

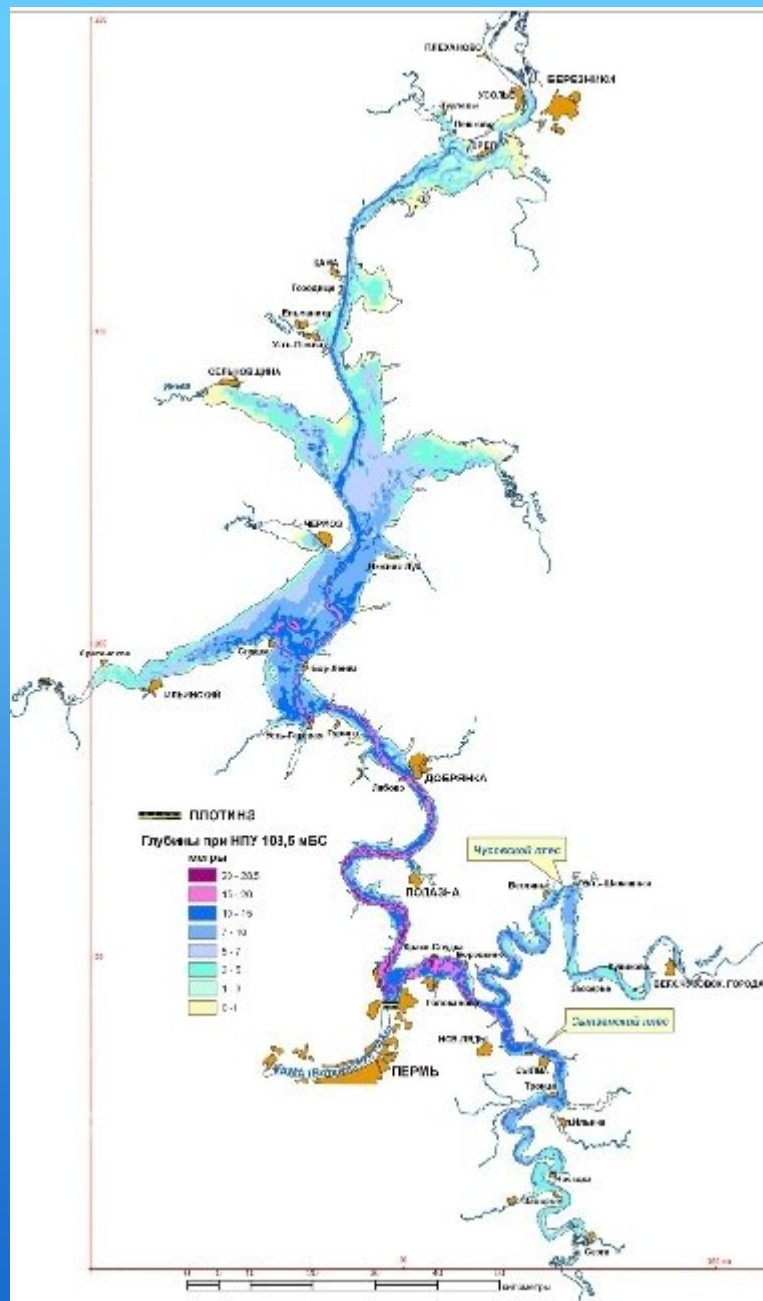
**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
Институт водных и экологических проблем  
(Новосибирский филиал)**

**Расчет пространственной структуры течений в  
водоемах сложной морфометрии  
(на примере Камского водохранилища)**

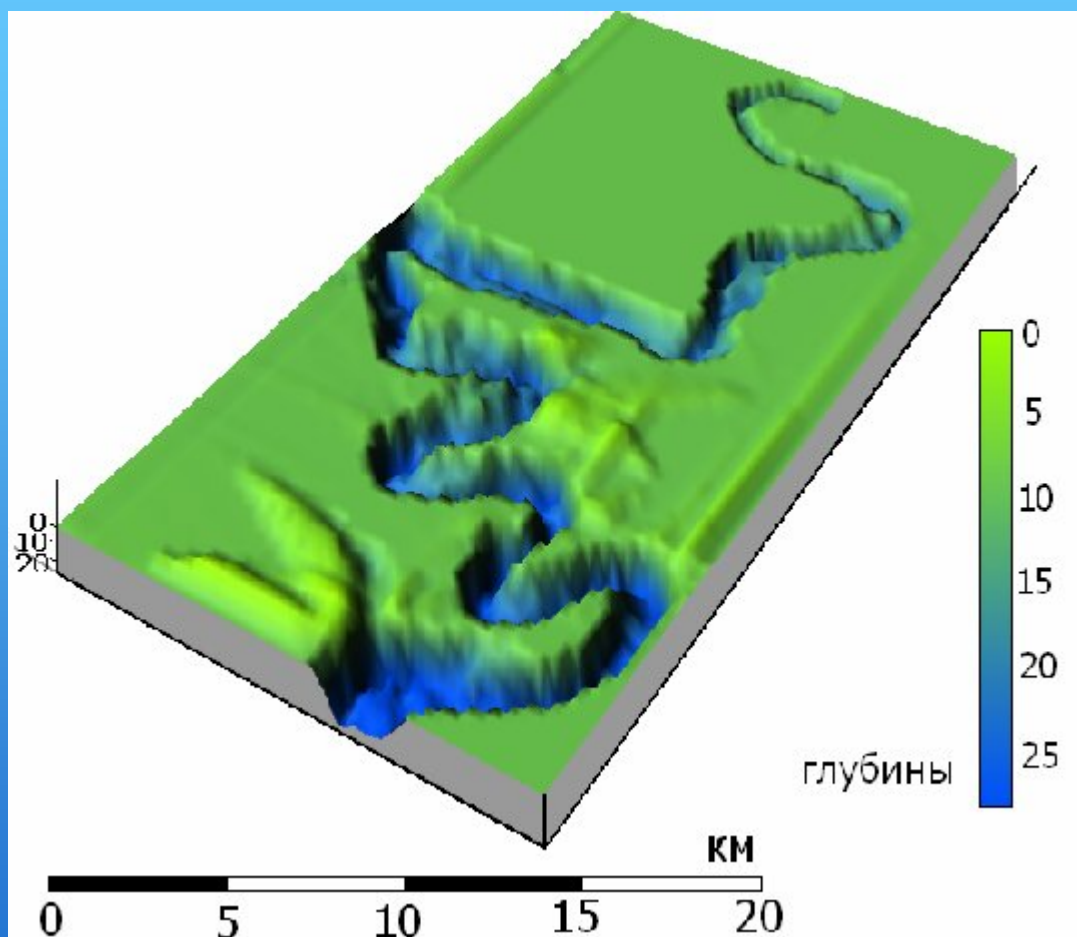
**Шлычков Вячеслав Александрович, д.ф.-м.н.**

