

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Федорова Татьяна Александровна

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
СПРЯМЛЕНИЯ РЕЧНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

Специальность 1.6.16 Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН)

Научный руководитель: **Беликов Виталий Васильевич**,
доктор технических наук
(специальность 05.23.16 – Гидравлика и инженерная гидрология)

Официальные оппоненты: **Чалов Сергей Романович**
доктор географических наук, доцент
Московский государственный университет им.
М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши (г. Москва)

Журавлев Михаил Валентинович
кандидат технических наук, профессор
Университет морского и речного флота им. Макарова,
кафедра водных путей и водных изысканий
(г. Санкт-Петербург)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет" (НИУ МГСУ).

Защита состоится **«22» декабря 2022 года в 11 часов** на заседании диссертационного совета 24.1.040.01 при ИВП РАН по адресу: 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИВП РАН (<http://www.iwr.ru>), а также на сайте ВАК (<http://vak.ed.gov.ru/>).

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим направлять по адресу: 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3. Институт водных проблем РАН, ученому секретарю диссертационного совета 24.1.040.01.

Автореферат разослан «_____» _____ 2022 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор физико-математических наук



М.А. Соколовский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Меандрирование – естественный процесс развития речного русла, проявляющийся в его горизонтальных деформациях. Плановое смещение динамической оси руслового потока происходит большей частью времени за счет того, что вогнутые берега на излучинах размываются и отступают, а противоположные (выпуклые) берега нарастают за счет аккумуляции наносов. Со временем аккумулятивные формы у выпуклых берегов зарастают и прилегают к шпорам излучины, превращаясь в сегменты низкой молодой поймы. В зависимости от соотношения гидродинамических факторов и геологических условий территории речные излучины могут принимать различные плановые очертания и развиваться по различным сценариям. При этом прорыв шейки излучины может произойти либо в результате постепенного сближения размываемых вогнутых берегов в ее верхнем и нижнем крыле, либо в результате образования и развития прорыва (спрямляющей протоки), прорезающей шейку излучины, еще не достигшей петлеобразной формы (так называемое «незавершенное меандрирование»).

Спрявление излучины всегда является «стрессовым событием», которое может повлечь за собой изменение направленности и темпов русловых деформаций на смежных участках реки. При активном хозяйственном использовании реки и прилегающей к ее берегам территории такой «стресс» может оказаться источником серьезного риска для населенных пунктов, а также промышленных и инфраструктурных объектов.

Прогноз русловых деформаций обычно выполняется посредством сопоставления разновременных карт, аэрофото- и космических снимков. При этом принимается допущение об «инерционности» русловых деформаций – то есть предполагается, что темпы наблюдаемых смещений меандрирующего русла будут сохраняться и в будущем. Такой подход вполне оправдан при прорыве излучины в результате смыкания подмываемых берегов с учетом эмпирических зависимостей для корректировки темпов их размыва при изменении плановой кривизны русла. Однако, прогнозирование прорыва излучины, не достигшей предельной кривизны, в рамках традиционного подхода является непростой задачей, требующей специальных знаний, опыта и интуиции. Оценка последствий такого «стресса» и перестройки русла на нижележащем участке также выходит за рамки традиционного подхода.

На современном этапе альтернативным подходом к прогнозу русловых деформаций может стать численное гидродинамическое моделирование, основанное на совместном решении уравнений движения воды и наносов в деформируемом русле.

Степень разработанности темы исследований. Современные численные модели русловых деформаций основаны на дифференциальных уравнениях движения водного потока (уравнения Сен-Венана, уравнения мелкой воды) и уравнений, описывающих эрозию,

транспорт и аккумуляцию руслообразующих наносов («уравнение деформации»). Блоки русловых деформаций, реализованные в таких широко известных гидродинамических моделях как серии *DELFT*, *MIKE*, *TELEMAC* и др. ориентированы скорее на расчеты вертикальных деформаций – эрозии дна и аккумуляции наносов в пределах русла. Специальные модели, ориентированные на деформации меандрирующего русла, дополнительно решают задачу об устойчивости надводного или подводного берегового откоса [Mosselman, 1998; Darby et al., 2002; Bosa et al., 2018; Crosato, 2008; Lai et al., 2012; Motta et al., 2012; Kasvi et al., 2015; Asahi et al., 2016; Deng et al., 2019; Farrel et al., 2018; Rousseau et al., 2017; Jang, Shimizu, 2005; Duan, Julien, 2010; Zhao et al., 2021]. Такие модели вполне реалистично воспроизводят зарождение меандрирования относительно прямолинейных русел, их расширения за счет размыва берегов с последующим плавным отступанием вогнутых берегов на излучинах. В то же время они не предназначены для воспроизведения «незавершенного меандрирования» и пока еще весьма ограниченно подходят для практического применения в инженерных расчетах.

Таким образом, наименее разработанным блоком современных моделей русло-пойменных потоков с размываемым ложем является описание условий и механизма прорыва излучины. Эмпирически установлено, что излучины чаще прорываются при прохождении высоких половодий, когда на затопленной пойме продолжительное время проходят водные потоки значительной мощности. В многолетнем плане это связывают с наличием максимумов руслоформирующей активности речного потока при затопленной пойме [Маккавеев, 1955; Чалов, 1976; Чалов и др., 1998; Чернов, 2009, Leopold et al, 1964].

Ввиду того, что образование спрямляющих проток определяется широким спектром природных и антропогенных факторов, в настоящее время говорить о возможности его прогноза следует с большой осторожностью. При этом в инженерном масштабе времени, ключевым моментом являются прогнозы гидрографа высокого половодья или паводка, которые в свою очередь базируются на результатах метеорологических прогнозов. Таким образом, в настоящее время уместнее говорить скорее не о прогнозе прорыва излучины, а об упреждающем моделировании этого процесса при определенных сочетаниях факторов, ему способствующих.

Моделирование русловых деформаций позволяет перейти к многовариантному прогнозу, когда для различных сценариев изменения водности реки и ее гидрологического режима предвычислялись бы возможные варианты развития речного русла и возможные темпы его деформаций на различных участках. При этом также возможен учет техногенного изменения и обустройства речных пойм, включая разные варианты берегоукрепления.

Такому сценарному моделированию должен предшествовать этап ретроспективного моделирования - воспроизведения события, произошедшего ранее при известном сочетании

определяющих факторов. Применительно к моделированию развития речного русла фактической основой для калибровки и верификации модели являются разновременные геоизображения – топографические и навигационные карты, аэрофото- и космические снимки.

Данная концепция моделирования с использованием программного комплекса *STREAM 2D CUDA* [Алексюк, Беликов, 2017] и ее предыдущих версий *RIVER 2D* и *STREAM 2D* [Беликов, Кочетков, 2013] продемонстрировала высокую эффективность при решении широкого круга практических задач, связанных с наводнениями, транспортным использованием рек, проектированием застройки пойменных территорий, регенерацией русловых карьеров и расчетов техногенных паводков, вызванных разрушением грунтовых плотин.

Цель работы - разработка методики описания спрямления речных излучин в процессе незавершенного меандрирования с помощью численной гидродинамической модели, тестирование методики по данным наземного и спутникового мониторинга и исследование возможностей применения разработанных подходов для прогноза развития спрямляющей протоки.

Для достижения поставленной цели с помощью модели *STREAM 2D CUDA* решались следующие **задачи**:

1. Исследование чувствительности численного решения к размеру ячеек расчетной сетки, оценка оптимального соотношения размера ячеек сетки и геометрического размера моделируемого водного объекта. Оптимизация технологии построения расчетных сеток на реальные объекты.
2. Уточнение параметризации транспорта наносов по данным лабораторных экспериментов, воспроизводящих процесс самоотмостки при размыве смеси грунтов различной крупности.
3. Проведение полевых наблюдений и анализ данных спутникового зондирования земной поверхности, для задания параметров и верификации модели спрямления излучины на примере реального события.
4. Моделирование процесса формирования спрямляющей протоки для выбранного объекта за многолетний период, тестирование модели по данным наземного и спутникового мониторинга.
5. Моделирование линейной и попятной эрозии как основных механизмов формирования спрямляющей протоки через шейку излучины для реальных водных объектов.

В качестве **объектов исследования** были выбраны участки широкопойменного русла реки Пёза в Архангельской области и реки Урал на границе России и Казахстана. Оба участка этих рек характеризуются меандрирующим руслом, широкой поймой, подвижными наносами, интенсивными русловыми деформациями и рядом нерешенных практических задач, связанных

с безопасностью жизнедеятельности на их берегах и рациональным использованием прибрежных территорий. Отдельные блоки модели отработывались при воспроизведении лабораторных экспериментов (опыты А.Л. Зуйкова по исследованию перелива через водослив Крампа, опыты В.С. Кнороза по изучению процесса самоотмостки при размыве смеси грунтов различной крупности).

Метод исследования – численное гидродинамическое моделирование. Основным инструментом моделирования являлся программный комплекс *STREAM 2D CUDA* [Алексюк, Беликов, 2017].

