

## ЧИСЛЕННАЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОТЯЖЕННОГО УЧАСТКА р. УРАЛ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКОВ ЗАТОПЛЕНИЯ СЕЛИТЕБНЫХ ТЕРРИТОРИЙ НАВОДНЕНИЯМИ И ВОЛНАМИ ПРОРЫВА<sup>1</sup>

© 2024 г. В. В. Беликов<sup>a, \*</sup>, Н. М. Борисова<sup>a</sup>, Е. С. Васильева<sup>a, \*\*</sup>,  
А. В. Глотко<sup>a, b</sup>, Т. А. Фёдорова<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

<sup>b</sup> Национальный исследовательский Московский Государственный строительный университет (НИУ МГСУ),  
Москва, 129337 Россия

\*e-mail: belvv@bk.ru

\*\*e-mail: vasilvaes@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.02.2024 г.

После доработки 25.04.2024 г.

Принята к публикации 25.04.2024 г.

Построена численная гидродинамическая модель участка р. Урал от Ириклинского водохранилища (включая последнее) до створа в 30 км ниже впадения р. Сакмары; таким образом, общая протяженность модели составила >700 км. Для уменьшения времени разработки модели и ускорения калибровочных и вариантных расчетов участок разбит на 3 последовательных по длине русла части, стыковка между ними происходит посредством задания согласованных граничных условий. Моделирование выполняется на основе отечественного высокоточного программного комплекса STREAM 2D CUDA с учетом резких перепадов отметок дна и многофракционного состава грунта. Проведена калибровка модели на постоянные расходы воды. Выполнены расчеты половодья обеспеченностью 1% и волны прорыва Ириклинского гидроузла при двух сценариях. Получены максимальные уровни воды, глубины и зоны затопления. Выявлен эффект многократного увеличения крутизны переднего фронта паводковой волны на протяжении рассматриваемой области.

**Ключевые слова:** половодье, волна прорыва, численное гидродинамическое моделирование, развитие прорыва, гидрограф излива, глубины и зоны затопления.

DOI: 10.31857/S0321059624050063 EDN: VXRZKQ

### ВВЕДЕНИЕ

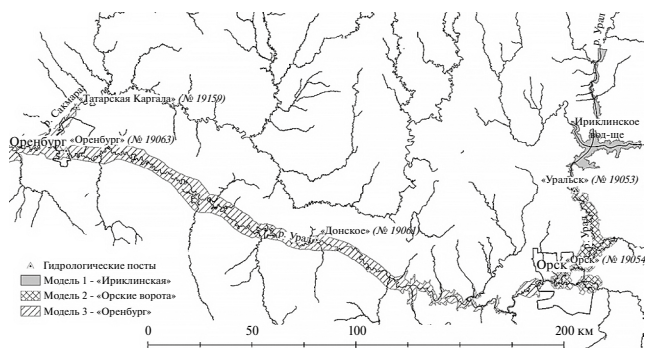
При выполнении работ в рамках Государственного контракта, посвященному сохранению и восстановлению трансграничной р. Урал (Жайык)<sup>1</sup>, головным исполнителем по которой был назначен Институт водных проблем РАН, много внимания было уделено разработке численных гидродинамических моделей протяженных участков р. Урал. Изучены возможные изменения участков речного русла в нижних бьефах

водохранилищ и других критических участков, для которых существуют риски наводнений, экономического ущерба, эрозии дна или берегов при следующих сценариях:

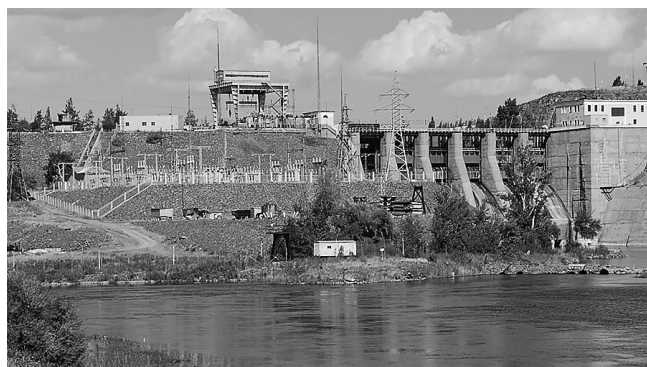
гидродинамическая авария земляной плотины Верхнеуральского гидроузла на р. Урал, распространение волны прорыва, возникновение каскадной гидродинамической аварии с прорывом Магнитогорского гидроузла и формирования зон катастрофического затопления г. Магнитогорска (результаты опубликованы в [11]); длина участка моделирования 70 км; разрушаются 8 мостовых переходов;

распространение течений на участке среднего Урала от Ириклинского водохранилища до

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках Государственного контракта “Экологическая оценка последствий регулирования стока в трансграничном бассейне трансграничной р. Урал (Жайык) и разработка научно-обоснованных предложений по экологической реабилитации, сохранению и восстановлению трансграничной реки Урал (Жайык)”.



**Рис. 1.** Расположение участков гидродинамических моделей в долине р. Урал.



**Рис. 2.** Вид на Ириклинский гидроузел со стороны нижнего бьефа.

г. Оренбурга при разных режимах сброса с Ириклинской ГЭС (с учетом регулирования стока), половодья обеспеченностью 1% и волны прорыва при гидродинамической аварии на Ириклинской ГЭС;

русловые процессы и прорыв излучины на трансграничном участке р. Урал у с. Облавка с учетом гидрографов половодья и неоднородного состава грунта.