Программный пакет для моделирования внутриводоемных процессов в Камском водохранилище предназначен для:

- расчета параметров стоковых течений - в том числе, пространственного распределения средних скоростей и расходов по акватории;
- оценки скорости транспорта донных наносов;
- эволюции поля концентрации при сбросах загрязняющих примесей.



Камское водохранилище длиной 300 км является морфометрически и топологически сложным водным объектом. Пространственная конфигурация водохранилища образована основным водотоком, проходящим по старому руслу р. Камы, и затопленных пойменных площадей. Покрытые водой припойменные площади обуславливают распластаный характер водного зеркала с широкими заливами, образовавшимися вдоль малых речных притоков и простирающимся на десятки километров в боковых направлениях от главного русла.

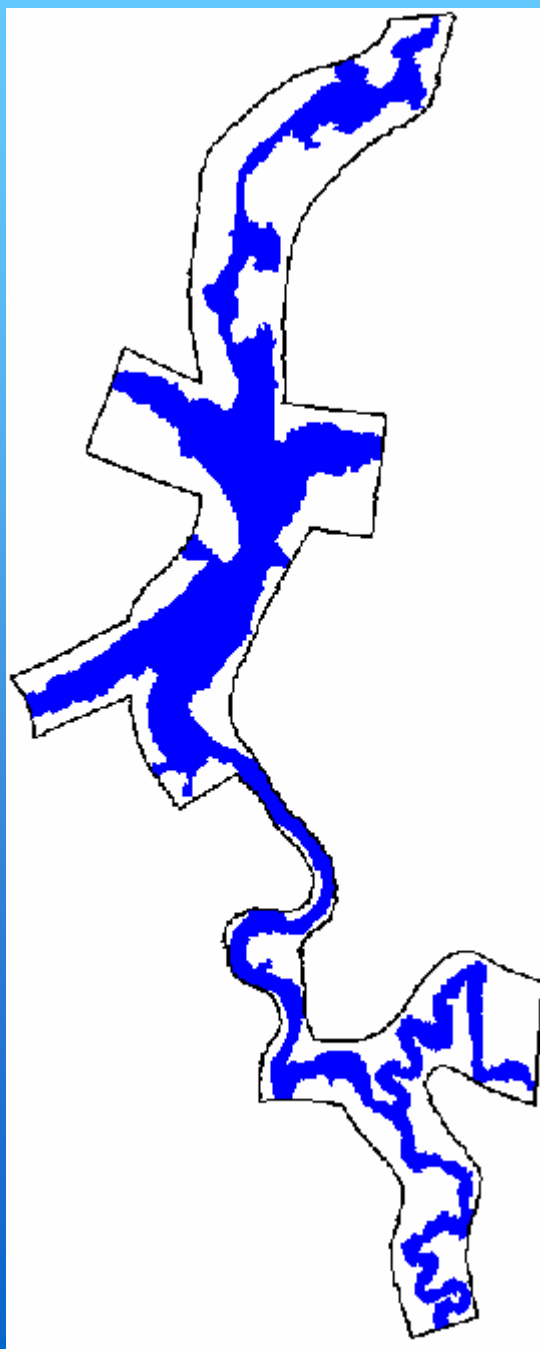
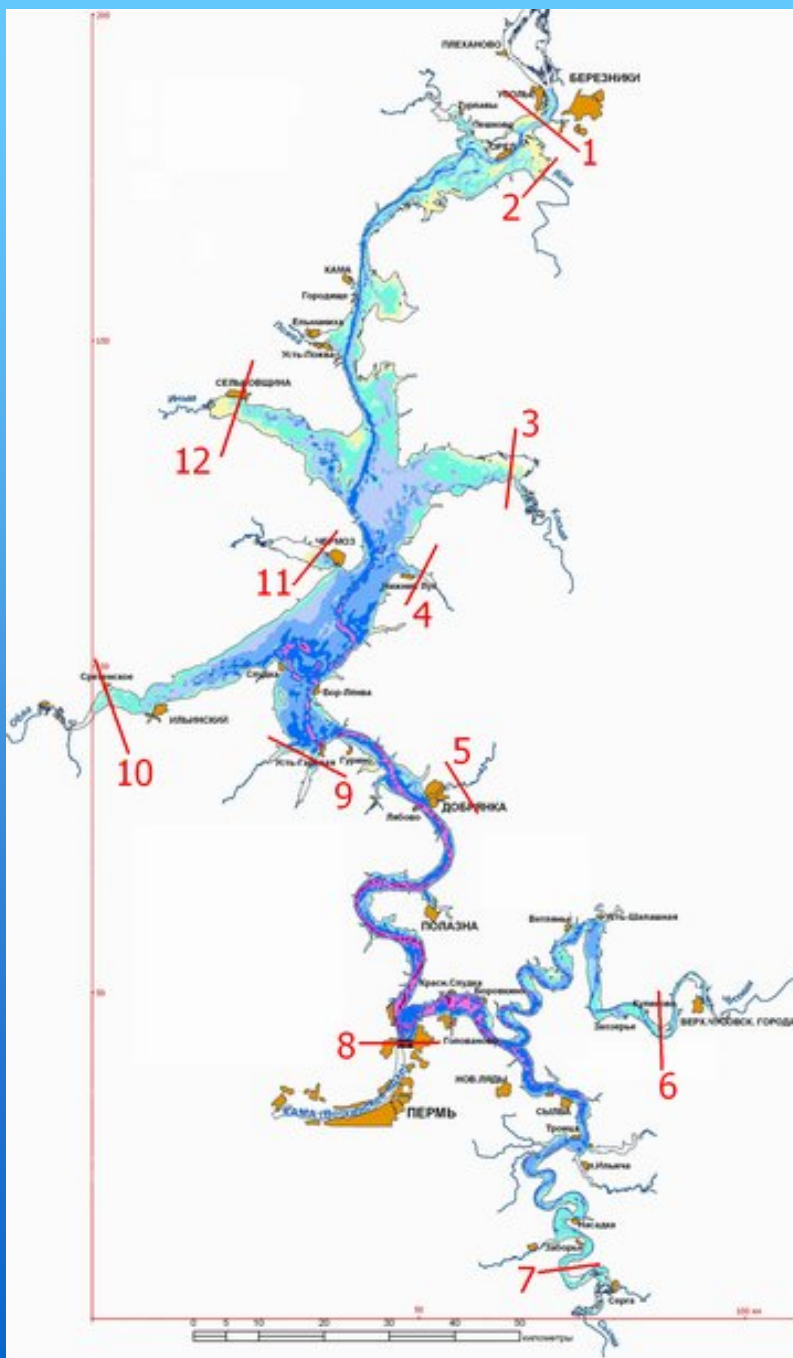


