

Ф И З И К А

УДК 551.583+519.6

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ПАВОДКОВЫХ ВОЛН В СЛОЖНЫХ РЕЧНЫХ РУСЛАХ

Никифоровская В. С., Кузин В. И., Лаптева Н. А.

NUMERICAL MODELING OF TRANSFORMATION OF FLOOD WAVES IN COMPLEX
RIVER CHANNELS

Nikiforovskaya V. S.¹, Kuzin V. I.², Lapteva N. A.^{2,3}

¹ Lavrentjev Institute of hydrodynamics, Siberian Branch of Russian Academy of Science, Novosibirsk, Russia

² Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of Russian Academy of Science, Novosibirsk, Russia

³ State Scientific Center of Virology and Biotechnology "Vector", Koltsovo, Novosibirsk region, Russia
e-mail: lapteva@sscc.ru

Abstract. In this paper, we consider three one-dimensional models for investigating the passage of a flood wave in channels with floodplains. When calculating the unsteady movement of water in natural rivers of the plain type, having complicated beds and large floodplains, there are often difficulties associated with the need to take into account the influence of floodplains on the process of passing waves of outflows and floods along the length of the watercourse. Based on the results of overland flow calculations for the climatic model of river flow for one-dimensional models of the passage of the flood wave, calculations were made. The results of calculations of real different probability floods at the fragment Irtysh watershed from Tobolsk to Khanti–Mansisk are presents.

Keywords: mathematical modeling, climatic river runoff, Irtysh river basin, river systems, numerical methods, flood plain.

Введение

Обь-Иртышский бассейн является самым крупным гидрологическим ареалом Евразии. Его площадь составляет 2990 тыс. кв. км. По этому показателю река занимает первое место в России. Основным притоком реки является Иртыш. Длина от его истока до впадения Обь равняется 4248 км, что превышает длину самой Оби (3650 км). Общий приток в Карское море составляет 396 куб. км в год. Это является существенным вкладом в пресноводный баланс Арктики и всего Мирового океана. Выбранный регион исследований сосредоточен на ключевых точках этого бассейна — на слиянии двух основных рек — Оби и Иртыша. Эта акватория привлекательна для изучения как своей характерной особенностью гидрологии, так и зарегулированностью русел рек. Исследования проводились на основе гидроди-

намического подхода, предусматривающего использование для описания трансформации паводковых волн в водотоках динамических уравнений (уравнения Сен-Венана) совместно с камерной моделью (линейная резервуарная модель Калинина–Милюкова) для учета поверхностного стока, поступающего в русло с прилегающих к нему территорий.

1. Цель работы

При расчете неустановившегося движения воды в естественных реках равнинного типа, имеющих сложные русла и большие поймы, часто возникают трудности, связанные с необходимостью учета таких факторов как извилистость русел равнинных рек, влияние пойм на процесс прохождения волн попусков и паводков по длине водотока.

Никифоровская Валентина Сергеевна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения РАН; e-mail: nikvs38@mail.ru.

Кузин Виктор Иванович, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН; e-mail: kuzin@sscc.ru.

Лаптева Наталья Александровна, старший научный сотрудник Государственного научного центра вирусологии и биотехнологии «Вектор»; e-mail: lapteva@sscc.ru.

Работа выполнена при финансовой поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта 13.10, Совета программы поддержки ведущих научных школ, грант №902.2003.1, Российского фонда фундаментальных исследований, грант №020564384 и при поддержке проекта Президиума РАН программы 17.6.

В работе рассматриваются три одномерные математические модели, из которых две, разработанные в Институте гидродинамики СО АН СССР, используются для расчета распространения паводковых волн в извилистых руслах с поймами.

Третья используемая в работе одномерная модель — климатическая модель стока, разработанная в Институте вычислительной математики и вычислительной геофизики СО РАН (ИВМиМГ СО РАН). Она была исследована и успешно применена для расчета годовых гидрографов крупных рек Сибири: Обь — Салехард, Енисей — Игарка, Лена — Кюсюр.