Методология исследований состоит в разработке моделей конкретных участков рек, калибровки и верификации моделей на основе лабораторных и натурных данных и их последующем использовании для ретроспективного и сценарного моделирования.

Научная новизна работы состоит в первом опыте применения численной гидродинамической модели для воспроизведения и прогнозирования процессов формирования спрямляющей протоки при незавершенном меандрировании, включая процессы прорыва излучин, линейной попятной эрозии поверхности шейки излучины, а также заиления и отмирания прорванных излучин.

Защищаемые положения

1. Разработанная технология и практические приемы применения программного комплекса *STREAM 2D CUDA* позволяет решать прикладные задачи, связанные с моделированием неблагоприятных и опасных русловых деформаций на меандрирующих реках.
2. Впервые выполнено численное ретроспективное моделирование прорыва реальной излучины на равнинной реке за многолетний период, результаты которого хорошо согласуются с данными натурных наблюдений и дистанционного зондирования
3. Выявлена важность в процессе моделирования деформации излучин учета непрерывного изменения определяющих природных факторов (коэффициентов шероховатости, гидрографов расхода и т.п.), которые, собственно, и приводят к необратимым изменениям.
4. Численное моделирование механизма как линейной, так и попятной эрозии dna спрямляющей протоки демонстрирует определяющее влияние высоких половодий (паводков) на спрямление излучины как в историческом, так и в инженерном масштабе времени.

Степень достоверности и апробация результатов исследований. Исследование базировалось на фундаментальных законах гидродинамики, были использованы реальные натурные и экспериментальные данные о гидравлических параметрах речного потока, морфологии, морфометрии и строении речного русла на моделируемых участках. Для

калибровки и верификации моделей и их отдельных блоков использовались данные лабораторных экспериментов и геоизображений, а также гидрологические данные, находящиеся в свободном доступе.

Апробация работы. Основные положения диссертации были представлены на научных и научно-практических конференциях: *4th International Conference on the Status and Future of the World's Large Rivers (online, 2021)*; *EGU General Assembly (online, 2021)*; Семинар НИ лаборатории эрозии почв и русловых процессов и кафедры гидрологии суши МГУ (Москва, 2021); Всероссийская научная конференция с международным участием «Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения» (Нижний Новгород, 2019); *27th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics* (Монреаль, 2019); II Всероссийский научно-практический семинар "Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства" (Москва, 2019)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 8 в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад автора. Разработка численных моделей объектов исследования - подготовка исходных данных и выполнение расчетов в среде программного комплекса *STREAM 2D CUDA*, разработка сценариев моделирования, анализ результатов. Планирование, организация и выполнение полевых исследований на реке Пёза, направленных на получение исходных данных для моделирования прорыва излучины в районе Быченского сельского поселения в Мезенском районе Архангельской области.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Список использованной литературы включает в себя 103 наименования, из которых 44 на иностранных языках. Работа изложена на 120 страницах, иллюстрирована 113 рисунками и содержит 14 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приводится общая характеристика работы, обоснована ее актуальность и научная новизна, показана практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена общим вопросам, связанным с меандрированием равнинных рек: формированию и развитию излучин, механизму их спрямления, закономерностям динамики потока и транспорта наносов на изгибе русла. Рассматривается место прорванных излучин в различных морфодинамических классификациях речных русел и типизациях русловых процессов [Россинский и Кузьмин 1947, 1958; Попов, 1956; *Leopold & Wolman*, 1957; Андреев и Ярославцев, 1958; Чалов, 1979; Кондратьев и др., 1982]. Обсуждаются вопросы соотношения русскоязычной и англоязычной терминологии применительно к морфологическим элементам

извилистого русла и описанию механизма процесса меандрирования [Маккавеев, 1955; Кондратьев и др., 1959, 1984; Маккавеев, Чалов, 1986; Чалов и др., 1998; Учет руслового процесса..., 2009; Чернов, 2009; *Leopold, Wolman, Miller*, 1964; *Julien*, 2018].

Проанализирована история исследования динамики потока на изгибе русла как для естественных рек [Лежневский, 1893; Розовский, 1957; Виноградов, 1970, 1973; Зайцев, 1979; *Fargue*, 1908], так и в условиях лабораторного эксперимента [Милович, 1914; Лосиевский, 1934; Потапов, 1936; Федоров, 1954; Гончаров, 1962; Власенко, 1966; Великанова, 1968; *Matthes*, 1941; *Friedkin*, 1945; *Hooke*, 1975]. Обозначена и рассмотрена роль ведущих гидродинамических процессов – формирование поперечного уклона на изгибе русла, развитие и затухание поперечной циркуляции, взаимодействия русловых и пойменных потоков.

Все выявленные в результате теоретических, лабораторных и натурных исследований особенности механизма взаимодействия речного потока с размываемым руслом нашли отражение в алгоритмах программного комплекса *STREAM 2D CUDA*, описанию которого посвящена глава 2.

В приближении «мелкой воды» движение жидкости может быть описано системой двумерных уравнений движения и неразрывности в декартовой системе координат при осреднении компонент скорости по вертикали [Стокер, 1959; Гладышев, 1968; Годунов и др., 1976; Вольцингер, Пясковский, 1977; Куликовский и др., 2001; Беликов, Алексюк, 2020], которую по аналогии с системой одномерных уравнений часто называют «двумерными уравнениями Сен-Венана»

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = f_x - gh \frac{\partial b}{\partial x}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right) = f_y - gh \frac{\partial b}{\partial y}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

где t – время, x, y – декартовы координаты на горизонтальной плоскости, перпендикулярной направлению действия силы тяжести; g – ускорение свободного падения; $h = h(x, y, t)$ – глубина водного потока; u и v – компоненты вектора скорости течения $u = u(x, y, t)$, осредненной по глубине потока; $b(x, y)$ – высотные отметки рельефа дна; f_x и f_y – «фрикционные члены», которые характеризуют гидравлическое сопротивление вдоль осей x и y соответственно и могут быть рассчитаны исходя из формулы Шези-Маннинга: $f_x = \frac{gn^2 u |u|}{h^{1/3}}$, $f_y = \frac{gn^2 v |v|}{h^{1/3}}$, где n – коэффициент шероховатости.

Транспорт наносов и переформирования дна и описываются трехслойной моделью [Aleksyuk et al., 2019], в которой слои ограничиваются следующими поверхностями (рис. 1):

- I. Донные отложения - неподвижный слой грунта, который может лежать на поверхности «неразмываемого дна» (базальный горизонт, скала, глина).
- II. Активный слой - подвижный тонкий слой грунта, перемещающийся за счет движения влекомых наносов и гравитационного движения наносов по поверхности негоризонтального дна («диффузии дна»); его толщина может меняться за счет взмыва и осаждения взвешенных наносов.
- III. Слой жидкости, в котором частицы переносятся во взвешенном состоянии.