Русло реки и притоков имеет сложную пространственную структуру, извилистую форму и сильно меандрирует. Рисунок показывает 3D-изображение цифровой модели рельефа для притока Камы - р.Чусовой.

Разработка плановой компьютерной модели Камского водохранилища содержит следующие основные этапы:

- анализ гидравлических особенностей речного участка и задание области интегрирования;
- расстановка граничных створов с учетом морфометрии водоема;
- математическая постановка задачи и разработка методов решения;
- генерация криволинейной сетки с учетом геометрии области;
- формирование начальных и граничных условий для численной модели;
- проведение расчетов, анализ и интерпретация результатов.

## Граничные створы и область интегрирования

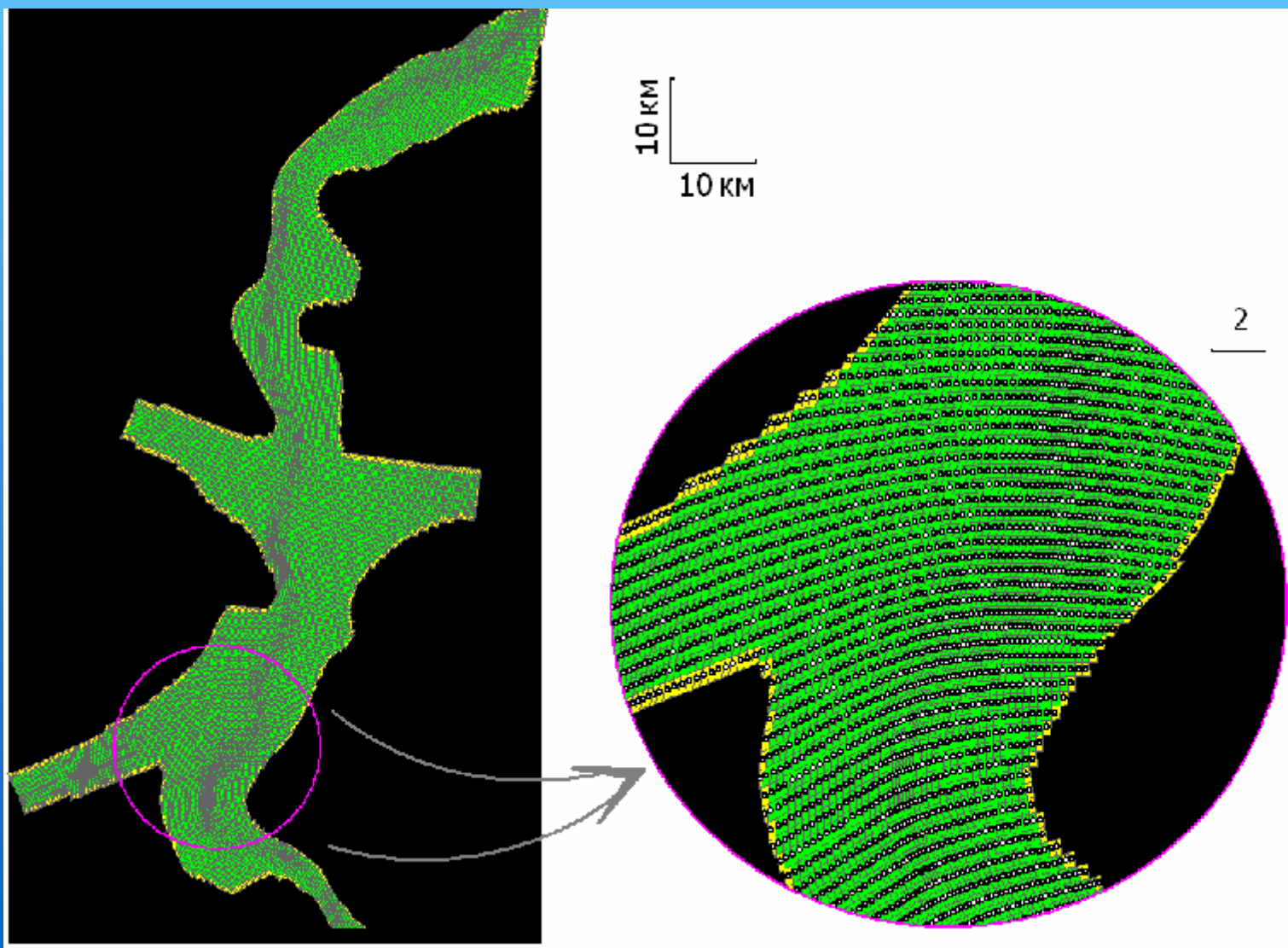


Граничные створы позиционированы так, чтобы детально описать наиболее крупные притоки – реки Косьва, Иньва, Обва, а также Сылвенский и Чусовский плесы.

Определенные таким образом краевые створы служат основой для построения области интегрирования (справа).