Основной целью настоящей работы является исследование возможности и выявление эффективности применения третьей модели для расчета бокового притока (распределенного по длине водотока), исследуемого в работе с помощью двух упомянутых выше моделей.

2. Описание математических моделей

Численное моделирование трансформации паводковых волн в сложных речных руслах проводилось с использованием первых двух разных математических моделей.

В основе обеих моделей для расчета неустановившегося движения воды в руслах с поймами лежит осредненная по поперечному сечению русла система обобщенных одномерных уравнений мелкой воды (уравнения Сен-Венана), позволяющая в рамках одномерной теории «мелкой воды» с удовлетворительной для практики степенью точности описывать динамику гидравлических процессов в руслах водных объектов [1]:

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q, \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{\omega} \right) = -g\omega \left(\frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{Q|Q|}{K^2} \right), \quad (2.2)$$

где t — время; x — координата, отсчитываемая вдоль оси русла; $Z(x, t)$ — уровень свободной поверхности; $Q(x, t)$ — расход воды; $q(x, t)$ — распределенный по длине русла боковой приток; $B(h, x)$, $\omega(h, x)$, $K(h, x)$ — соответственно ширина свободной поверхности, площадь поперечного сечения и модуль расхода при глубине h ; g — ускорение силы тяжести.

Сбор первичной информации по водному объекту, обработка и подготовка к заданию входных данных, необходимых для проведения расчетов, являются очень трудоемкими. Из них наиболее сложный — это учет поверхностного стока с прилегающих к руслу территорий $q(x, t)$.

Отличие моделей заключается в различных способах учета пойм, отражающих специфику их влияния на прохождение паводковых волн по извилистым речным руслам [2]:

- модель 1 учитывает влияние поймы через суммарные для русла и поймы морфометрические и гидравлические характеристики;
- модель 2 учитывает пойму как сосредоточенную емкость.

Согласно модели 1 входящие в уравнения неразрывности и количества движения (1, 2) морфометрические и гидравлические характеристики учитывают влияние поймы через суммарные для русла и поймы характеристики: ширина свободной поверхности $B_{\text{общ}}(x, z)$ и модуль расхода $K_{\text{общ}}(x, z)$. Здесь z — отметка свободной поверхности воды, x — расстояние, обычно отсчитываемое по оси русла (например, по фарватеру). Основная идея предлагаемого метода состоит в приведении всех характеристик поймы к длине, отсчитываемой по оси русла, так как в извилистых реках с поймами расстояние, проходимое потоком по поймам, значительно отличается от расстояния, которое поток проходит при движении по русловой части. При этом приведенные характеристики используются для определения $B_{\text{общ}}(x, z)$ и $\omega_{\text{общ}}(x, z)$, средние морфометрические характеристики — для вычисления модуля расхода поймы (естественной, а не приведенной), входящей в состав $K_{\text{общ}}(x, z)$.

Согласно модели 2 пойма учитывается в виде сосредоточенных емкостей, приуроченных к внутренним створам русла с помощью предусмотренных в этих створах соответствующих условий сопряжения потока, т.е. равенство отметок уровня воды слева и справа и баланс расходов с учетом аккумулирующей способности поймы [1]

$$z_{\text{лев}} = z_{\text{пр}} = z_{\text{п}}, \quad Q_{\text{пр}} - Q_{\text{лев}} = \Omega \frac{dz}{dt}.$$

Здесь $z_{\text{лев}}$, $z_{\text{пр}}$ — соответственно уровни воды слева и справа от створа, $z_{\text{п}}$ — уровень воды в пойме, Ω — площадь зеркала поймы.