Статья посвящена описанию модели участка среднего Урала и некоторых результатов расчетов. Ознакомиться с подробным описанием методики численного моделирования протяженных участков рек и волн прорыва можно в [4–7].

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Участок моделирования расположен в среднем течении р. Урал и включает в себя Ириклинское водохранилище и область от нижнего бьефа Ириклинского гидроузла до с. Шуваловского

(50 км ниже г. Оренбурга). Общая протяженность участка моделирования по руслу р. Урал (включая Ириклинское водохранилище) составляет >700 км (рис. 1).

Водный режим р. Урал и его притоков на участке моделирования относится к Казахскому типу, характеризующемуся высоким весенним половодьем и устойчивой меженью в остальное время года. Гидрограф – сезонный с пиком в весенний период.

### *Ириклинский гидроузел*

Ириклинское водохранилище комплексного назначения расположено на территории Гайского района Оренбургской области, створ плотины находится в 83 км выше по реке от г. Орск и в 1810 км от устья реки, площадь водосбора в створе плотины – 36900 км<sup>2</sup> (рис. 2).

В состав ГТС Ириклинской ГЭС входят: каменно-набросная плотина, бетонная водосливная плотина со встроенным зданием ГЭС, буферная плотина, которая расположена ниже по течению и предназначена для поддержания определенного уровня воды в нижнем бьефе Ириклинской ГЭС, необходимого для оптимальной работы турбин.

### *Сооружения на пойме городов Орск и Оренбурга*

В область моделирования попали два крупных города – Орск и Оренбург, здесь был выделен ряд сооружений, оказывающих влияние на поток воды.

В частности, в г. Орске имеются поперечные, сужающие поток, насыпи автомобильных и железнодорожных мостов, а также продольные насыпи дамб обвалования на правобережной и левобережной поймах в черте города. Железнодорожные мосты и автомобильный мост (который называют “большой” или “верхний”) не затопляются в период половодья, а “нижний” автомобильный мост периодически затопляется.

Оренбург расположен в месте впадения в р. Урал правобережного притока – р. Сакмары.

Центральная часть города находится на правом берегу р. Урал. Берег высокий, оползневой. В черте города выполнены берегоукрепления правого берега в виде набережной с пляжами и парковой зоной (рис. 3). На входе в город урезная линия низкой поймы, на которой расположен парк, закреплена габионами. На данном участке расположены два моста: пешеходный мост Европа—Азия и автомобильный мост. В 620 м ниже по течению от автомобильного моста находится железнодорожный мост. По пойме дороги идут в насыпи на незатопляемых отметках. Оба моста наглухо перекрывают пойму реки, оставляя для воды минимальный проем шириной 330 м.

В границах модели на р. Сакмаре учтены три моста. Ближайший к устью (в 7.35 км) расположен автомобильный мост. Насыпь этой дороги подходит вплотную к берегам, оставляя поперечное сечение в русле шириной 180 м. Расположенная выше по течению трасса железной дороги перекрывает пойму насыпью, оставляя проем в 270 м. Выше по течению, в 7.5 км от железнодорожного моста, располагается автомобильный мост. Здесь находится входная граница модели по р. Сакмаре.

Все перечисленные искусственные сооружения учтены при разработке описываемых ниже численных гидродинамических моделей.

### ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Задачи исследований следующие:

— сбор и обработка исходных данных для моделирования: по подпорным сооружениям Ириклинского гидроузла, крупномасштабных топографических планов в границах катастрофического затопления в пределах расчетных участ-



Рис. 3. Набережная и пляж г. Оренбурга.

ков в масштабе  $M 1 : 100000$  и иных топографических материалов из открытых источников, гидрологических данных наблюдений с гидрологических постов на реках Урал и Сакмаре, попадающих в расчетную область (“Уральск”, “Орск”, “Донское”, “Оренбург” и “Татарская Каргала”), космических снимков высокого разрешения на расчетную область из открытых источников;

— разработка двумерных компьютерных гидродинамических моделей расчетного участка р. Урал в нижнем бьефе Ириклинской ГЭС, включая г. Оренбург;

— валидация и калибровка моделей при пропуске разных расходов воды;

— выполнение систематических расчетов для условий различных пусков с Ириклинского гидроузла, волны половодья обеспеченностью 1%, волны прорыва при гидродинамической аварии Ириклинской плотины.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Работа выполнялась с использованием отечественного программного комплекса STREAM 2D, основанного на оригинальном численном алгоритме решения двумерных уравнений мелкой воды на неровном дне. Первые версии алгоритма и программы были реализованы еще в 1985 г. [9] и с тех пор постоянно совершенствовались [10, 8]. В последней версии этого программного комплекса STREAM 2D CUDA [2], зарегистрированной в Роспатенте, реализован описанный в [1, 16, 17] новый алгоритм, обеспечивающий единственность и высокую точность решения уравнений мелкой воды на участках со сложным рельефом дна и гидротехническими сооружениями и распараллеленный на графическом процессоре NVIDIA с использованием технологии CUDA для ускорения расчетов. Алгоритм, валидация численной модели и многочисленные примеры приложения к различным задачам речной гидравлики и гидродинамики представлены также в монографиях [4, 6, 7].

Программа предназначена для расчета нестационарных и неравномерных течений при сложном рельефе дна, к которым относятся по-

ловодья и паводки в реках, речных долинах и водохранилищах, волны прорыва, вызванные разрушением напорного фронта плотин, и т. п. Расчет прорана в теле земляной плотины Ириклинского водохранилища выполнен с применением физико-математической модели развития проранов в грунтовых плотинах, входящей в состав программы STREAM 2D CUDA. Модель основана на гидроморфологическом методе численного моделирования развития прорана в плотинах, сложенных неоднородным грунтом. Описание, обоснование, верификация и примеры применения описаны в [7].

### ПОСТРОЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СРЕДНЕГО ТЕЧЕНИЯ р. УРАЛ

Разработаны 3 численные гидродинамические модели участков р. Урал, взаимно дополняющие друг друга (рис. 1):

**Модель 1 — “Ириклинская”** — включает в себя Ириклинское водохранилище, сооружения Ириклинского гидроузла и участок русла и поймы р. Урал до буферной плотины. Общая протяженность — 79 км.

**Модель 2 — “Орские ворота”** — построена на участке от Ириклинского гидроузла до Орских ворот в г. Орске. Кроме р. Урал, в модель включен участок 25 км р. Ори в границах г. Орска. Общая протяженность модели 2 по руслу р. Урал составила 115 км.

**Модель 3 — “Оренбург”** — построена на участке от Орских ворот до с. Шуваловского (50 км ниже г. Оренбурга), включает сам город и участок 33 км р. Сакмары. Общая протяженность по руслу р. Урал — 515 км.

Модели построены в границах предполагаемого затопления для наиболее тяжелого сценария прорыва Ириклинской плотины. Разбиение на 3 участка позволило распараллелить работу между разными группами исследователей (для сокращения общего времени разработки), в значительной степени независимо выполнить калибровку, верификацию и ряд вариантных расчетов по каждой модели.

Модель 1 использовалась для моделирования сценариев гидродинамической аварии на Ириклинском гидроузле. Условие на выходной границе модели 1 задавалось из расчетов, выполненных на модели 2. На моделях 2 и 3 выполнялись все сценарные расчеты, включая волну прорыва, затопление от половодья расчетной обеспеченностью 1% и попусков с Ириклинской ГЭС.

### *Построение цифровой модели рельефа*

Цифровая модель рельефа (ЦМР) создавалась на основе единой триангуляционной поверхности (TIN). Построение и корректировка TIN выполнялась с помощью редактора триангуляционной поверхности средствами ArcGIS. Общая протяженность ЦМР составила ~1000 км, площадь 690 тыс. га. Единая TIN образована треугольниками в количестве 19.8 млн шт.

Рельеф поймы сформирован на основе геораstra разрешением 30×30 м, полученного с [12]. На пойме восстановлены относительно схематизации математической модели защитные дамбы и насыпи под автомобильные и железные дороги. Отметки гребня насыпей получены на основе ЦМР Google Earth и имеют погрешности по высоте, соответствующие точности построения рельефа в диапазоне масштаба 1 : 50000 и 1 : 100000.

Рельеф русла р. Урал частично получен в результате инженерно-гидрографических работ, выполненных в 2023 г. На остальных участках, для которых не требовалась детализация, рельеф дна русла трапецеидального профиля из условия глубины от уреза в меженных условиях: от Ириклинского гидроузла до г. Орска — 3 м, в г. Орске — 1.5–2.0 м, на участке от г. Орска до г. Оренбурга — 1.5 м, ниже г. Оренбурга — 1 м. Глубины откорректированы в процессе верификации гидродинамической модели, уклон определен по урезам с топокарт М 1 : 100 000. Сооружения Ириклинского гидроузла и буферной плотины восстановлены с чертежей сооружений. Рельеф Ириклинского водохранилища откорректирован относительно кривой объемов и уровней. Детальная ЦМР от Ириклинского водохранилища до г. Орска приведена на рис. 4, в районе г. Оренбурга — на рис. 5.

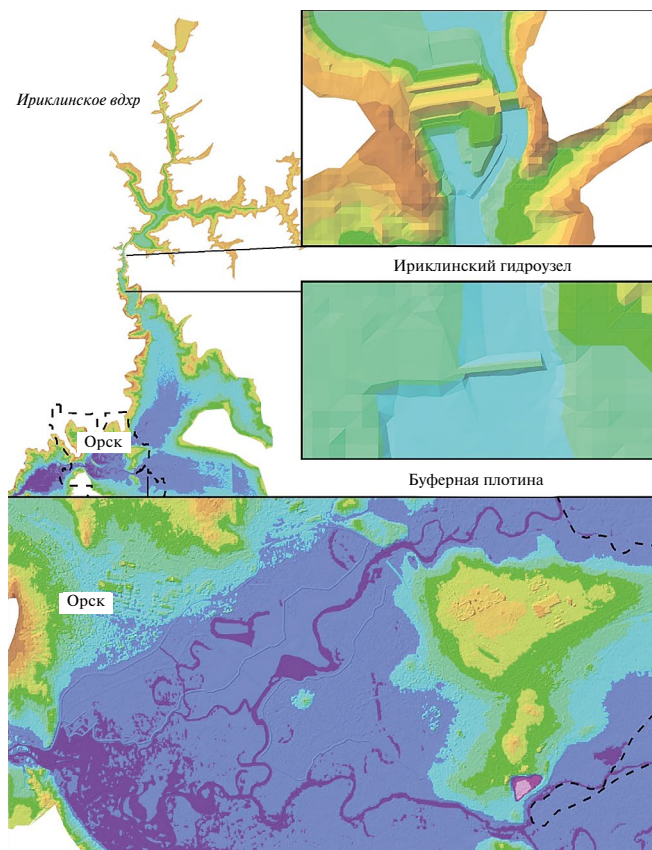


Рис. 4. ЦМР расчетного участка для моделей 1 и 2.