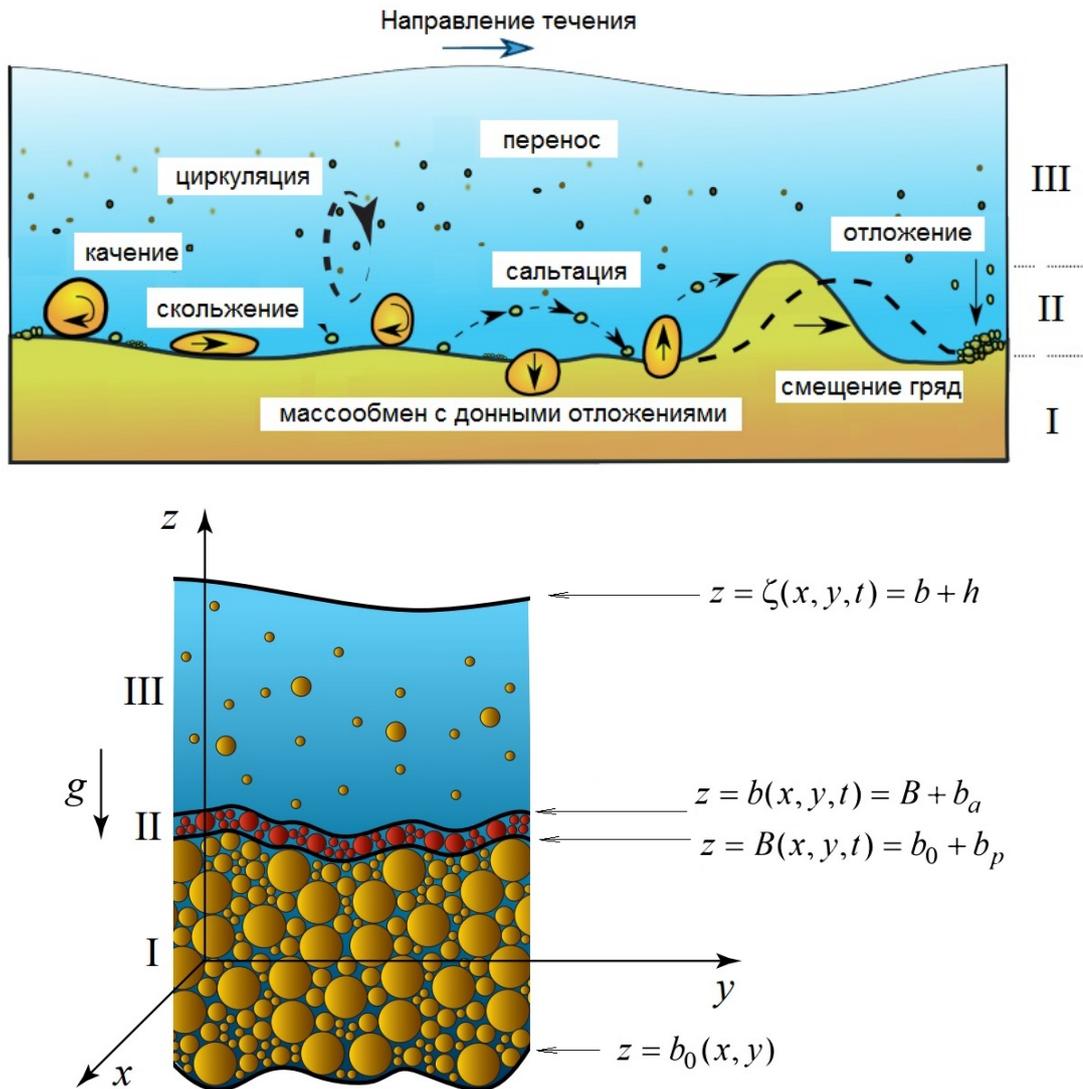


Рисунок 1 – Трехслойная модель транспорта наносов многофракционного состава [Aleksyuk et al., 2019]

Слои ограничены следующими поверхностями: $\zeta(x, y, t)$ - свободная поверхность водного потока, насыщенного взвешенными наносами; $b(x, y, t)$ - поверхность «подвижного дна», потенциально подверженного русловым деформациям; $B(x, y, t)$ - нижняя граница активного слоя донных отложений, в котором могут происходить эрозионно-аккумулятивные

процессы и формироваться отмытка; $b_0(x, y)$ - поверхность «недеформируемого дна», остающиеся неизменной в процессе работы программы (при том, что положение остальных поверхностей определяется в ходе моделирования).

Процессы переноса частиц в потоке, их взмыв и осаждение, а также диффузия отметок дна описываются $2N$ уравнениями вида

$$\frac{\partial(hS_{III}^f)}{\partial t} + \frac{\partial(huS_{III}^f)}{\partial x} + \frac{\partial(hvS_{III}^f)}{\partial y} = -F_w^f, \quad (4)$$

$$(1 - p) \frac{\partial b^f}{\partial t} = F_w^f + \frac{\partial}{\partial x} \left(D^f \frac{\partial b}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D^f \frac{\partial b}{\partial y} \right), \quad (5)$$

где b^f – суммарный вклад фракции f в толщины слоя; в каждом слое фракции наносов считаются равномерно перемешанными и характеризуются объемными концентрациями S_I^f , S_{II}^f и S_{III}^f для слоев I, II и III соответственно, где $f = 1, \dots, N$ – номер фракции; F_w^f - поток массы на границе слоев; коэффициенты диффузии для каждой фракции D_1^f , D_2^f , D_3^f – описывают процессы изменения отметок дна исходя из придонной концентрации наносов и за счет гравитационного «сползания» грунта на подводном и надводном откосе [Беликов и др., 2019; *Aleksyuk et al.*, 2019].

Система уравнений (1) – (5) решается численно на гибридной нерегулярной сетке, состоящей из элементов треугольной и четырехугольной формы. При этом применяется алгоритм решения задачи о распаде гидродинамического разрыва над скачком дна [Алексюк, Беликов, 2017]. Это также позволяет обойтись без использования трехмерных моделей для описания гидродинамики прибрежных областей. Новейшая версия программного комплекса *STREAM 2D* использует технологию *CUDA (Compute Unified Device Architecture)*, задействующую для вычисления графические процессоры. Вычислительная эффективность данного метода особо актуальна при расчете взаимодействия русловых и пойменных потоков над затопленными бровками русла, что позволяет избежать чрезмерного сгущения сетки.

Исследование чувствительности численного решения к размеру ячеек расчетной сетки, оценка оптимального соотношения размера ячеек сетки и геометрического размера моделируемого водного объекта было выполнено исходя из результатов численного воспроизведения высокоточных лабораторных экспериментов А.Л. Зуйкова (2016) с водосливом Крампа. Это позволило оптимизировать технологию построения расчетных сеток на реальные гидрологические объекты.

Верификация и уточнение параметров блока движения наносов выполнялась путем сопоставления результатов численного моделирования с результатами лабораторных

экспериментов В.С. Кнороза (1968), направленных на изучение процесса самоотмостки дна при размыве смеси грунтов различной крупности.

В главе 3 описано ретроспективное моделирование участка реки Пёза в Мезенском районе Архангельской области в районе Быченского сельского поселения (рис. 2), где в начале XXI в. произошел прорыва шейки излучины, в результате которого крупное сельское поселение оказалось отрезано от автодорожной сети региона. Спрямяющая протока со временем стала основным руслом реки (рис. 3), через которое в настоящее время организована паромная переправа и привело к прекращению наблюдений на государственном гидрологическом посту в старом русле (рис. 4).



Рисунок 2 – Схема моделируемого участка реки и его местонахождения.



Рисунок 3 – Космические снимки участка реки Пёза у Быченского сельского поселения в разные годы. Источник изображений – *Google Earth*.

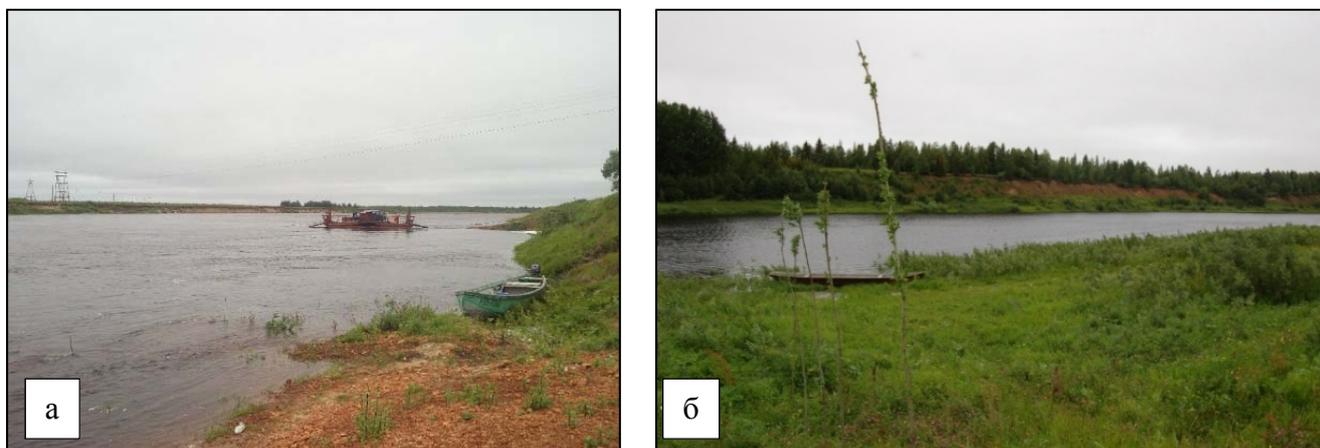


Рисунок 4 – Паромная переправа через новое русло Пёзы в месте прорыва Быченской излучины (а) и отмирающее старое русло у гидрологического поста в д. Игумново (б)

Для водного режима Пёзы, как и всех рек региона, характерна значительная неравномерность внутригодового распределения стока. Основной сток формируется в результате снеготаяния, половодье начинается в конце апреля – начале мая, максимальные расходы воды обычно проходят во второй половине мае. Уровень воды в половодье обычно

поднимается на 3-4 м над межennым урезом, а при экстремально высоких половодьях - на 5-6 м. В летнюю межень река имеет преимущественно подземное питание, а осенью обложные дожди вызывают паводки, значительно уступающие по водности весенне-летнему половодью. Минимальный сток отмечается ближе к концу зимы и в марте.

Долина реки врезана на 20-30 м в пологоволнистую равнину, сложенную ледниковыми отложениями. В нижнем течении реки ее долина ориентирована в широтном направлении, ее ширина обычно не превышает 1 км. В районе Быченского поселения на участках длиной 10-15 км выше и ниже него долина расширяется до 3-6 км, при этом русло свободно меандрирует, образуя крутые излучины и формируя сегментно-гвивистую пойму высотой 3-4 м, изобилующую старичными понижениями и озерами. Ширина русла изменяется в пределах 180-310 м, максимальная глубина плесовых лощин в межень редко превышает 1,5-2,0 м. Пойменные берега покрыты луговой и кустарниковой растительностью, коренные берега имеют высоту 15-20 м и заняты тайгой и верховыми болотами. Из крупных аккумулятивных форм преобладают побочни, находящиеся, как правило, у выпуклым берегов излучин и в расширениях русла.