Для расчета необходимого для работы обеих моделей бокового притока $q(x, t)$ исполь-

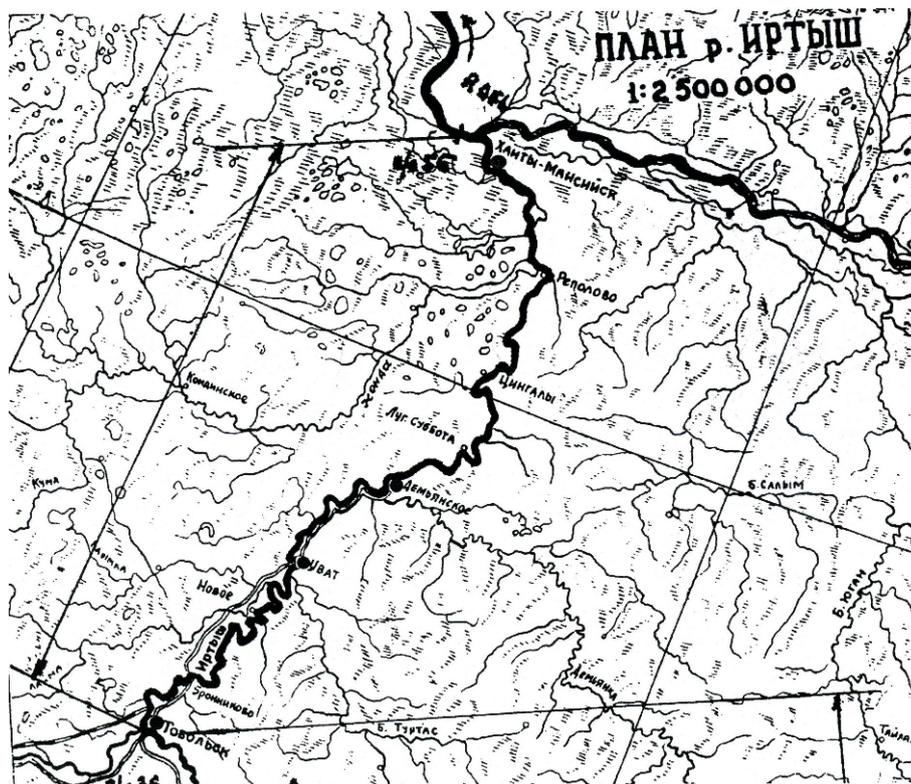


Рис. 1. Рассматриваемый фрагмент реки Иртыш от Тобольска до Ханты-Мансийска

зуется климатическая модель стока, разработанная в ИВМиМГ СО РАН [3, 4].

Климатическая модель речного стока представляет собой линейную камерную модель. Модель составлена из линейных резервуаров или каскада резервуаров в ячейках сетки. Скорость изменения стока из ячейки или каскада ячеек линейно зависит от притока, и пропорциональна наклону в ячейке и обратно пропорциональна расстоянию между центрами ячеек.

Скорость изменения стока из ячейки в простейшем варианте модели Калинина–Милюкова определяется на основе решения последовательности обыкновенных дифференциальных уравнений вида

$$k \frac{dQ(t)}{dt} = I(t) - Q(t),$$

где k — коэффициент времени задержки для ячейки, $I(t)$ — приток в ячейку, $Q(t)$ — сток из ячейки.

Для каскада из n ячеек решается система из n уравнений, связывающих притоки и стоки из последовательных ячеек. Общим решением линейных уравнений при нулевых начальных условиях является интеграл сверт-

ки (Дюамеля)

$$Q(t) = \int_0^{\infty} I(\tau)h(t - \tau) d\tau,$$

где $h(t)$ — кривая добега. Эта функция может трактоваться как плотность распределения времени добега элементарных объемов по русловой сети бассейнов. В простейшем варианте одной ячейки она имеет вид