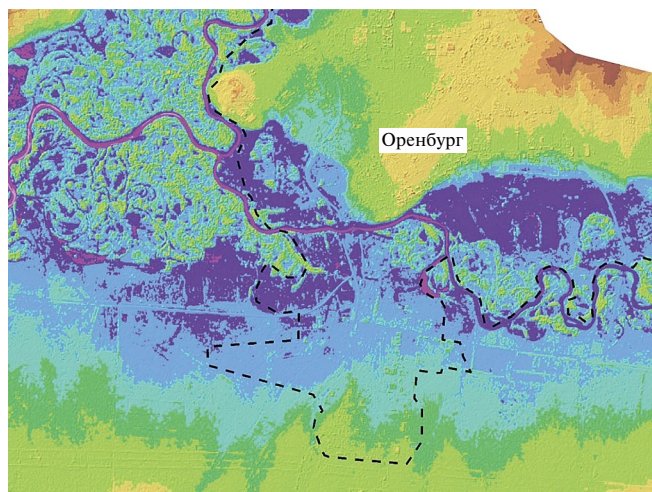


Рис. 5. ЦМР в районе г. Оренбурга, модель 3.

#### Построение расчетной адаптивной сетки

Расчетная сетка моделей — гибридная треугольно-четырёхугольная нерегулярной структуры. Для ее построения использовалась программа

“TRIANA” [3], адаптированная к современным компьютерам.

Русла рек Урал, Ори и Сакмары покрывались четырёхугольными ячейками с длинами сторон 10–20 м поперек русла и 20–45 м вдоль. На пойме строилась треугольная сетка с длинами сторон от 20 до 200 м. На сооружениях Иртишского гидроузла строилась преимущественно четырёхугольная сетка с размером ячеек 4×8 м.

Итоговая расчетная сетка модели 1 содержит 51 095 ячеек, для модели 2 — 194 387 ячеек, для модели 3 — 582 040 ячеек, фрагмент сетки представлен на рис. 6.

На модели 1 задавалось 8 границ: три входные границы по р. Урал и крупным притокам к Иртишскому водохранилищу, на которых задавался постоянный расход воды или гидрограф; одна выходная граница (в 320 м ниже буферной плотины), на которой задавалась зависимость  $Q(Z)$ , полученная в ходе калибровочных расчетов на модели 2; две внутренние границы в створе прорана и буферной плотины, а также две границы на водосбросной плотине Иртишского гидроузла, соответствующие верхнему и нижнему бьефам, здесь задавалось условие водослива.

На модели 2 задавалось 7 границ: две входные по р. Урал в створе Иртишского гидроузла и по притоку р. Ори, на которых задавались постоянные расходы или гидрографы по разным сценариям; одна выходная граница в 3 км ниже Орских

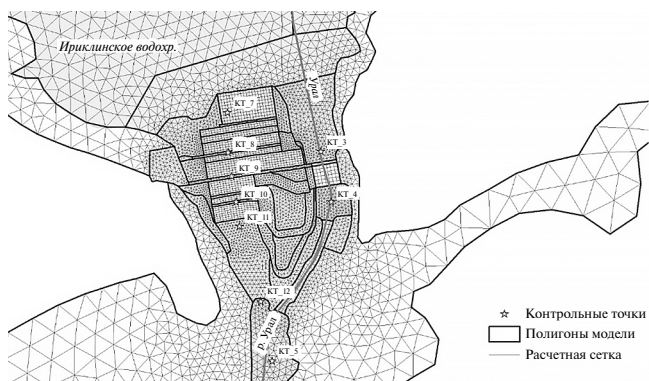


Рис. 6. Фрагмент расчетной сетки и контрольные точки модели 1, схематизация Иртишского гидроузла.

ворот, на которой задавалась  $Q(Z)$ , полученная путем последовательного подбора уровня воды при постоянном расходе; четыре внутренние границы в створе буферной плотины, по а/д мосту у с. Колпакского, ж/д мосту г. Орска и Орских ворот.

На модели 3 задавались две входные границы: по р. Урал в Орских воротах и по р. Сакмаре на гидропосту (гп) Татарская Каргала. На выходной границе модели задавалась зависимость расхода воды от уровней, полученная по морфологическому профилю долины реки.

#### *Назначение коэффициентов шероховатости*

При зонировании расчетной области по коэффициентам шероховатости ( $n$ ) выделялись русловые участки, участки поймы, дамбы и дороги.

Для русла р. Урал и притоков Ори, Сакмары  $n = 0.025$ , для грунтовых насыпей дорог, на островах и полях с умеренной растительностью  $n = 0.03$ , на заросших островах и участках поймы  $n = 0.045$ . В результате калибровочных расчетов значения коэффициентов шероховатости в формуле Маннинга уточнялись.

### ВАЛИДАЦИЯ И КАЛИБРОВКА ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ

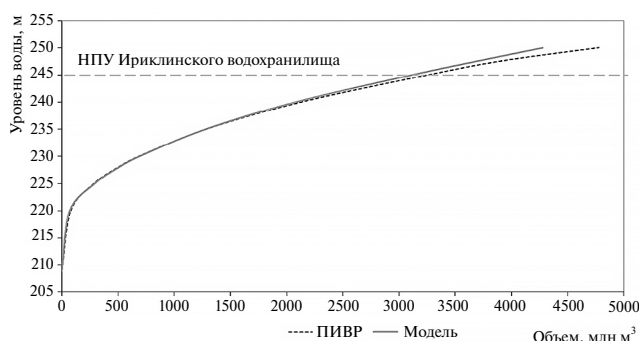
#### *Валидация численных моделей*

Валидация численных моделей заключалась в подборе емкости Ириклинского водохранилища из условия соблюдения объемов воды при заданных уровнях с зависимостью  $W(Z)$  из ПИВР [14].

