический ресурс программного пакета MIKE11. Профессиональный инженерный программный пакет «MIKE 11 — a Modeling Systems for Rives and Channels» (системы моделирования рек и каналов), разработанный Датским гидравлическим институтом, широко применяется на практике в качестве инструмента динамического одномерного моделирования течений и качества воды в реках, водохранилищах, ирригационных системах, каналах и других водных объектах [8]. Одна из важных особенностей системы MIKE11 — ее модульная структура. Ядром моделирующей системы является модуль гидродинамики (HD), на основе которого формируются другие модули системы: поверхностного стока (RR), прогноза паводков (EF), качества воды (WQ) и переноса наносов (ST). Модуль гидродинамики реализован на основе нестационарных одномерных уравнений Сен-Венана, с использованием неявной конечно-разностной схемы для расчета неустановившихся течений [8].

Комплекс программ MIKE11 состоит из набора редакторов входных файлов, работа с которыми позволяет создать компьютерную модель конкретной речной системы. Каждый редактор работает с файлом определенного типа. Доступный нам пакет MIKE11 HD Unlimited использует следующие редакторы и типы файлов: редактор речной сети (*.NWK); редактор поперечных сечений (*.XNS11); редактор граничных условий (*.BND11); редактор гидродинамических параметров (*.ND11); файлы временных рядов (*.DFSO); файлы результатов (*.RES11); редактор моделирования (*.SIM).

Объединение и обмен данными между отдельными редакторами достигается при использовании редактора моделирования. Редактор моделирования объединяет в себе всю информацию, необходимую для моделирования. Эта информация задает тип модели, имена и директорию исходных файлов данных, расчетный период, временной шаг расчета и т. д., а также имя файла результата.

Результаты применения MIKE11 HD для моделирования переменных гидродинамики участка реки Северная Сосьва от г/п Сосьва до г/п Сартынья. Методические причины выбора участка реки Северная Сосьва от г/п Сосьва (328 км от устья) до г/п Сартынья (258 км от устья)

в качестве основного объекта освоения и применения системы MIKE11 HD (далее — модель M11 «Сосьва — Сартынья») достаточно очевидны. Именно на этом участке среднего течения реки были проведены детальные экосистемные полевые работы в 2007 г. и на основе анализа данных полевых исследований была разработана новая версия модели W2 v.3.2 [7]. Для разработки модели M11 «Сосьва — Сартынья» был подготовлен план речной сети от г/п Сосьва до г/п Сартынья, сгенерированный на основе лоцманских карт при помощи программы Adobe Photoshop. Для задания граничных условий на входном створе (г/п Сосьва) были использованы данные наблюдений о расходе воды и для задания граничных условий на выходном створе (г/п Сартынья) — данные наблюдений об уровне воды. Данные о поперечной структуре русла через каждые 400 м были подготовлены на основе файла батиметрии модели W2 v.3.2, разработанного с усвоением данных эхолотирования экспедиционных работ 2007 г. Гидравлические параметры (коэффициенты придонного трения и др.) заданы близкими к средним величинам из рекомендуемых диапазонов наблюдаемых параметров для субполярных рек.

На рисунке 1а показан план речной сети, на котором представлены оцифрованные точки расчетной сетки модели M11 «Сосьва — Сартынья» (длина участка — 70400 м).

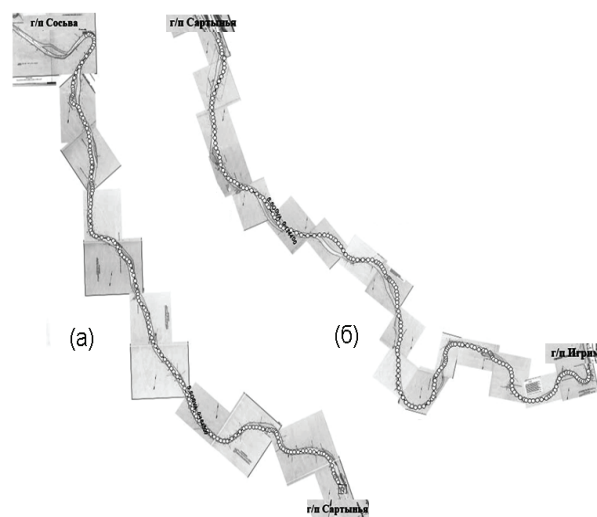


Рис. 1. План расчетных точек на участках реки Северная Сосьва от г/п Сосьва до г/п Сартынья (а) и от г/п Сартынья до г/п Игрин (б)

Определенное качественное и количественное представление о сравнении результатов расчетов и данных наблюдений дают рисунок 2 и таблица 1. Средняя абсолютная ошибка прогноза уровней воды в основные фазы гидрологического цикла на г/п Сосьва составила 0,18 м.