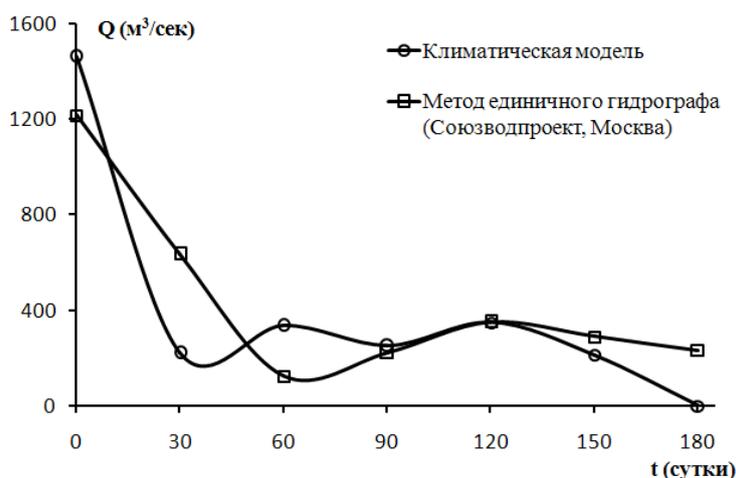
$$h(t) = \frac{e^{-\frac{t}{k}}}{k}.$$

Для каскада из n резервуаров кривая добега имеет вид, аналогичный дискретному представлению гамма-распределения

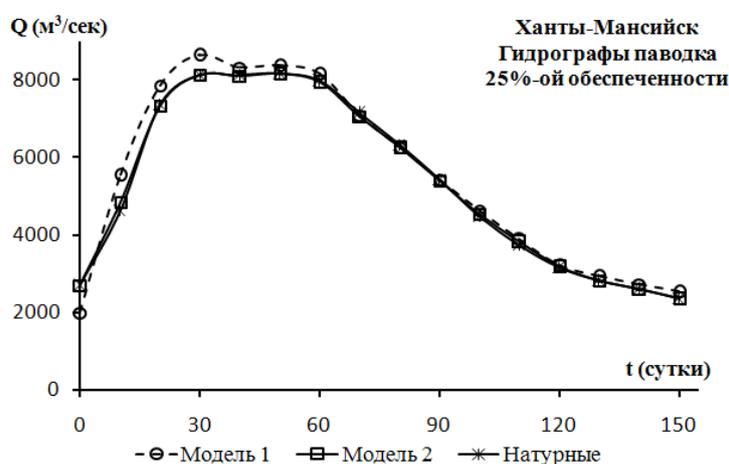
$$h(t) = \frac{t^{n-1}}{k^n(n-1)!} e^{-\frac{t}{k}},$$

здесь k — коэффициент задержки для каждой ячейки.

При проведении численных экспериментов по климатической модели речного стока было выбрано разрешение, составляющее $1/3$ градуса по широте и долготе соответственно.



а)



б)

Рис. 2. Трансформация реального паводка 25%-ой обеспеченности по реке Иртыш на участке Тобольск – Ханты-Мансийск: а) сравнение рассчитанного бокового притока с данными Союзводпроекта, б) сравнение рассчитанных гидрографов в г. Ханты-Мансийске по моделям 1 и 2 с натурными данными

3. Результаты сравнения моделей

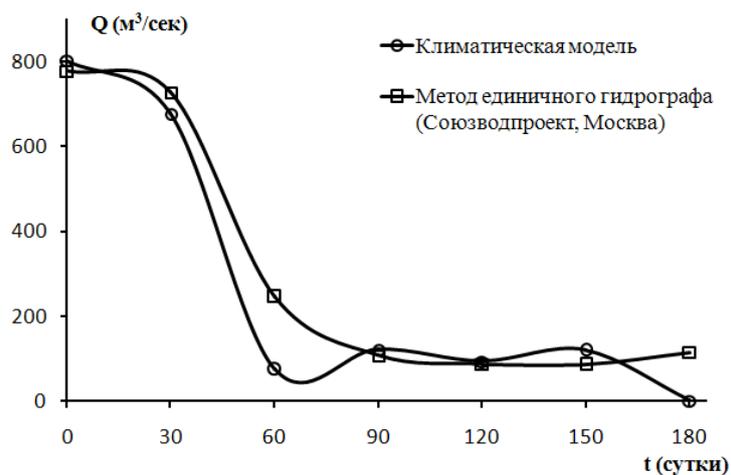
В качестве примера для сравнения моделей [4–6] рассматривается фрагмент бассейна реки Иртыш от Тобольска до Ханты-Мансийска протяженностью 620 км, изобилующий обширными двусторонними (местами односторонними) поймами шириной от 6 до 10 км (рис. 1).