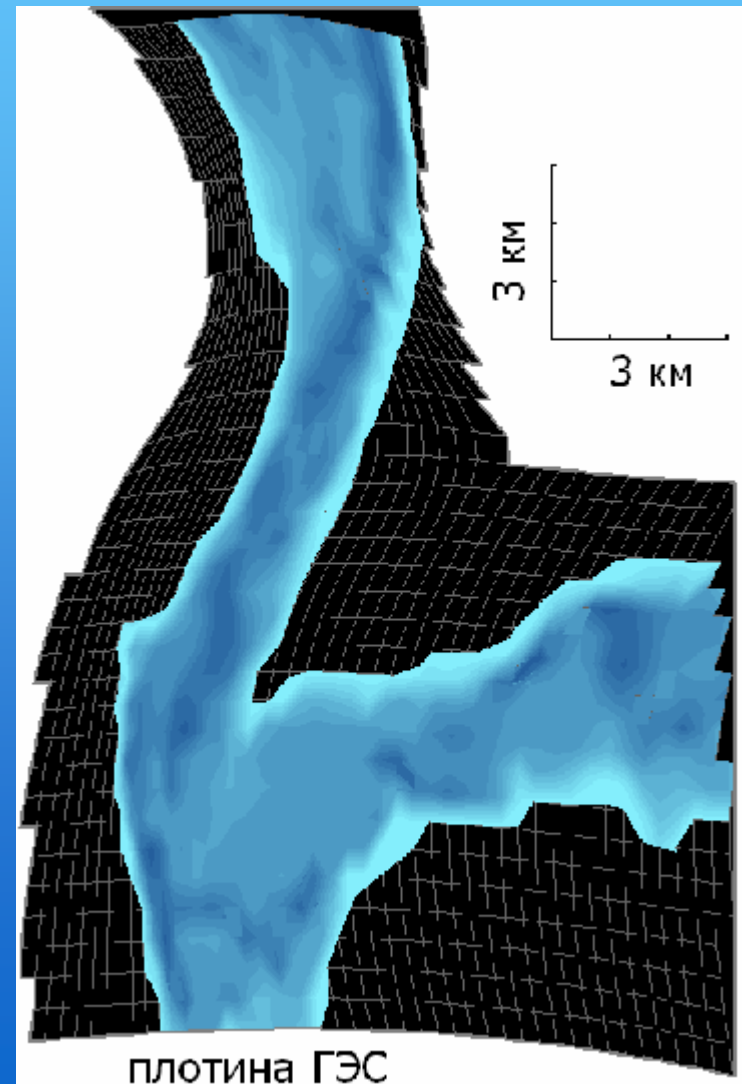
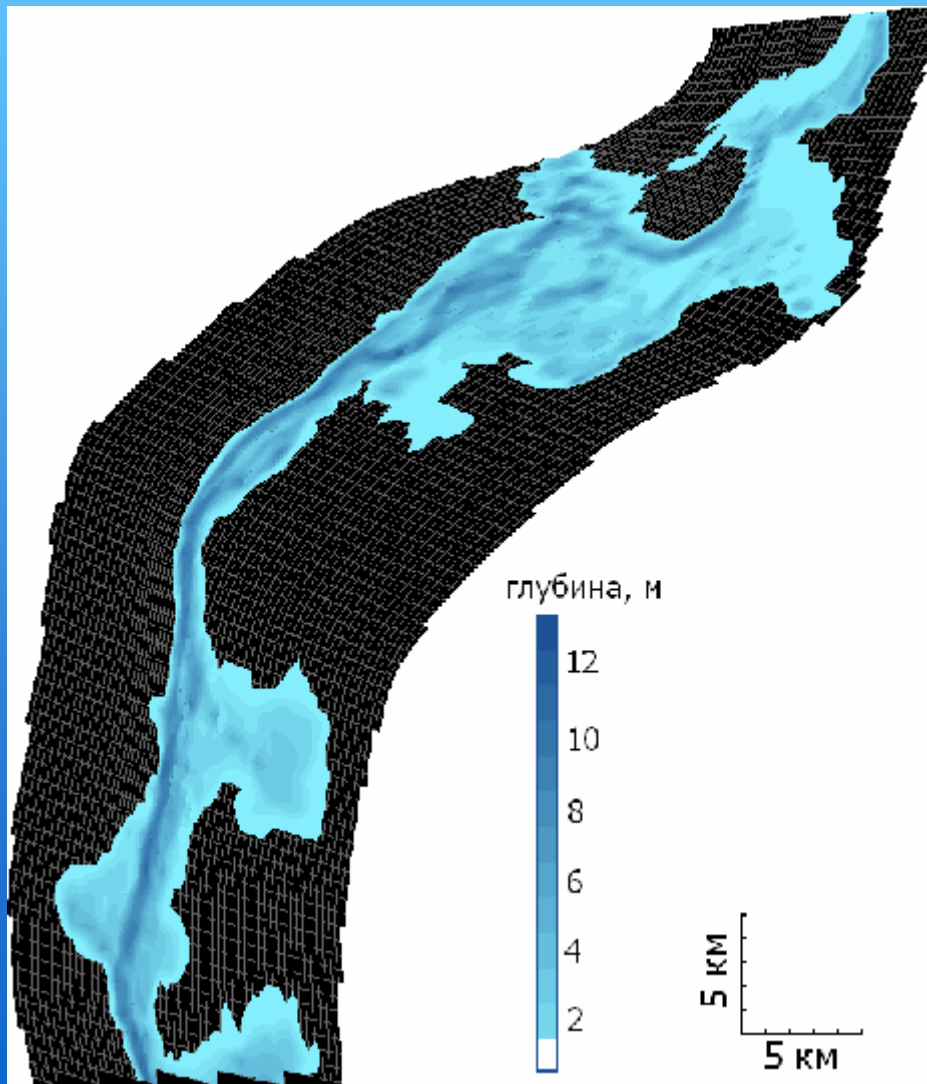
## Генерация криволинейной сетки

На рисунке представлен фрагмент области с нанесенными сеточными узлами, полученными на основе решения нелинейных эллиптических уравнений. Управляющие параметры алгоритма подбирались на основе требования лучшей пространственной детализации в областях глубокой воды (сгущение узлов заметно по затемненной полосе вдоль оси потока).



## Генерация криволинейной сетки

Средний размер элементарного бокса в гидравлически значимых областях при общем разрешении 23300 узлов составляет около 200 м в поперечном потоку направлении и 500 м в продольном. Рисунки иллюстрирует сеточные боксы в крупном масштабе в районе Березников и у плотины.