Таблица 1
Данные наблюдений и расчетов (M11 «Сосьва — Сартынья») уровней воды в основные фазы гидрологического цикла на г/п Сосьва за 2003 г.

Дата, фазы	Уровень воды, м		
	Наблюдения	Расчеты	Ошибка
29 мая, пик половодья	19.73	19.95	0.22
2 августа, летняя межень	13.75	13.92	0.17
27 августа, пик дождевого паводка	16.19	16.41	0.22
21 октября, осенняя межень	14.27	14.17	-0.1

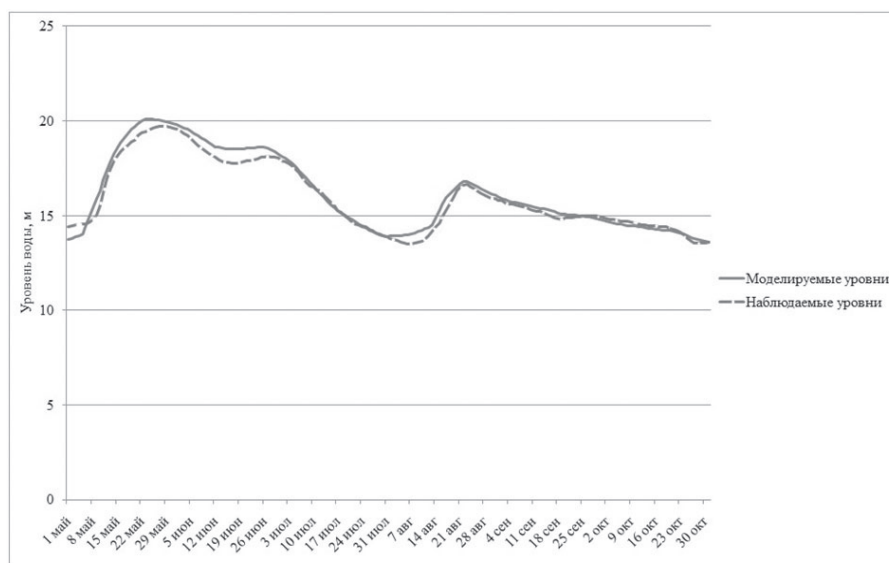


Рис. 2. Графики наблюдаемых и рассчитанных по модели M11 «Сосьва — Сартынья» значений уровня воды на г/п Сосьва за 2003 г.

Также было проведено сравнение результатов расчетов уровня воды и скорости течения на участке реки Северная Сосьва от г/п Сосьва до г/п Сартынья, полученных с помощью M11 «Сосьва — Сартынья» и W2 v.3.2, и соответствующих данных наблюдений,

полученных в результате экспедиционных работ 20–21 сентября 2007 г. Результаты сравнения прогнозов переменных гидродинамики, полученных с помощью двух моделирующих комплексов, и реальных данных можно увидеть на рисунках 3 и 4.

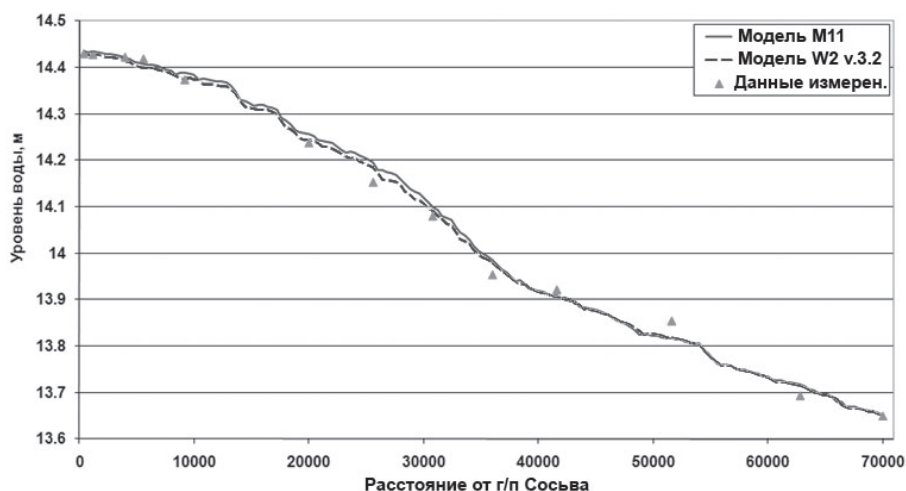


Рис. 3. Графики уровней воды, рассчитанных с помощью двух моделирующих систем и данные измерений уровня на участке реки от г/п Сосьва до г/п Сартынья (20–21 сентября 2007 г.)