Для выполнения ретроспективного моделирования русловых деформаций исследуемого участка помимо гидрологических данных с поста д. Игумново, топографических карт и одновременных космических снимков, использовались материалы полевых работ, выполненных в сентябре 2019 г. Они включали в себя промеры глубин, измерение расходов воды и уклонов водной поверхности (см. рис. 2), а также отбор проб донных наносов и пойменных отложений для гранулометрического анализа.

Верхняя граница области моделирования (рис. 5) была назначена в 6,5 км выше по течению от верхнего крыла спрямленной Быченской излучины. Здесь долина реки сужается до 2 км, и русло проходит параллельно динамической оси потока при затопленной пойме. В верхней (по течению) части моделируемого участка изначально сконцентрированный половодный поток постепенно растекается по расширяющемуся до 6-7 км пойменному массиву, заполняя хорошо выраженные староречья, самое северное из которых принимает сток Ошуги.

В верхней части области моделирования пятикилометровый участок относительно узкой долины (до 3-3,5 км шириной) с простым рельефом и плавными очертаниями может рассматриваться как «участок разгона модели», где вычислительные эффекты, связанные с неточностью задаваемого моделью распределения скоростей течения вдоль верхней границы должны затухать.

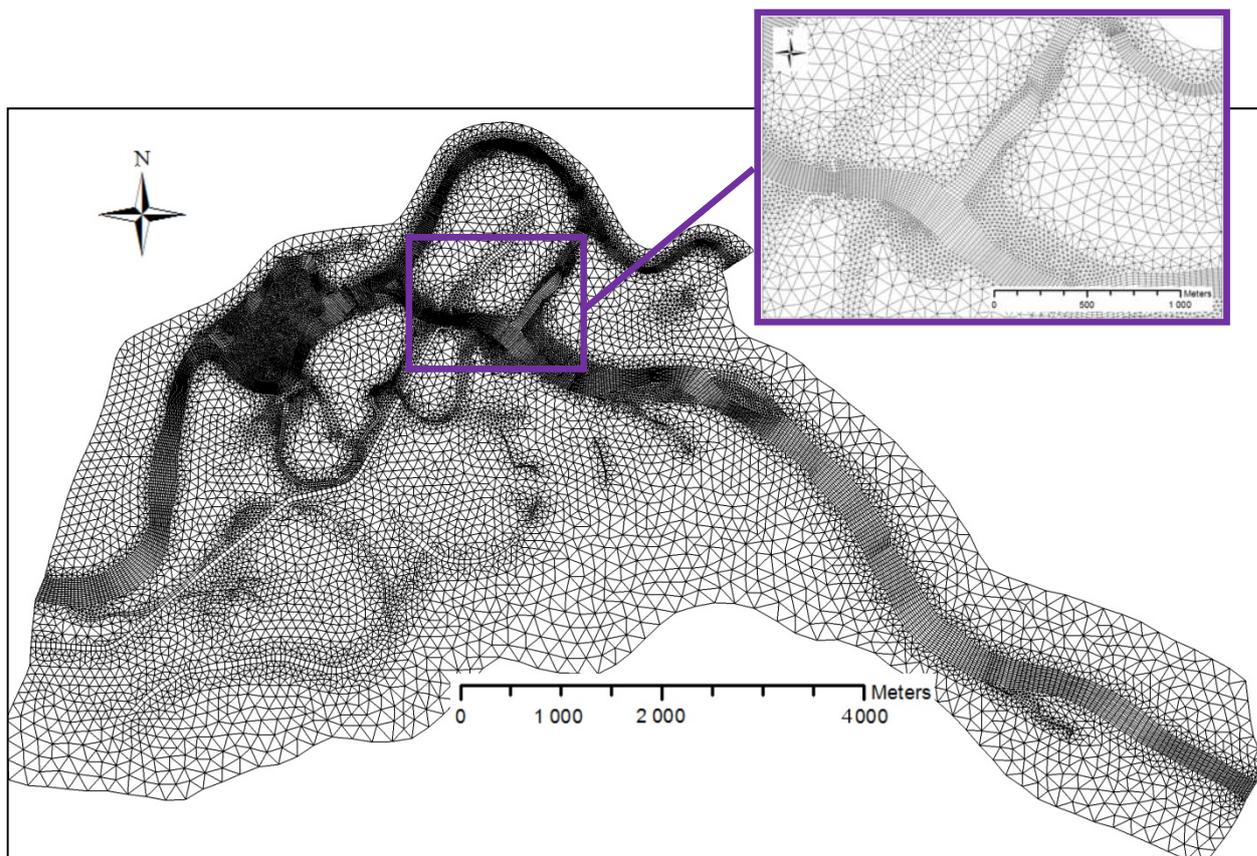


Рисунок 5 – Расчетная сетка на моделируемый участок русла и поймы реки Пеза с укрупненным фрагментом на место разделения на старое русло и спрямляющую протоку

Нижняя граница модели была отнесена к месту сосредоточенного выхода пойменного потока из левобережных староречий в 6 км ниже соединения старого и нового русла в нижнем крыле Быченской излучины. В нижней части моделируемой области должны были затухать вычислительные эффекты, связанные с заданием единого уровня вдоль нижней границы.

Таким образом, Быченская излучина находилась в центральной части моделируемой области, что обеспечивало адаптацию моделируемого скоростного поля потока к задаваемому рельефу и полям шероховатости при минимальной зависимости от неточности задания граничных условий. Боковые границы области моделирования проходили по подножью уступа коренного берега и крайне редко затапливаемой высокой поймы (7-9 м над меженным урезом). При такой схематизации днища долины длина области моделирования составила 8,7 км по прямой или 12,5 км по руслу реки при максимальной ширине 7,0 км.

На область моделирования с помощью генератора сеток «*TRIANA*» [Беликов, 1984] была построена гибридная (состоящая из ячеек треугольной и четырехугольной формы) сетка нерегулярной структуры, включающая 37 329 ячеек. Прямоугольные ячейки покрывали русловую сеть, староречья и трассы возможного прорыва излучин, их длина составляла 20-25 м, ширина – 10-12 м. Треугольными ячейками была покрыта пойма, причем длины сторон

треугольников постепенно увеличивались от 20-25 м у бровок русла до 100-200 м вдоль тыловых швов долины.

Для задания значений коэффициента шероховатости область моделирования была подразделена на полигоны, каждый из которых характеризовался едиными ландшафтно-геоморфологическими условиями: активное русло, зарастающее русло, луговая пойма, кустарниковая пойма, старичное понижение и т.п. Всем ячейкам внутри полигона присваивалось единое значение коэффициента шероховатости Маннинга.

Калибровка модели выполнялась для гидрологической ситуации, соответствующей условиям выполнения полевых работ 22 сентября 2019 г. в высокую межень. На данном этапе основной задачей был подбор коэффициентов шероховатости в пределах русловой сети, которые оказались равны 0,015 для акватории активного русла и 0,020 для побочной и массивов молодой слабо заросшей поймы. Дальнейшая калибровка модели была ориентирована на определение шероховатости поймы, исходя из допущения, что глубина потока в верхней и нижней части моделируемой области над морфологически однородными элементами пойменного рельефа должна быть одинаковой.

В ходе ретроспективного моделирования задавались реальные гидрографы половодий по посту д. Игумново с 1996 по 2007 г. (до прекращения измерений расходов воды на посту), а с 2008 г. гидрографы стока р. Пёзы, восстановленные по уровням в створе поста.

За исходное состояние русла была принята ситуация 1996-1997 гг., когда спрямляющая протока Быченской излучины еще не начала развиваться (см. рис. 3). В соответствии с характером растительного покрова (кустарник, луг, песок) на поверхности поймы в пределах шейки Быченской излучины были назначены значения коэффициентов шероховатости в диапазоне 0,02-0,10. На основании анализа степени нарушенности растительного покрова в те годы можно было бы ожидать либо спрямление Быченской излучины у основания ее шейки, либо одновременное спрямление Быченской и нижележащей излучины.

Первые признаки развития спрямляющей протоки через шейку Быченской излучины появились в половодье 1998 г., когда произошло существенное нарушение растительного покрова поймы и развитие свежей бороздины вдоль динамической оси половодного потока через шейку излучины. В последующие годы бороздина расширялась и углублялась при прохождении половодий, и к 2001 г. вода как на пике, так и на спаде относительно невысокого половодья уже текла по бороздине, спрямляющей Быченскую излучину. В меженный период течение происходило по старому руслу, однако в верхнем крыле излучины произошли видимые русловые деформации: начали формироваться побочни, а на неразветвленном участке реки, находящемся непосредственно выше излучины, размыв обширного правобережного побочня сменился аккумуляцией наносов на его поверхности и в верховьях старого русла. Эти

переформирования, отчетливо прослеживающиеся при сопоставлении разновременных космоснимков, хорошо воспроизводились моделью. При этом значения коэффициентов шероховатости вдоль трассы спрямления излуины уменьшались по мере срыва растительного покрова поймы до 0,05-0,08.