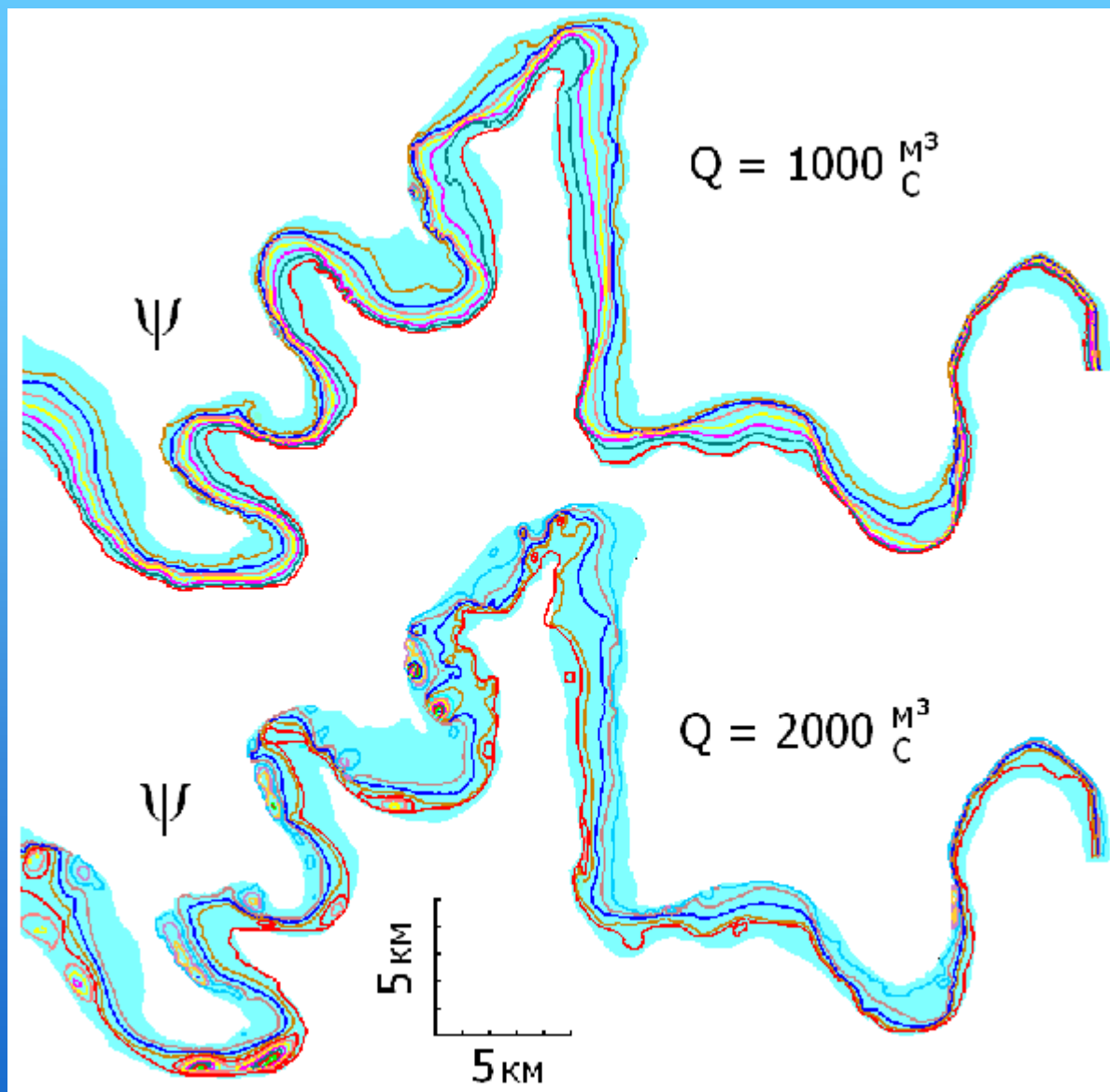
Уравнения плановых течений получены из системы уравнений Рейнольдса путем их осреднения по вертикали в пределах толщины потока:

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial huu}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = -gh \frac{\partial (h + z_b)}{\partial x} - \frac{g}{C_s^2} |\mathbf{u}| u + \frac{\partial}{\partial x} h K_x \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} h K_y \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_x,$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hvv}{\partial y} = -gh \frac{\partial (h + z_b)}{\partial y} - \frac{g}{C_s^2} |\mathbf{u}| v + \frac{\partial}{\partial x} h K_x \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} h K_y \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_y,$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = R_a - I$$

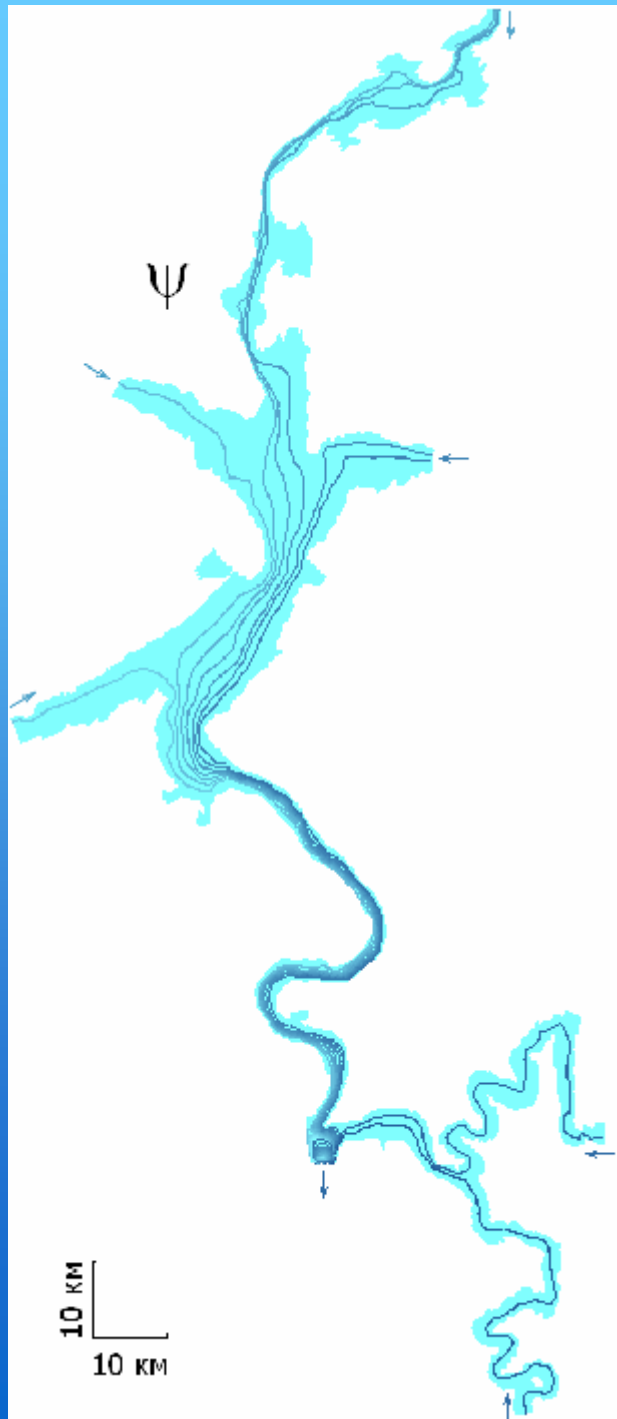
где  $(u, v)$  – вектор горизонтальной скорости вдоль осей  $(x, y)$ ,  $h$  – глубина потока,  $K_x, K_y$  – коэффициенты турбулентного обмена,  $R_a$  – интенсивность осадков,  $I$  – инфильтрация в почву,  $Z_b(x, y)$  – отметка дна,  $\tau_x, \tau_y$  – напряжения ветра,  $C_s$  – коэффициент Шези.