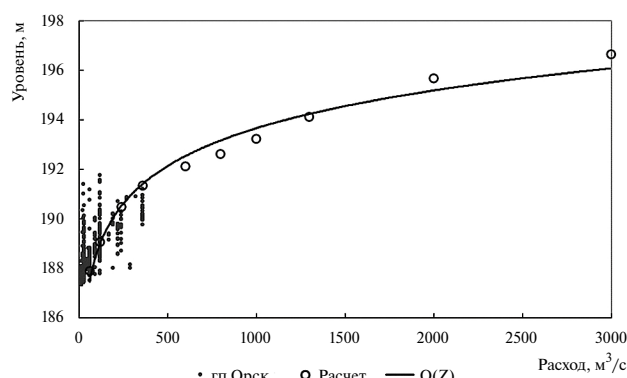
Сопоставление зависимостей объемов Ириклинского водохранилища от уровня воды из ПИВР и полученной на численной модели приведено на рис. 7, причем небольшое расхождение начинается уже при превышении НПУ водохранилища.

#### *Калибровка моделей*

Калибровка моделей выполнялась на основе имеющейся гидрологической информации по фактическим уровням воды на гидропостах “Уральск”, “Орск”, “Донское” и “Оренбург” за период 1931–



**Рис. 7.** Сопоставление зависимостей объемов Ириклинского водохранилища от уровня воды из ПИВР и полученной на численной модели.



**Рис. 8.** Результаты калибровки модели 2 на гидропосту “Орск”.

2020 гг., а также из журналов суточных сбросов с Ириклинской ГЭС за период 2000–2021 гг. На модели 2 запускалась серия расчетов на сброс с Ириклинской ГЭС расходов воды в диапазоне от 60 до 3 000 м³/с. Проводился подбор шероховатости русла и поймы р. Урал, выходного граничного условия, корректировка высотной привязки отметок русла и поймы расчетного участка.

Процесс калибровки был осложнен недостаточностью данных по рельефу и разрозненностью гидрологических наблюдений на гидропостах. Коэффициенты шероховатости в русле варьировали от 0.022 до 0.027, на пойме – 0.04 для участков полей, 0.045 для заросших участков и 0.06 для участков с высокой растительностью и застройкой. В результате калибровки модели 2 построена  $Q(Z)$ , представленная на рис. 8.

В результате калибровки модели “Оренбург” построена  $Q(Z)$ , представленная на рис. 9. На

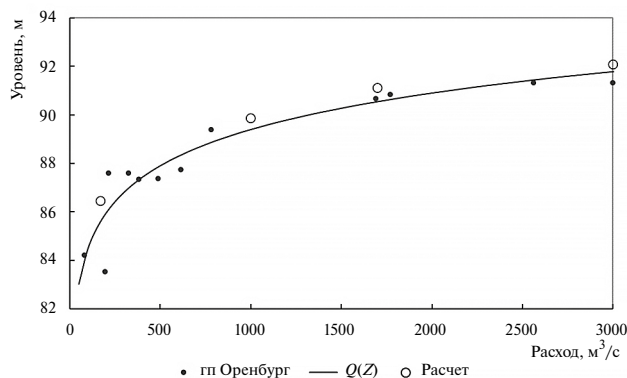


Рис. 9. Результаты калибровки модели 3 на гидропосту “Оренбург”.

модели 3 запускалась серия расчетов на расходы воды 170, 1000, 1700 и 3000 м³/с по р. Урал и 30 м³/с по р. Сакмаре, при этом на выходной границе модели задавалась  $Q(Z)$ , полученная по натурным данным. После установления постоянного расхода воды на всей численной модели уровень воды, полученный в процессе расчета на гидропостах “Оренбург” и “Донское”, сравнивался с фактическим уровнем при этом расходе, и уже в зависимости от этого корректировались значения коэффициентов шероховатости модели, после чего расчет повторялся. Таким образом, были подобраны следующие коэффициенты шероховатости: по руслу – 0.018, по пойме – 0.04, по дорогам и насыпям – 0.035.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ПОВОДОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТЬЮ 1% НА УЧАСТКЕ р. УРАЛ ОТ ИРИКЛИНСКОГО ГИДРОУЗЛА ДО г. ОРЕНБУРГА

В проекте ПИВР [15] представлен расчетный гидрограф 1% паводка для створа Ириклинской ГЭС, который задавался на входной границе модели “Орские ворота”, и выполнялся расчет продолжительностью 30 сут. По результатам расчета была получена трансформация гидрографа в створе Орских ворот, который одновременно является входной границей модели “Оренбург”. Далее измененный гидрограф задавался на модели “Оренбург” и выполнялся расчет так же на 30 сут.

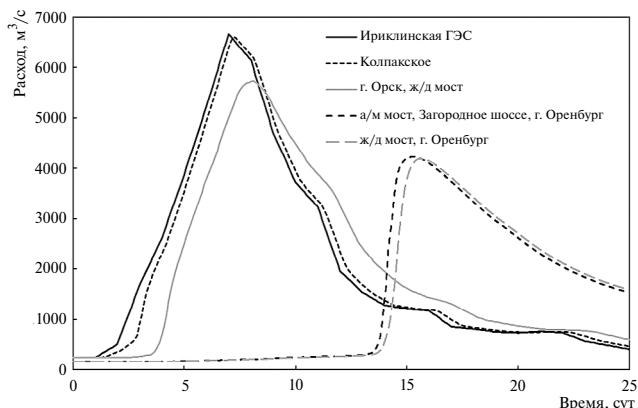


Рис. 10. Трансформация гидрографа паводка расчетной обеспеченностью 1% по длине расчетного участка.