За последующее десятилетие вне зависимости от водности года и формы гидрографа половодья происходило дальнейшее развитие спрямляющей протоки за счет размыва пойменных берегов с формированием в ее русле подвижных аккумулятивных форм. Признаки аккумуляции наносов в верхнем крыле Быченской излуины, обмеления и зарастания старого русла стали проявляться на космических снимках всё отчетливей, и к летней межени 2007 г. основное течение реки окончательно переместилось в спрямляющую протоку (рис. 6).

В многоводный период 2008-2009 г. произошло существенное расширение спрямляющей протоки с углублением ее нижней части и формированием там правобережного побочня. При этом аккумуляция наносов в старом русле, откуда ушла значительная часть половодного потока, существенно интенсифицировалась, и к межени течение воды в нем практически прекратилось. Основные черты рельефа русла и поймы в районе Быченской излуины стали близок к современным, однако зарастания захода в старое русло тогда еще не произошло.

В последующий маловодный период 2010-2012 г. направленность развития Быченской излуины сохранилась, причем спрямляющая протока приобрела современные очертания и ширину, а последующие изменения в старом русле происходили за счет его зарастания и сужения. Открытая водная поверхность в межень там сохраняется только вдоль правого берега за счет промывки потоком р. Ошуги. Увеличение шероховатости зарастающих участков старого русла до 0,03 привело к дальнейшему перераспределению стока в пользу нового русла, и к 2016 г. Быченское разветвление приобрело современные очертания.

Глава 4 посвящена сценарному моделированию возможного развития меандрирующего русла реки Урал на границе России и Казахстана (рис. 7). В отличие от ретроспективного моделирования, задачей которого является воспроизведение ранее произошедших событий, сценарное (или упреждающее) моделирование является основой для разработки прогноза возможного развития событий при различных вариантах проявления природных и техногенных факторов, определяющих направление и интенсивность исследуемых процессов. Применительно к русловым деформациям наиболее важным из активных определяющих факторов является водный режим реки, а также меры инженерного воздействия на речное русло с целью его регулирования.

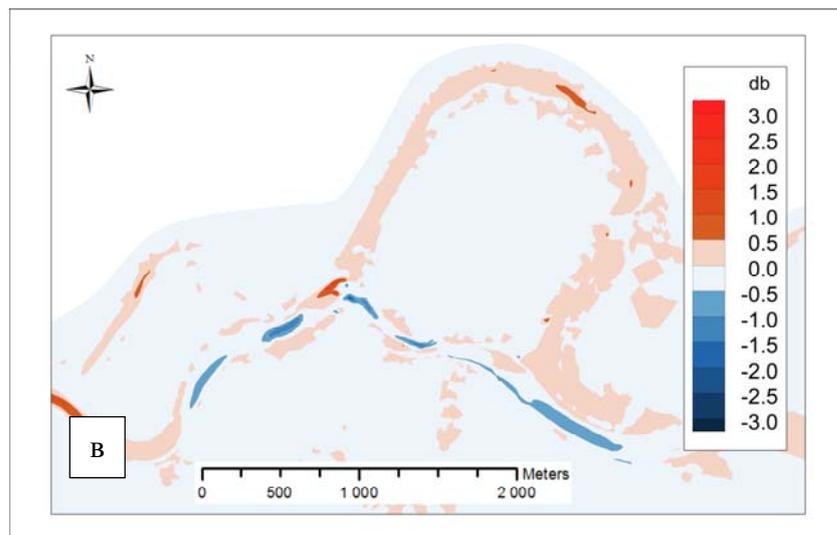
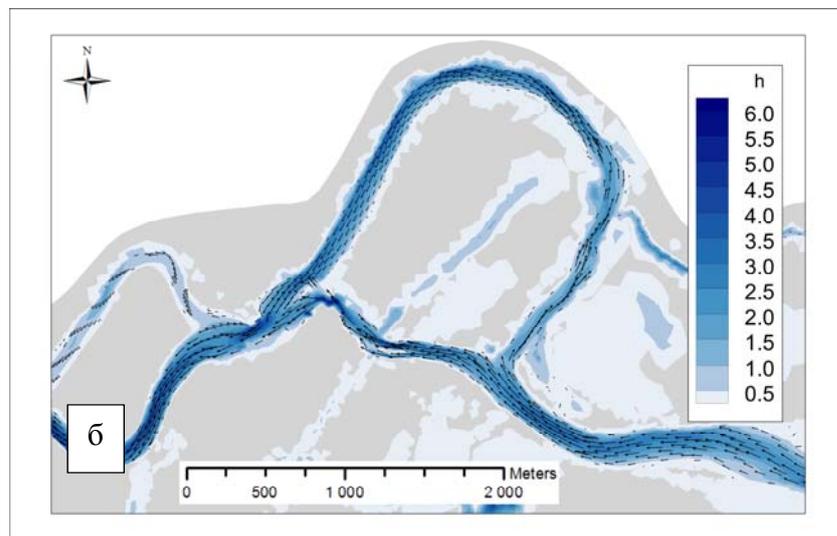


Рисунок 6 – Быченская излучина после половодья 2007 г. а) космический снимок (источник – *Google-Earth*); б) глубина и скоростное поле потока на спаде половодья; в) годовой слой эрозии (синие тона)/аккумуляции (красные тона)

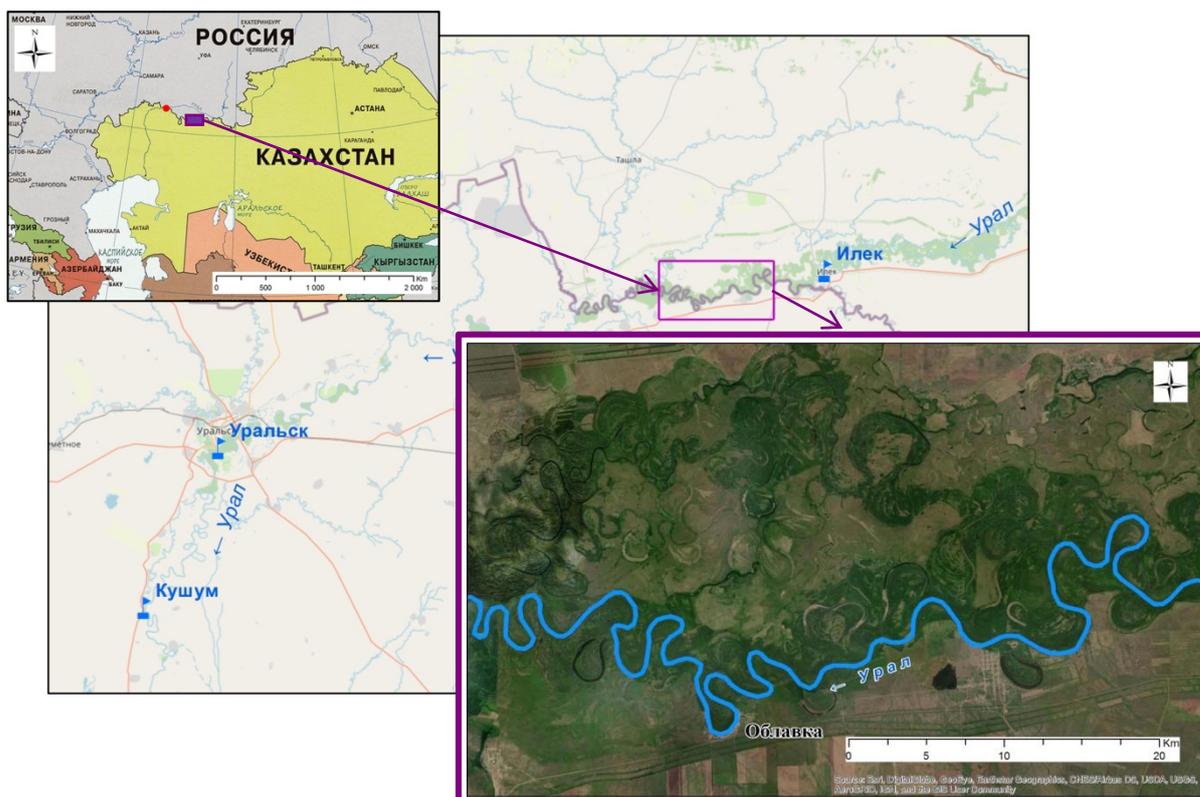


Рисунок 7 – Участок широкопойменного русла р. Урал
(космический снимок - *Google Earth* 2006 г).

Водный режим реки Урал на данном участке характеризуется казахстанским типом с четко выраженной однопиковой волной весеннего половодья и низкой меженью, которая лишь в отдельные годы может прерываться дождевыми паводками летом и осенью. На весенний период приходится более 80% годового стока. Весеннее половодье обычно начинается в апреле. Максимальные темпы подъема уровня достигают 3-4 м в сутки. Максимальные уровни держатся 1-3 дня, относительно высокие – 20-40 дней.