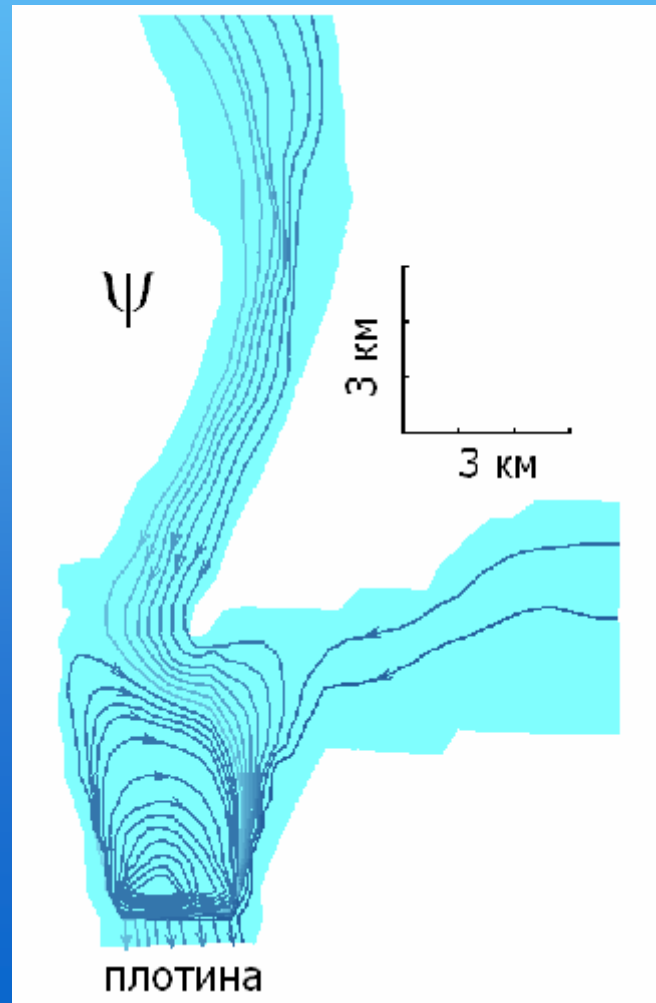
Рисунки показывают геометрию линий тока, полученных в расчетах р. Чусовой. Линии тока описывают траектории частиц, и, вместе с тем, образуют трубки тока, в которых значение расхода воды постоянно.

С увеличением расхода динамические эффекты приводят к развитию вихревых циркуляций на периферии водотока.

# Результаты расчетов гидравлического режима КамГЭС



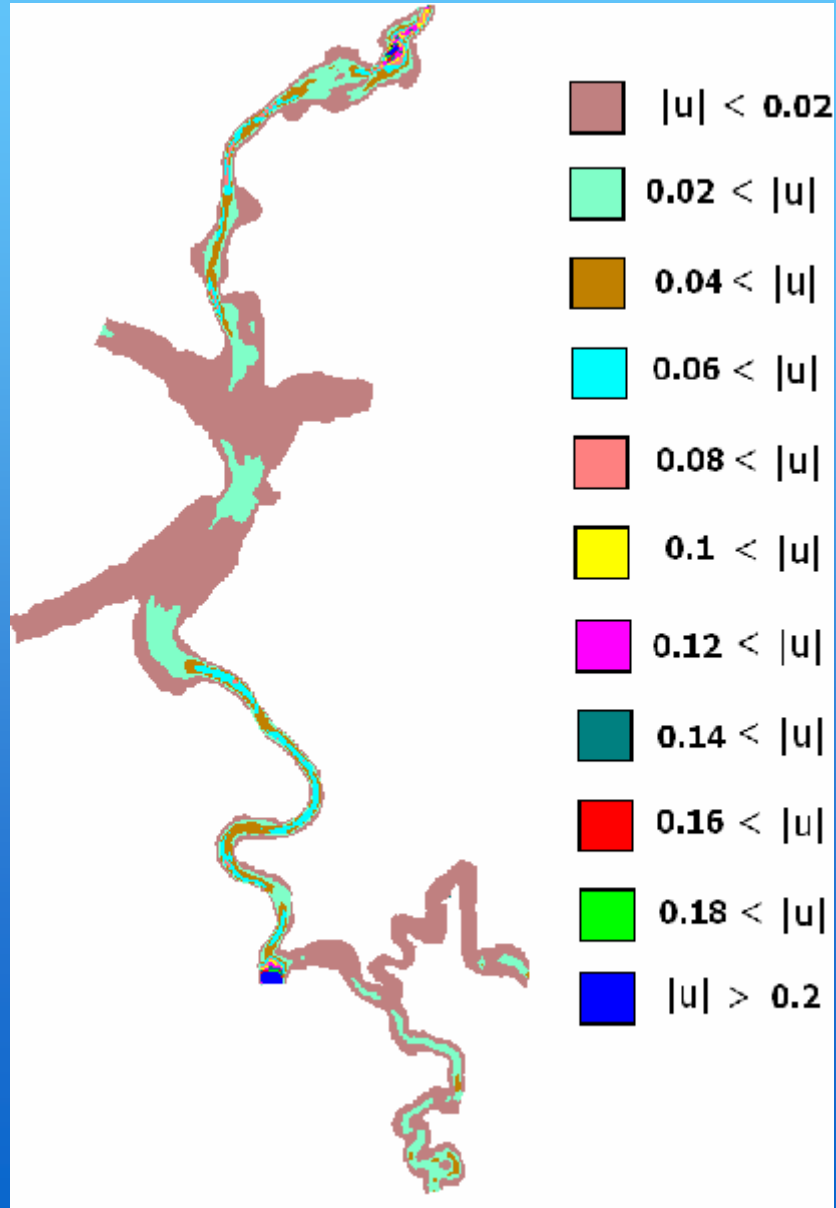
На рисунках приведены результаты расчета для варианта  $Q=4000 \text{ м}^3/\text{с}$ .