Трансформация гидрографа расхода паводка 1%-й обеспеченности приведена на графике рис. 10. На входе в модель максимальный расход – 6660 м³/с на 7-е сут, в створе ж/д моста г. Орск – 5730 м³/с на 8.1 сут. Таким образом, время добегания максимального расхода воды от Ириклинского ГУ до г. Орск составляет ~1 сут и степень распыливания расхода не очень большая (расход снижается на ~900 м³/с).

На более протяженном участке от Орских ворот до г. Оренбурга трансформация гидрографа более заметная (максимальный расход снижается почти до 4 тыс. м³/с); причем ветвь подъема гидрографа становится очень крутой (от минимальных до максимальных значений расход нарастает за 1 сут, тогда как при сбросе с Ириклинской ГЭС это происходит за 6 сут). Это интересное явление (некий “кумулятивный эффект”) требует специального анализа.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ АВАРИИ ИРИКЛИНСКОЙ ПЛОТИНЫ

Выполнены расчеты формирования и прохождения волны прорыва Ириклинского гидроузла для двух сценариев (не основано на реальной угрозе). Расчет образования прорана в каменно-набросной плотине Ириклинской ГЭС выполнен по оригинальной методике. Учтены конструктивные особенности и фракционный состав грунта тела плотины. Выполнено моделирование распространения волны прорывного паводка в нижнем бьефе водохранилища и про-

анализированы возможные последствия при затоплении городов Орска и Оренбурга. К сожалению, в силу ограниченности объема настоящей публикации нет возможности детального описания процесса моделирования развития прорана и расчета зон затопления селитебных территорий.

*Сценарии гидродинамической аварии на Ириклинской плотине*

На основе сведений из декларации безопасности Ириклинского гидроузла [13] были назначены следующие сценарии гидродинамической аварии:

**наиболее вероятный сценарий аварии** — разрушение (проран) каменно-набросной плотины в результате потери устойчивости низового откоса и/или потери фильтрационной прочности ее тела и основания при УВБ, равном НПУ.

**наиболее тяжелый сценарий аварии** — разрушение (проран) каменно-набросной плотины вследствие перелива воды через гребень во время прохождения половодья с максимальным расходом воды обеспеченностью 0.1%.

Реализация сценариев на численной модели выполнялась следующим образом:

**сценарий 1** происходит на фоне межени при уровне воды в Ириклинском водохранилище, равном НПУ, расход притока в водохранилище равен 60 м<sup>3</sup>/с;

**сценарий 2** происходит на фоне половодья обеспеченностью 0.1% при уровне воды в Ириклинском водохранилище, превышающем ФПУ, расход притока в водохранилище задается согласно расчетному гидрографу, принятому из проекта ПИВР [15].

**Начальными условиями для сценария 1** служат установившиеся течения при расходе 60 м<sup>3</sup>/с, порог водосброса Ириклинского гидроузла подобран на пропуск заданного расхода и соблюдение условия поддержания уровня НПУ в верхнем бьефе Ириклинского водохранилища. На гребне каменно-набросной плотины задается началь-

ный проран, заглубленный на 5 м ниже НПУ. Переток воды по начальному прорану приводит к размыву плотины, ширина раскрытия прорана определяется в процессе расчета.

**Начальными условиями для сценария 2** служат установившиеся течения при расходе притока в водохранилище 334 м<sup>3</sup>/с (первая точка на расчетном гидрографе). Порог водосброса Ириклинского гидроузла подобран на пропуск заданного расхода и соблюдение условия поддержания уровня НПУ в верхнем бьефе Ириклинского водохранилища (предполоводная сработка в данном сценарии не рассматривается). Приток в водохранилище начинает нарастать в соответствии с принятым гидрографом половодья обеспеченностью 0.1%. По мере нарастания расхода притока начинается раскрытие водосбросной плотины. В момент времени, определяемый расчетом, уровень воды в Ириклинском водохранилище превысит отметку гребня каменно-набросной плотины, что приведет к ее разрушению (размыву). Максимальная ширина раскрытия прорана определяется расчетом.

Грунт тела каменно-набросной плотины задается одной фракцией с размером частиц  $d_{50} = 350$  мм,  $d_{90} = 500$  мм. Насыпи защитных дамб, автомобильных и железных дорог задаются неразмываемыми ввиду сложности и значительной протяженности участка моделирования.

Как упоминалось выше, рассмотренные сценарии гидродинамической аварии на Ириклинском гидроузле не основаны на реальной угрозе и являются гипотетическими.

*Результаты расчетов волны прорыва Ириклинского гидроузла при разных сценариях*

**Сценарий 1.** Максимальный расход через створ прорана при сценарии 1 составит ~30 800 м<sup>3</sup>/с и будет достигнут через 4 ч от момента начала аварии. Через 10 сут от начала аварии расход через проран становится равным расходу притока в водохранилище. Максимальные скорости течения в районе г. Орска для этого случая приведены на рис. 11. Скорости в сужениях под железнодорожным и автодорожным мостами достигают



Рис. 11. Максимальные скорости течения в районе г. Орска при аварии на Ириклинской плотине по сценарию 1.