Пойма представляет собой лугово-кустарниковый ковер, изрезанный протоками и местами сильно заболоченный. Река на этом участке течет в высоких (6–8 м) крутых берегах. Русло слабо деформируемо с песчано-илистым дном. Уклоны реки к устью уменьшаются до 0,02 %, что при наибольших

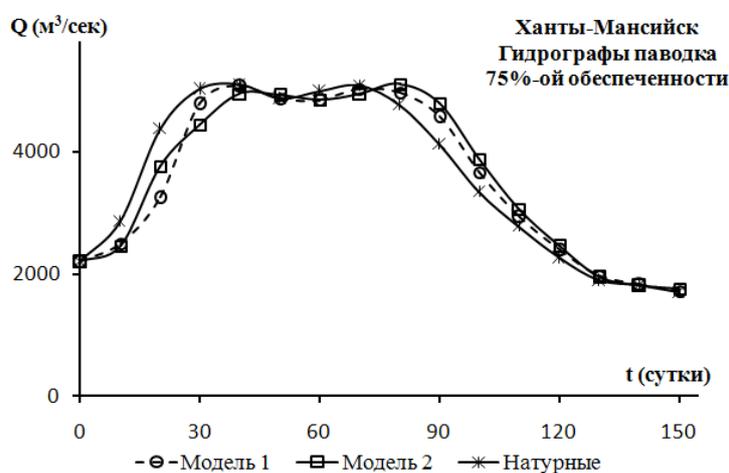
расходах обеспечивает максимальную в русле скорость около 1,5 м/с.

Этот участок р. Иртыш был разбит на 16 расчетных участков. Наиболее крупные притоки Иртыша (Конда и Демьянка) были выделены как сосредоточенные притоки. Небольшие — были учтены в климатической модели, с помощью которой для каждого расчетного участка были рассчитаны годовые гидрографы, а затем соответственно и распределенный приток $q(x, t)$ на каждом участке.

При расчетах в створе Тобольск в качестве граничного условия задавался гидрограф $Q = Q(t)$, в створе Ханты-Мансийск (водомерный пост Самарово) — условие $z = z(t)$,



а)



б)

Рис. 3. Трансформация паводка 75%-ой обеспеченности по реке Иртыш на участке Тобольск – Ханты-Мансийск. Обозначения те же, см. рис. 2а, 2б

учитывающее подпор устьевой области р. Иртыш со стороны р. Обь. Оба граничных условия задавались по наблюдениям. Расчеты по моделям 1 и 2 выполнялись для реальных паводков 75, 50 и 25 %-ой обеспеченности по объему стока весеннего половодья с учетом соответствующего для каждого из рассматриваемых паводков бокового притока $q(x, t)$, рассчитанного по климатической модели.

На рис. 2 представлены результаты трансформации паводка 25%-ой обеспеченности от Тобольска до Ханты-Мансийска. На рис. 2а дано сравнение рассчитанного бокового притока с данными Союзводпроекта (сплошная линия с квадратиками) [7]. На рис. 2б — сравнение рассчитанных гидрографов в г. Ханты-Мансийске по моделям 1 и 2 (соответственно

пунктир с кружками, сплошная с квадратиками) с натурными данными (сплошная линия со звездочками).

На рис. 3 приведены результаты аналогичных численных расчетов трансформации реального паводка 75%-ной обеспеченности для рассмотренных выше моделей.

Сравнение полученных результатов показало адекватность климатической модели для расчета стока с прилегающих к руслу реки пойменных территорий. Успешность ее использования также подтверждается удовлетворительными результатами сравнения рассчитанных гидрографов по моделям 1 и 2 с данными натурных измерений волн паводков разных обеспеченностей.