Данные, представленные на рисунках 3 и 4, показывают, что рассчитанные с помощью M11 уровни и скорости течения качественно и количественно близки к соответствующим переменным гидродинамики, полученным с помощью W2 v.3.2. Результаты сравнения измеренных значений уровня воды и скорости течения за 20–21 сентября 2007 г. и соответствующих значений, полученных с помощью W2 v.3.2, необходимо полно проанализированы и оценены в работе [7].

Результаты применения MIKE11 HD для моделирования переменных гидродинамики среднего течения реки Северная Сосьва от г/п Сосьва до г/п Игрим. Необходимость разработки модели MIKE11 HD для участка реки от г/п Сосьва до г/п Игрим (далее — M11 «Сосьва — Игрим») и последующего создания на ее основе информационно-моделирующей системы прогнозирования гидрологических ЧС обусловлена тем, что Северная Сосьва в среднем течении относится к водным объектам ХМАО-Югры с высокими рисками гидрологических ЧС. С одной стороны, этот участок относится к паводкоопасным с угрозами экстремально высоких уровней воды в период весенне-летнего половодья и сильных дождевых паводков в горной и предгорной частях бассейна, с другой — в засушливые периоды уровни воды летней межени могут быть экстремально низкими, что несет прямую угрозу судоходству на реке.

Для разработки M11 «Сосьва — Игрим» для участка реки длиной 184800 м были подготовлены:

1. План речной сети от г/п Сосьва до г/п Игрим на основе лоцманских карт при помощи программы Adobe Photoshop (см. рис. 1а — б);
2. Данные о расходе воды для входного створа (г/п Сосьва) и данные об уровнях воды для выходного створа (г/п Игрим) за 2003 г.;
3. Данные о поперечной структуре сечений русла через каждые 400 м на участке г/п Сосьва — г/п Сартынья были заимствованы из файла речной сети модели M11 «Сосьва — Сартынья» (см. рис. 1а). Данные о поперечной структуре сечений русла на участке от г/п Сартынья до г/п Игрим (см. рис. 1б, длина участка 114400 м) были подготовлены только на основе данных о глубинах с лоцманских карт с помощью технологии, использованной в [6]. При этом необходимо подчеркнуть, что точность метода (трехточечная параболическая аппроксимация поперечных сечений) восстановления реальных высотных отметок, указанных в лоциях глубин, была неизвестна. Батиметрия затопляемой в период половодья зоны (поймы), как и в [6], задавалась на основе абстрактной параболической экстраполяции высот от левой и правой границ русла.

Определенное количественное представление о сравнении результатов расчетов по модели M11 «Сосьва — Игрим» и данных наблюдений дают таблицы 2 и 3.

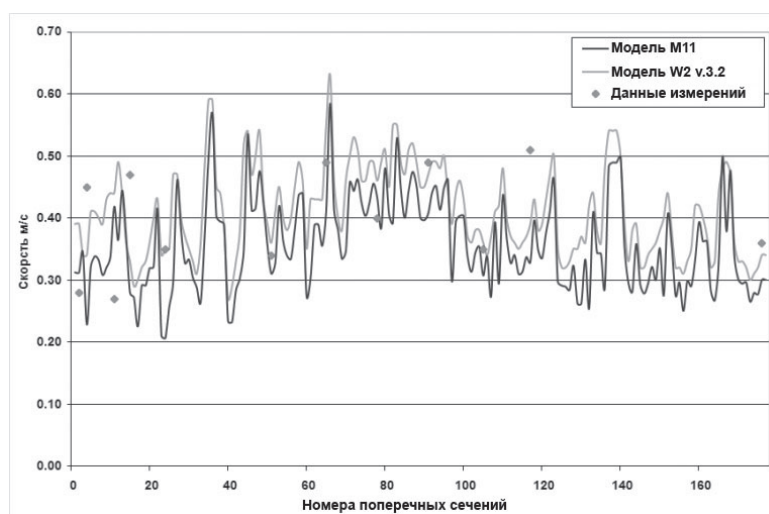


Рис. 4. Графики скоростей течения, рассчитанных с помощью двух моделирующих систем и данные измерений значений скорости в поверхностном слое на участке реки от г/п Сосьва до г/п Сартынья (20–21 сентября 2007 г.)