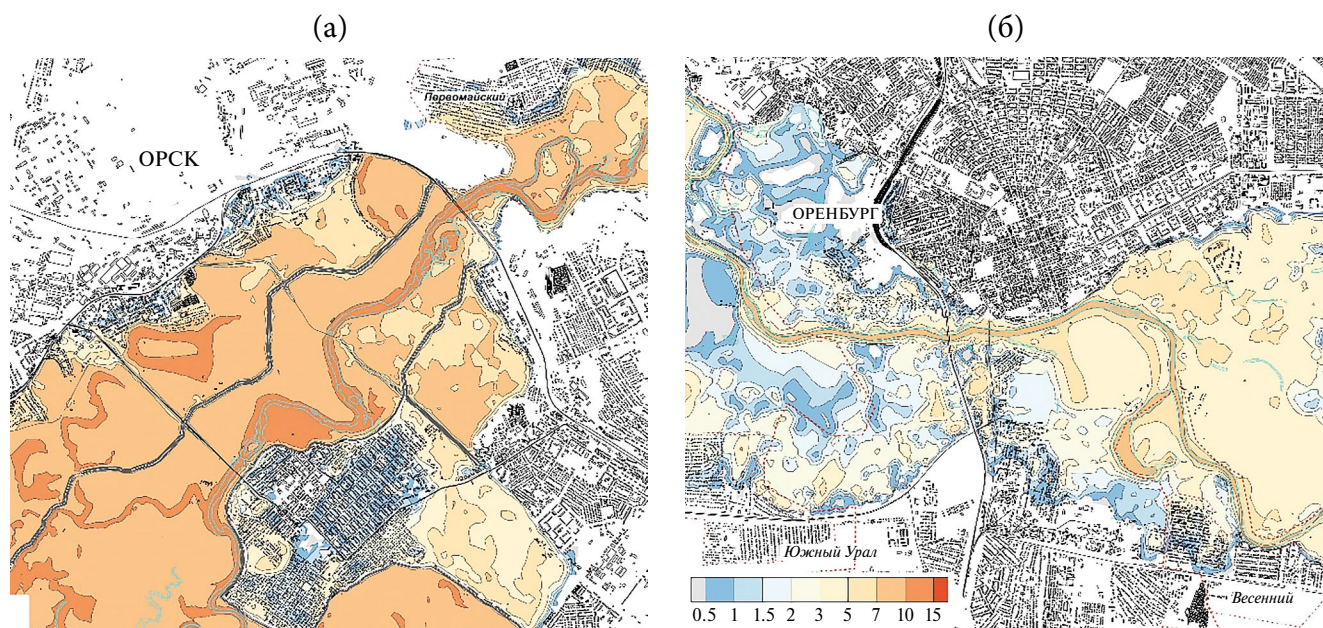
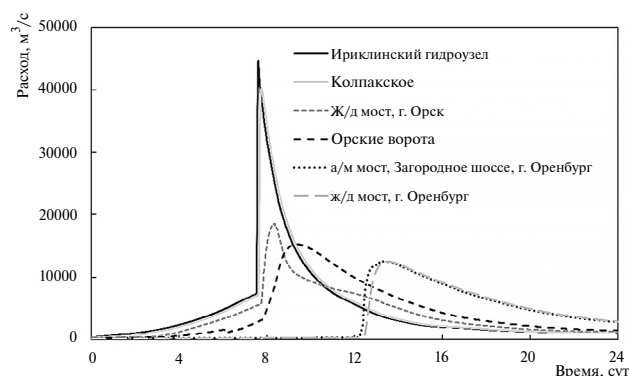


Рис. 12. Максимальные глубины затопления в городах Орске (а) и Оренбурге (б) при аварии на Ириклинской плотине по сценарию 1.



**Рис. 13.** Трансформация гидрографов прорывного паводка при аварии на Ириклинской плотине по сценарию 2.

3–4 м/с. Также построены поля максимальных глубин (рис. 12) и границы зон затопления.

**Сценарий 2.** Гидрограф излива через створ прорана и его трансформация по участку моделирования приведены на рис. 13. Максимальный расход через створ прорана при сценарии 2 составит ~45 000 м³/с и будет достигнут через 7.5 сут от момента начала расчета. Далее достаточно долго держится высокий расход, который суммируется из расходов притока 0.1% половодья и излива через проран, с постепенным снижением.

На графике рис. 13 видно, что “кумулятивный эффект” тоже присутствует. Время нарастания гидрографа в Орских воротах занимает ~3 сут, а у Оренбурга 0.5 сут. Такой эффект может быть связан с особенностями строения поймы и долины р. Урал на этом участке, с наличием больших зон аккумуляции, узких ущелий и пр. Недооценка и незнание таких и аналогичных эффектов может привести к негативным последствиям при попытке предупреждения и устранения чрезвычайных ситуаций, связанных с затоплением сельских территорий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в статье результаты научно-исследовательской работы в значительной мере — демонстрация возможностей (достаточно неполной) разработанной численной гидродинамической модели среднего течения