Спад уровней, как правило, происходит значительно медленнее, чем подъем. Наибольшая интенсивность спада обычно колеблется в пределах 0,3-1,3 м в сутки, иногда достигая 1,5-3,3 м. В затяжные холодные весны спад может происходить с интенсивностью 0,03-0,10 м в сутки. Обычно до конца мая уровень воды в реке понижается сравнительно быстро, а с мая по август - значительно медленнее, скорость снижения при этом зависит от интенсивности испарения и режима подземного стока.

Норма стока реки Урал у с. Кушум составляет $309 \text{ м}^3/\text{с}$, максимальные расходы на порядок превышают среднегодовые значения при максимальном зарегистрированном расходе $13\,700 \text{ м}^3/\text{с}$. При средней высоте половодья 6–7 м над меженным уровнем течение происходит в пойменных бровках, но при подъеме на 9–10 м, затапливаются пойменные участки окрестных степей, мощный речной поток разливается на несколько километров и интенсивно размывает

берега. Русловые деформации в меженный период незначительны по сравнению с половодьем, несмотря на существенное различие продолжительности этих фаз водного режима реки Урал.

Русло реки интенсивно меандрирует, изобилуя мелями и перекатами, в местах прорывов излучин и их серий проявляется многорукавность. Широкопойменное русло часто образует петлеобразные и сундучные излучины, имеющие шаг от 0,5 до 2-3 км. Ширина поймы совпадает с шириной пояса меандрирования и составляет 8-12 км. Вогнутые берега излучин интенсивно размываются, темпы размыва могут достигать в многоводные годы 10–12 м/год (Русловой режим..., 1994). Активные эрозионные русловые процессы вдоль левого берега р. Урал у казахстанского села Облавка, на пограничном с Россией участке, привели к ситуации чрезвычайного характера, угрожающей сохранности памятников культуры и инфраструктурных объектов. Здесь в ходе развития крутой излучины (рис. 8) в зоне разрушения берегового откоса оказался уникальный курганный археологический комплекс IV II века до н.э., возникла угроза жилым и хозяйственным постройкам с. Облавка, а также участку автомобильной дороги республиканского значения.

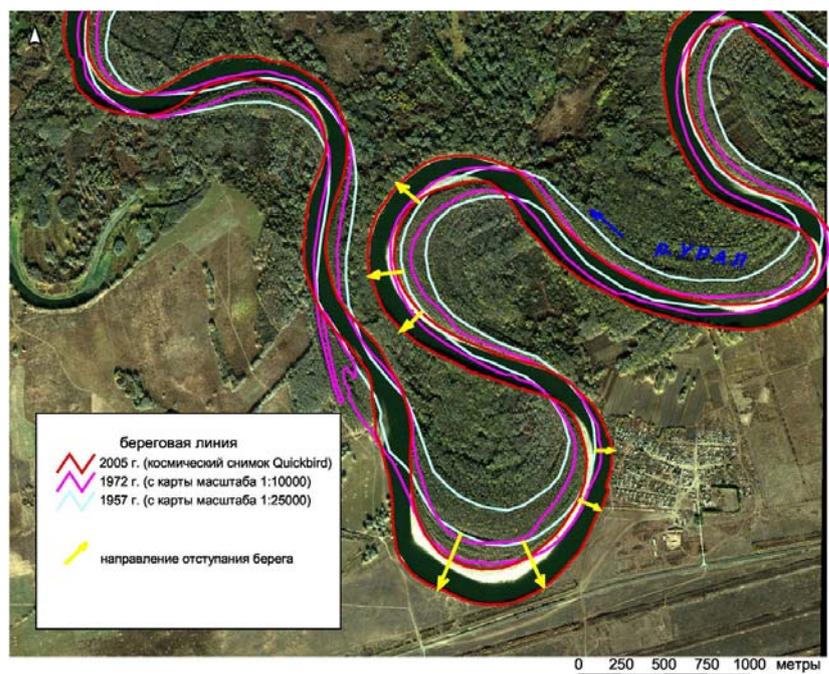


Рисунок 8 – Схема деформаций излучин р.Урал у с. Облавка

Сопоставление топографических карт 1957 и 1972 гг. и космического снимка 2005 г. показало, что средняя скорость отступления берега у с. Облавка составляет 3–4 м/год, причем в вершине излучины темпы отступления берега выше – до 6–7 м/год. Ширина шейки излучины, в вершине которой располагается с. Облавка, сократилась в наиболее узком месте с 300 м в 1957 г. до 150 м в 2005 г. При сохранении таких темпов разрушения берега полное разрушение пойменной перемычки

здесь можно было бы ожидать примерно к 2050 г. Однако прорыв шейки излучины также возможен непосредственно у ее основания, где ширина пойменного отрезка составляет около 400 м.

Схематизация расчетной области выполнялась таким образом, чтобы обеспечить возможность прогноза развития русла р. Урал на участке, примыкающем к укрепленной излучине у с. Облавка при различных вариантах повторяемости многоводных и маловодных лет. Для расчетов была построена нерегулярная гибридная сетка на область длиной 50 км и шириной до 20 км, включающей всю пойму и прилегающие участки бортов долины р. Урала на участке от с. Студеное до с. Бородинск (рис. 9). Четырехугольные ячейки в русле имели ширину 10-12 м и длину 15-20 м, а пойма была покрыта ячейками треугольной формы с длинами сторон от 20 до 90 м в зависимости от степени близости к бровкам русла и возможному положению динамической оси половодного потока. Помимо излучины, в вершине которой находится с. Облавка область моделирования включала в себя всю серию излучин, на которую потенциально могло бы распространиться влияние берегоукрепления у с. Облавка. Кроме того, к верхней части области был добавлен участок «разгона» модели, а к нижней «компенсационный» участок для сглаживания возможных вычислительных неточностей при задании нижнего граничного условия. Общее количество ячеек сетки - 96 289.

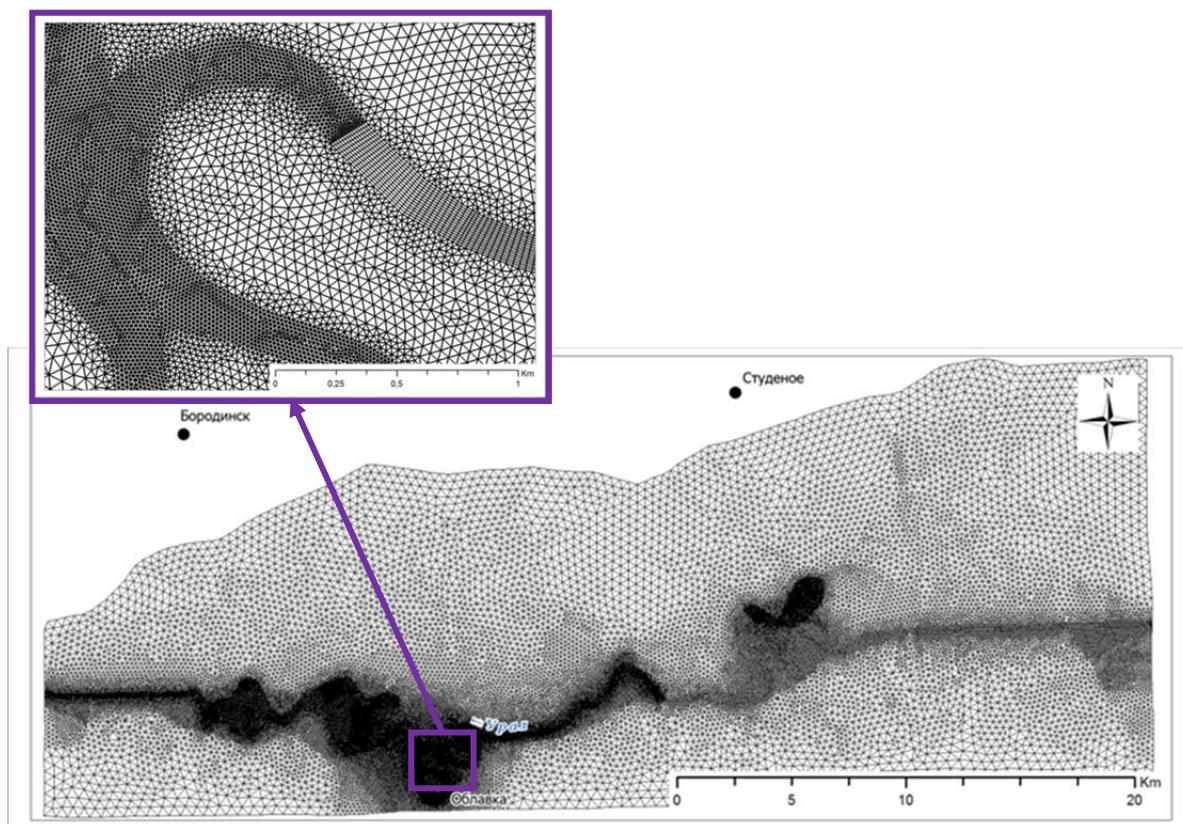


Рисунок 9 – Расчетная сетка на моделируемый участок русла и поймы реки Урал в районе с. Облавка

Граничные условия модели (расходы воды на верхней границе и уровни на нижней) формировались на основании данных о расходах и уровнях воды по гидрологическим постам с. Илек и с. Кушум (см. рис. 6). Для калибровки модели были использованы данные проектно-изыскательских работ по берегоукреплению у с. Облавка. В результате коэффициенты шероховатости составили для русла 0,03, для поймы – 0,10. Для верификации принятых параметров было выполнено моделирование прохождения расходов 20, 100, 200, 500, 1000, 1500, 2000, 5000, 8000 м³/с при установившемся режиме течения, а также максимального зарегистрированного расхода воды 13 700 м³/с. При этом глубина потока на морфологически однородных уровнях затопленной поймы в начале и конце моделируемого участка должна была быть одинаковой и соответствовать нижнему граничному условию.