4. Заключение

Анализ результатов численных расчетов показал, что волны низких паводков (75 и 50%-ой обеспеченности) проходят практически в пределах русловой части без выхода на пойму. В связи с этим при численных расчетах паводков аналогичных обеспеченностей эффектом влияния поймы можно пренебречь. Однако при прохождении более редких высоких паводков, например, 25 %-ой обеспеченности, не говоря уже о 5 %-ой обеспеченности, происходит значительное затопление поймы. При расчете паводков этих обеспеченностей пренебрежение эффектом влияния поймы приводит к существенному искажению результатов [2].

Полученные результаты показывают достаточную эффективность предложенных моделей и методов для учета влияния поймы на процесс прохождения волн попусков и паводков в извилистых руслах с поймами.

Литература

1. Воеводин А. Ф., Шугрин С. М. Численные методы расчета одномерных систем. Новосибирск: Наука, 1981, 208 с.
2. Никифоровская В. С. О численных моделях неустановившихся течений в руслах с поймами // Динамика сплошной среды. 1978. Вып. 35. С. 89–95.
3. Кузин В. И., Лаптева Н. А. Математическое моделирование климатического речного стока из Обь-Иртышского бассейна // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. №6. С. 539–543.
4. Кузин В. И., Лаптева Н. А. Математическое моделирование стока основных рек Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. №6. С. 525–529.
5. Кузин В. И., Никифоровская В. С., Воеводин А. Ф., Лаптева Н. А. Численное моделирование водного и термического режимов в речных системах // XIII Международный научный конгресс Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. Международная научная конференция “Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология”. Новосибирск: СГУГиТ, 2017. Т. 1. С. 47–51.
6. Кузин В. И., Никифоровская В. С., Лаптева Н. А. Численное моделирование трансформации паводковых волн в сложных речных рус-

лах // Труды III Всероссийской научной конференции с международным участием “Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии”. Барнаул. 2017. Т. 2. С. 142–148.

7. Технический отчет по топографо-геодезическим работам под технико-экономическое обоснование первой очереди переброски части стока сибирских рек в бассейн Аральского моря на объекте р. Иртыш (комплексная проектно-изыскательская экспедиция № 10). М.: В/О “Союзводпроект”. 1973. 26 с.

References

1. Voevodin, A.F., Shygrin, S.M. *Solution methods for an one-dimensional evolution systems*. Nauka Siberian Branch, Novosibirsk, 1981. (In Russian)
2. Nikiforovskaya, V.S. On numerical models of unsteady flows in beds with floodplains. *Dinamika sploshnoi sredy* [Dynamics of a continuous medium], 1978, iss. 35, pp. 89–95. (In Russian)
3. Kuzin, V.I., Lapteva, N.A. Mathematical simulation of climatic river discharge from the Ob-Irtysh basin. *Optika atmosferi i oceana* [Atmospheric and Oceanic Optics], 2012, vol. 25, no. 6, pp. 539–543. (In Russian)
4. Kuzin, V.I., Lapteva, N.A. Mathematical modeling of flow of the main rivers of Siberia. *Optika atmosferi i oceana* [Atmospheric and Oceanic Optics], 2014, vol. 27, no. 6, pp. 525–529. (In Russian)
5. Kuzin, V.I., Nikiforovskaya, V.S., Voevodin, A.F., Lapteva, N.A. Numerical modeling of the water and thermal mode in river systems. *Proc. of the Int. Congress “Interexpo GEO-Siberia-2017”, Proc. of the Int. science conf. “Remote sensing methods of the Earth and photogrammetry, environmental monitoring, geocology”*. Vol. 1. SGUGiT, Novosibirsk, 2017, pp. 47–51. (In Russian)
6. Kuzin, V.I., Nikiforovskaya, V.S., Lapteva, N.A. Numerical modeling of transformation of flood waves in complex river channels. *Proc. of the III All-Russian Scientific Conf. with Int. Participation “Water and Environmental Problems of Siberia and Central Asia”*. Vol. 2. Barnaul, 2017, pp. 142–148. (In Russian)
7. *Technical report on topographic and geodetic works for the feasibility study of the first stage of the transfer of part of the runoff of Siberian rivers into the Aral Sea basin at the site of the Irtysh river*. V/O ‘Soyuzvodproekt’, Moscow, 1973. (In Russian)