р. Урал, которая может быть использована для оптимизации экологических и рыбных популяций Ириклинского гидроузла в соответствии с принимаемыми критериями, для обоснования высотно-планировочных решений при застройке пойменных территорий, для выбора оптимальных участков и параметров дноуглубления, для принятия управленческих решений при опасности возникновения чрезвычайных ситуаций. К этому хотелось бы привлечь внимание Государственных органов, принимающих решения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексюк А.И., Беликов В.В. Моделирование течений мелкой воды с областями обмеления и разрывами дна // Журн. вычислительной математики и математической физики. 2017. Т. 57 (2). С. 316–338.
2. Алексюк А.И., Беликов В.В. Свидетельство 2017660266 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Программный комплекс STREAM 2D CUDA для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках с использованием технологий Compute Unified Device Architecture (на графических процессорах NVIDIA). № 2017617252. Оpubл. 20.09.2017. Реестр программ для ЭВМ. 1 с.
3. Беликов В.В. Вычислительный комплекс “TRIANA” — генератор сеток треугольных конечных элементов в произвольных плоских областях. ГосФАП СССР. П007705. 1984.
4. Беликов В.В., Алексюк А.И. Модели мелкой воды в задачах речной гидродинамики. М.: РАН, 2020. 346 с.
5. Беликов В.В., Алексюк А.И., Борисова Н.М., Васильева Е.С., Глотко А.В. Особенности численного гидродинамического моделирования протяженных участков рек // Вод. ресурсы. 2023. Т. 50. № 4. С. 367–384.
6. Беликов В.В., Алексюк А.И., Борисова Н.М., Васильева Е.С., Глотко А.В. Численное моделирование течений и деформаций дна в бьефах гидроузлов. М.: ЯНУС-К, 2023. 304 с.
7. Беликов В.В., Алексюк А.И., Васильева Е.С. Численное моделирование волн прорыва. М.: РАН, 2023. 301 с.
8. Беликов В.В., Милитеев А.Н., Кочетков В.В. Свидетельство 2001610638 об официальной регистрации программы для ЭВМ. Комплекс программ для

- расчета волн прорыва (БОР). № 2001610454. 2001. Реестр программ для ЭВМ. 1 с.
9. Беликов В.В., Семенов А.Ю. Метод Годунова с модификацией Колгана для численного решения двумерных уравнений мелкой воды // Тр. X конф. молодых ученых Моск. физ.-техн. ин-та (1985). Деп. в ВИНТИ Ч. 1. № 5983-85 Деп. с. 179–214.
  10. Беликов В.В., Семенов А.Ю. Численный метод распада разрыва для решения уравнений теории мелкой воды // Журн. вычисл. математики и математ. физики. 1997. Т. 37. № 8. С. 1006–1019.
  11. Васильева Е.С., Беликов В.В. Численное моделирование каскадной гидродинамической аварии на Верхнеуральской и Магнитогорской плотинах // Гидротехн. стр-во. 2023. № 8. С. 36–44.
  12. Глобальная цифровая модель поверхности ALOS “ALOS World 3D-30m (AW3D30)” [https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30\\_e.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30_e.htm)
  13. Декларация безопасности ГЭС Ириклинской ГЭС. Рег. № 22-22 (05) 0030-00-ГЭС. УТВ. 21 декабря 2021 г. п. Энергетик, Оренбургская обл., 2021.
  14. Основные положения правил использования водных ресурсов Ириклинского водохранилища на р. Урале. М.: Мин-во мелиорации и водного хозяйства РСФСР, Упр. по регулированию использования вод. ресурсов, 1973.
  15. Проект правил использования водных ресурсов Верхне-Уральского, Магнитогорского и Ириклинского водохранилищ. Екатеринбург: СевКавНИИВХ, 2013 г.
  16. Aleksyuk A.I., Belikov V.V. The uniqueness of the exact solution of the Riemann problem for the shallow water equations with discontinuous bottom // J. Comp. Phys. 2019. V. 390. P. 232–248. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.04.001>
  17. Aleksyuk A.I., Malakhov M.A., Belikov V.V. The exact Riemann solver for the shallow water equations with a discontinuous bottom // J. Comp. Phys. 2022. V. 450. P. 110801. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2021.110801>

## A NUMERICAL HYDRODYNAMIC MODEL OF A LONG SEGMENT OF THE URAL RIVER AND ITS APPLICATION TO ASSESSING THE INUNDATION RISK OF RESIDENTIAL AREAS BY FLOODS AND BREAKTHROUGH WAVES

V. V. Belikov<sup>a, \*</sup>, N. M. Borisova<sup>a</sup>, E. S. Vasil'eva<sup>a, \*\*</sup>, A. V. Glotko<sup>a, b</sup>, T. A. Fedorova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333 Russia

<sup>b</sup>Moscow State University of Civil Engineering (MGSU), Moscow, 129337 Russia

\*e-mail: belvv@bk.ru

\*\*e-mail: vasilevae@yandex.ru

A numerical hydrodynamic model was constructed for the segment of the Ural River from the Iriklienskoe Reservoir (inclusive) to a site 30 km downstream of the Sakmara River inflow; therefore, the total length of the model reach was >700 km. To reduce the time of model development and to accelerate the calibration and variant calculations, the segment was divided into three successive parts of the channel, interacting through consistent boundary conditions. The simulation is carried out with the use of a domestic highaccuracy software package STREAM 2D CUDA, taking into account abrupt changes in bottom elevation and multifractional soil composition. The model was calibrated for constant water discharges. Calculations were carried out for a spring flood with an exceedance probability of 1% and a breakthrough wave of the Iriklienskii Hydropower System under two scenarios. Maximal water levels, depths, and inundation zones were obtained. An effect of a many-time increase in the steepness of the leading front of the flood wave within the domain was revealed.

**Keywords:** spring flood, breakthrough wave, numerical hydrodynamic modeling, dam break, outflow hydrograph, inundation depths and areas.