В ходе сценарных расчетов задавались последовательности из нескольких лет различной водности, скомпонованные случайной выборкой из гидрографов реальных лет (рис. 10).

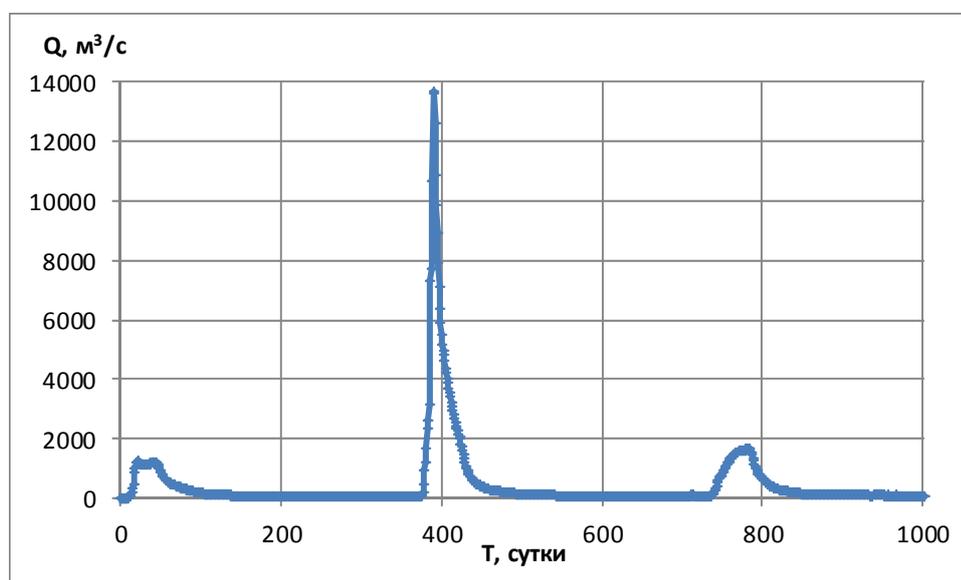


Рисунок 10 – Пример схематизированного расчетного гидрографа р. Урал за последовательность маловодного (1977), максимально многоводного (1957) и среднего по водности (1958) года (без зимней межени).

Было установлено, что после прохождения невысокого половодья происходят весьма незначительные переформирования русла, происходящие главным образом на участке выше с. Облавка, и состоящие в некотором углублении русла на вышележащей излучине и сглаживании ее нижнего крыла. Расчеты показали, что наибольшие скорости течения у размываемых берегов наблюдаются при расходах воды в диапазоне от 1000 до 2000 м³/с, при таких расходах будут наблюдаться наибольшие размывы берега потоком, проходящим в пойменных бровках при скоростях течения, достигающих 1,0-1,2 м/с.

При расходах воды более 2000 м³/с скорости течения у размываемых берегов уменьшаются, соответственно темпы размыва берега при дальнейшем увеличении расходов

воды не возрастают из-за выхода воды на пойму. При расходах воды $5000 \text{ м}^3/\text{с}$ и более происходит спрямление динамической оси потока - основная его часть потока движется по пойме в направлении продольного уклона долины. При этом часть воды, заходящая в затопленное русло на излучинах, движется в направлении, перпендикулярном направлению пойменного потока, и это снижает скорости течения в основном русле. По мере роста уровней воды скорости течения на затопленной пойме начинают достигать значений $0,7-0,9 \text{ м/с}$, превышающих неразмываемые значения скоростями для грунтов, слагающих пойму реки. В этом случае становятся возможны прорывы излучин с формированием новых русел – спрямляющих протоков (рис. 11).

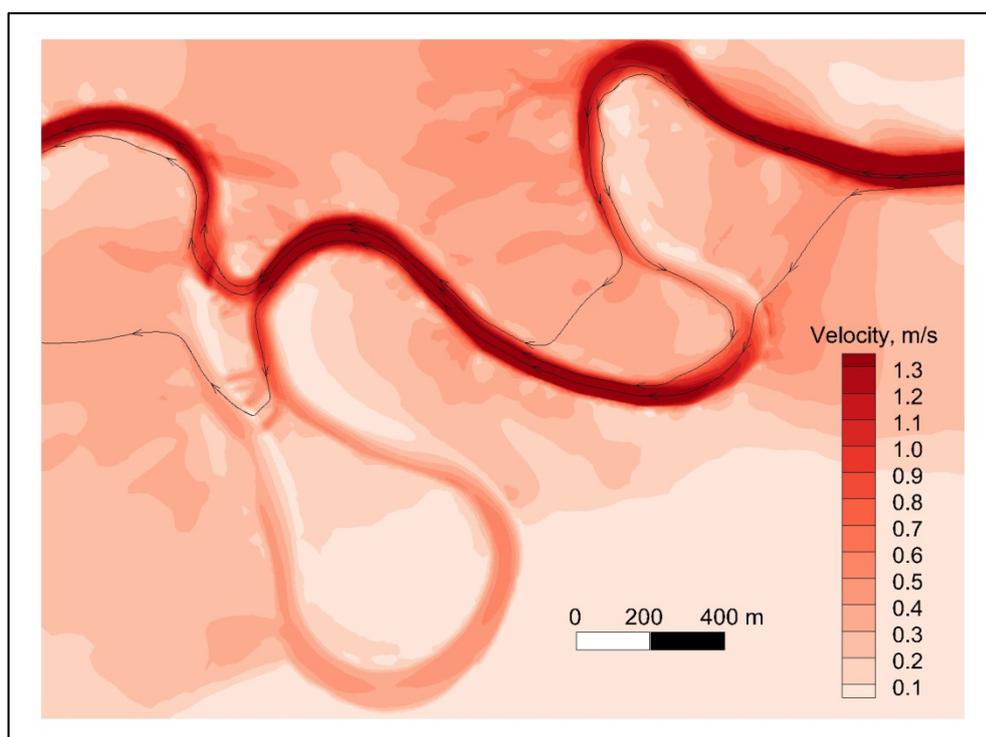


Рисунок 11 – Скоростное поле потока р. Урал в районе с. Облавка при максимальном расходе воды $13\,700 \text{ м}^3/\text{с}$.

Так при прохождении наиболее высокого половодья еще на подъеме его волны при расходе $7730 \text{ м}^3/\text{с}$ по кратчайшему пути в центральной части шейки излучины начала образовываться спрямляющая протока (прорва). Однако после прохождения пика половодья у самого основания шейки излучины сформировалась еще одна прорва, которая практически спрямила русло, и за счет попятной эрозии (в том числе результате стекания вод с правобережного пойменного массива) размылась до ширины $100-120 \text{ м}$, характерной для основного русла р. Урал на исследуемом участке). В это же время наметилось (но не произошло) спрямление двух вышележащих излучин.

В меженный период и при последующих невысоких половодьях значительных русловых переформирований не происходит, они в основном сводятся к углублению русла в

спрямляющей протоке, началом искривления ее русла с началом формирования новой излучины и отложению наносов в верхней части старого русла, проходящего у с. Облавка. Анализ скоростных полей, формирующихся после развития спрямляющей протоки показал, что при расходах в диапазоне от 1000 до 5000 м³/с скорости течения в ней могут достигать 2 м/с, в то время как в старом русле у вогнутого берега излучины они снизятся до 0,2-0,4 м/с при расходах около 1000 м³/с и до 0,4–0,6 м/с при больших расходах воды. В дальнейшем при таких скоростях течения будет наблюдаться постепенное заиливание участка русла у с. Облавка и превращение его в пойменную протоку или старицу.

Обращает на себя внимание механизм формирования спрямляющей протоки. Здесь в отличие от реки Пёза, где невысокая пойма сложена легко размываемыми песчаными и супесчаными грунтами однородного механического состава, и линейная эрозия происходит по всей длине спрямляющей протоки, механизм развития прорыва иной. Ее зарождение происходит в нижнем крыле излучины, где пойменный половодный поток концентрируется в понижениях рельефа и буквально сливается с высокой затопленной поймы в русло, срывая растительный покров и почвенные горизонты, препятствующие эрозии при спокойном течении потока по пойме. При достаточно продолжительном течении область попятной эрозии распространяется вверх по течению, пока не прорежет шейку излучины насквозь. Такой процесс мог бы произойти с излучиной у с. Облавка, если бы экстремально высокое половодье 1957 г. произошло при современном состоянии русла (рис. 12). Анализ полей скоростей течения и глубин показывает, что прорыв происходит не по прямой, и не через самое узкое место на шейке излучины, а оказывается приурочен к динамической оси потока на затопленной пойме при соответствующем уровне ее затопления.