Таблица 2

Данные наблюдений и расчетов по модели M11 «Сосьва — Игрим» уровней воды в основные фазы гидрологического цикла на г/п Сосьва

Дата, фазы	Уровень воды, м		
	Наблюдения	Расчеты	Ошибка
29 мая, пик половодья	19.73	20.53	–0.80
2 августа, летняя межень	13.75	14.14	–0.39
27 августа, пик дождевого паводка	16.19	17.08	–0.89
21 октября, осенняя межень	14.27	14.47	–0.20

Данные наблюдений и расчетов по модели M11 «Сосьва — Игрим» уровней воды
в основные фазы гидрологического цикла на г/п Сартынья

Дата, фазы	Уровень воды, м		
	Наблюдения	Расчеты	Ошибка
29 мая, пик половодья	17.98	19.05	-1.07
2 августа, летняя межень	13.21	13.68	-0.47
27 августа, пик дождевого паводка	14.84	16.11	-1.27
21 октября, осенняя межень	13.16	13.79	-0.63

Сравнение данных таблиц 1 и 2 свидетельствует о заметном росте средних абсолютных ошибок прогноза уровней воды (σ) для г/п Сосьва по модели M11 «Сосьва — Игрим» относительно модели M11 «Сосьва — Сартынья», $\sigma = 0,57$ и $\sigma = 0,18$ м соответственно. Аналогичная ошибка по модели M11 «Сосьва — Игрим» для г/п Сартынья (табл. 3) составила 0,83 м.

Для объяснения причин значительных абсолютных ошибок прогноза уровней воды на г/п Сартынья ($\sigma = 0,83$ м) по модели M11 «Сосьва — Игрим» была разработана дополнительная модель MIKE11 HD для участка Сартынья — Игрим с данными о поперечной структуре сечений русла, полученными только

с помощью данных лоцманских карт и технологии [6]. Абсолютные ошибки уровня воды по дополнительной модели M11 «Сартынья — Игрим» для г/п Сартынья оказались равными 0,86 м, из чего следует однозначный вывод о низком качестве исходных данных, получаемых с лоцманских карт для построения расчетной сетки модели M11 «Сартынья — Игрим». Таким образом, для создания адекватной информационно-моделирующей системы прогноза гидрологических ЧС для среднего течения Северной Сосьвы, с использованием ресурса программного пакета Mike11 [8], необходимо организовать полевые съемки высокого пространственного разрешения высотных отметок русла и поймы участка реки от г/п Сосьва до г/п Игрим.

Библиографический список

1. Характеристика экосистемы реки Северной Сосьвы / под ред. Л. Н. Добринского. — Свердловск, 1990.
2. Концепция комплексного промышленного освоения Приполярного Урала на основе опережающего развития транспортной и энергетической инфраструктуры. — Ханты-Мансийск, 2006.
3. Пушистов П. Ю., Дикунец В. А., Земцов В. А., Романенко Р. Д. Исследование осуществимости разработки системы поддержки принятия решений по сохранению уникальной экосистемы реки Северная Сосьва при крупномасштабном горнопромышленном и транспортно-энергетическом освоении Приполярного Урала // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: мат. Третьей Всерос. конф. с междунар. участием. — Барнаул, 2010.
4. Пряжинская В. Г., Ярошевский Д. М., Левит-Гуревич Л. К. Компьютерное моделирование в управлении водными ресурсами. — М., 2002.
5. Daniel P. Loucks and Eelco van Beek with contributions from Jery R. Stedinger, Jozef P. M. Dijkman, Monique T. Villars. Water Resources Systems Planning and Management An Introduction to Methods, Models and Applications. Studies and Reports in Hydrology. Unesco Publishing.
6. Пушистов П. Ю., Алсынбаев К. С., Вторушин М. Н. и др. Численное моделирование пространственно-временной структуры гидродинамики и характеристик качества воды реки Северная Сосьва // Оптика атмосферы и океана. — 2006. — Т. 19, № 11.
7. Пушистов П. Ю., Вторушин М. Н., Романенко Р. Д. Результаты применения методов системного анализа при исследовании детальной пространственно-временной структуры переменных гидродинамики и качества воды среднего течения крупной реки Северная Сосьва // Водные проблемы крупных речных бассейнов и пути их решения: сб. науч. тр. — Барнаул, 2009.
8. MIKE11 — a Modelling System for River and Channels. Reference Manual, DHI Water Environment Health. — Denmark, 2008.