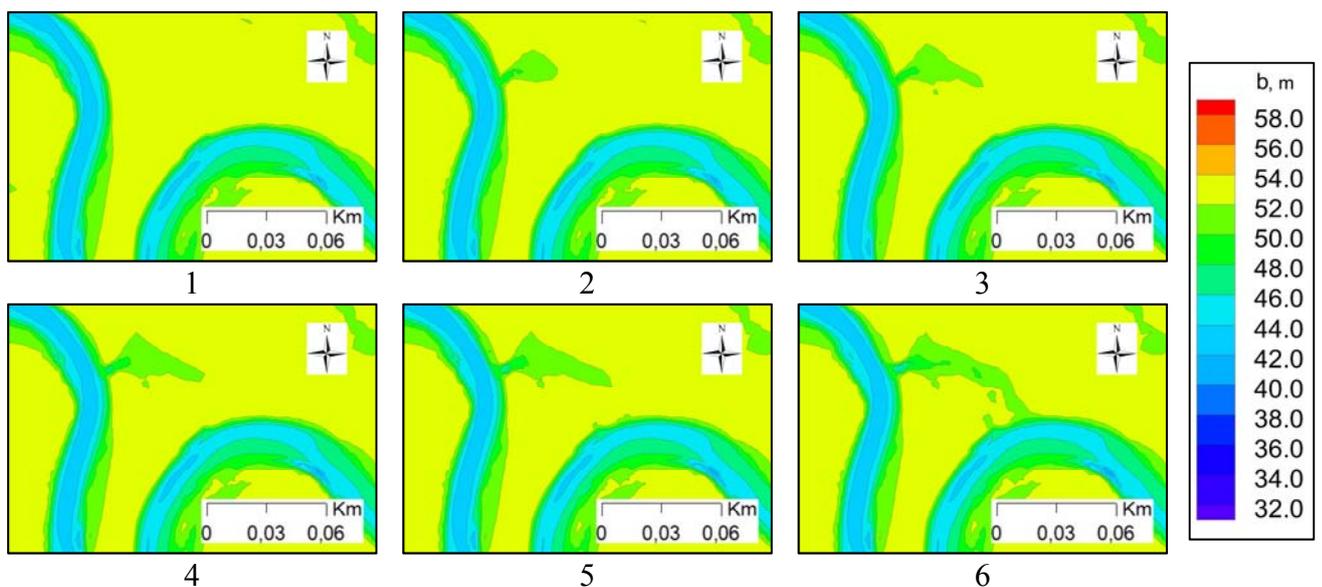


Рисунок 12 – Развитие попятной эрозии шейки излучины у с. Облавка в случае прохождения максимального половодья

Выполненные сценарные расчеты позволяют предвидеть возможные варианты развития русла р. Урал на пограничном участке и разрабатывать практические мероприятия по регулированию русловых деформаций с целью минимизации возможных нежелательных последствий в сфере использования приграничных земельных и водных ресурсов.

Суммируя результаты моделирования развития русла реки Пёза в районе Быченского сельского поселения и реки Урал на пограничном с Казахстаном участке у с. Облавка в **заключении** делаются следующие выводы:

1. Концепция применения численного моделирования в совокупности с полевыми исследованиями и анализом данных дистанционного зондирования для исследования русловых процессов реализована в масштабе времени, соответствующем решению инженерных задач. Разработанная технология и практические приемы применения программного комплекса *STREAM 2D CUDA* позволяет решать прикладные задачи, связанные с моделированием неблагоприятных и опасных русловых процессов.

2. Ретроспективное моделирование с использованием программного комплекса *STREAM 2D CUDA* продемонстрировало принципиальную возможность прямого численного моделирования развития излучин равнинных рек на основе двумерных физико-математических моделей. Моделирование позволило воспроизвести основные этапы и механизмы прорыва излучины – образование спрямляющей протоки, ее расширение и углубление, блокирование побочном и заиление старого русла.

3. Технологию моделирования в комплексе со специальными полевыми исследованиями можно рассматривать как первый шаг к сценарному прогнозу русловых деформаций, что в свою очередь позволяет разрабатывать практические меры регулирования использования пойменных земель и минимизацию неблагоприятных проявлений русловых процессов.

4. Дальнейшее совершенствование технологии моделирования горизонтальных русловых деформаций может осуществляться посредством автоматизации процедуры изменения параметров шероховатости русла и поймы в результате русловых деформаций, а также сезонных и многолетних вариаций растительного покрова поймы.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, в т. ч. из списка ВАК:

1. **Федорова, Т.А.** Моделирование прорыва излуины при свободном меандрировании / **Т.А. Федорова**, А.М. Алабян, В.В. Беликов // ГеоРиск. – 2021. – Том XV, № 1. – С. 28-42. DOI: 10.25296/1997-8669-2021-15-1-28-42.
2. **Федорова, Т.А.** Численное моделирование через гребень плотины треугольного профиля / **Т.А. Федорова**, Е.С. Васильева, В.В. Беликов. // Гидротехническое строительство. – 2020. - №4. – С. 30-33. [Fedorova, T.A. Numerical simulation of triangular dam overflow / **Т.А. Fedorova**, E.S. Vasil'eva, V.V. Belikov // Power Technol. Engineering – 2020. –Vol. 54. - P. 354–357. [DOI: <https://doi.org/10.1007/s10749-020-01215-w>]].
3. Belikov, V.V. On the Effect of the Froude Number and Hydromorphometric Parameters on Sediment Transport in Rivers / V.V. Belikov, N.M. Borisova, **Т.А. Fedorova**, O.A. Petrovskaya, V.M. Katolikov. // Water Resources. – 2019. – Vol. 46. Suppl. 1. – P. S20–S28. – [DOI: 10.1134/S0097807819070029].
4. Vasil'eva E.S. Numerical modeling of the behavior of a destructive rain flood on a mountain river. / E.S. Vasil'eva, P.A. Belyakova, **Т.А. Fedorova**, V.V. Belikov // Water Resources. – 2019. – Vol.46(1). – P. 43–55. [DOI: 10.1134/S0097807819070169]
5. Беликов, В.В. Применение ям-ловушек для уменьшения заиления водохранилищ ГЭС на горных реках. / В.В. Беликов, А.И. Алексюк, Н.М. Борисова, **Т.А. Федорова** // Гидротехническое строительство. – 2019. – №6. – С. 12–24. [Belikov V.V. Using of accumulation basins to reduce silting of reservoirs of hydroelectric power plants located on mountain rivers. / V.V. Belikov, A.I. Aleksyuk, N.M. Borisova, **Т.А. Fedorova**. // Power Technol. Engineering – Vol. 53(4). - 2019. – P. 429-439 [DOI: 10.1007/s10749-019-01095-9]]
6. Alabyan, A. Retrospective simulation of an extreme flood on the Oka river at the city of Ryazan and impact assessment of urban and transport infrastructure / A. Alabyan, V. Belikov, I. Krylenko, E. Fingert, **Т. Fedorova**. // Water Resources. –2018. – Vol. 45. № 1. – P. 1–10. [DOI: 10.1134/S0097807818050263]
7. Aleksyuk, A.I. Numerical modeling of non-uniform sediment transport in river channels. / A.I. Aleksyuk, V.V. Belikov, N.M. Borisova, **Т.А. Fedorova**. // Water Resources. – 2018. – Vol. 45, no S1. – P. 11–17. [DOI: 10.1134/S0097807818050275]
8. Лебедева, С.В. Наводнения в устье Северной Двины и их моделирование. / С.В. Лебедева, А.М. Алабян, И.Н. Крыленко, **Т.А. Федорова** // Геориск. – 2015. - № 1 - С. 18–25.

Публикации в других изданиях:

9. **Fedorova T.** Simulation of the meander cut-off by 2D hydrodynamic model for erodible bed. / **Т. Fedorova**, V. Belikov, A. Alabyan // European Geosciences Union General Assembly 2021, Geophysical Research Abstracts. – Copernicus GmbH on behalf of the European Geosciences Union (Germany). – 2021. – Vol. 23. Thesis. – P. 6016, 2021. [DOI: 10.5194/egusphere-egu21-6016]
10. Aleksyuk A.I. Numerical Modeling of Channel Deformation Taking into Account Sediment Fractions Distribution. / A.I. Aleksyuk, V.V. Belikov, N.M. Borisova, **Т.А. Fedorova**. // Climate Change Impacts on Hydrological Processes and Sediment Dynamics: Measurement, Modelling and Management, серия Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. – Switzerland: Springer Nature Switzerland AG Cham. – 2019. – P. 29–33.