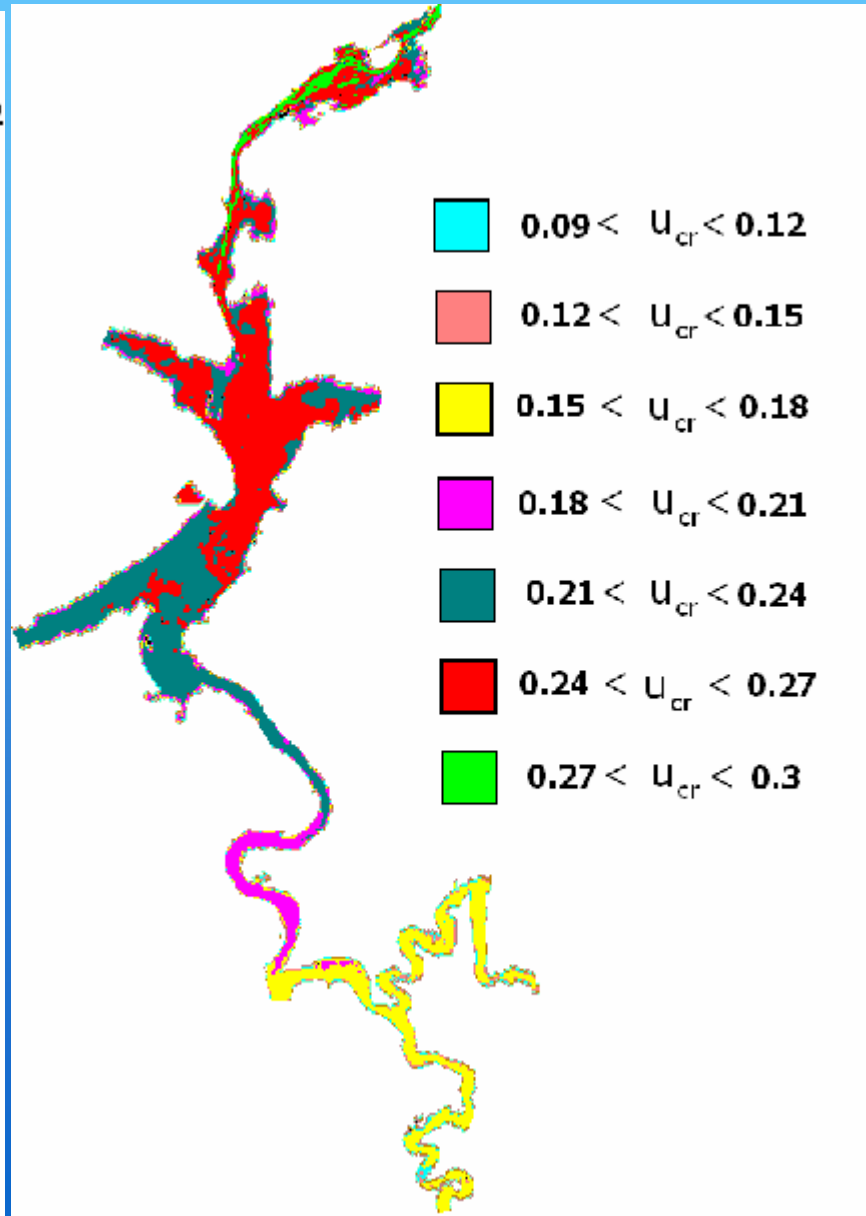
В акватории приплотинной части происходит слияние Камского плеса с боковыми водотоками Сылвенского и Чусовского плесов. При некоторых гидравлических режимах в результате взаимодействия прямого и бокового потоков у плотины развивается циркуляционное течение.

## Расчет скоростей русловой деформации

Рисунок слева показывает распределение модуля скорости по акватории



На рисунке справа представлено поле неразмывающей скорости (по Гончарову)



## Расчет скоростей русловой деформации

Наименьшей величины неразмывающая скорость 0.18 м/с достигает у плотины и возрастает в направлении против течения до 0.3 м/с.

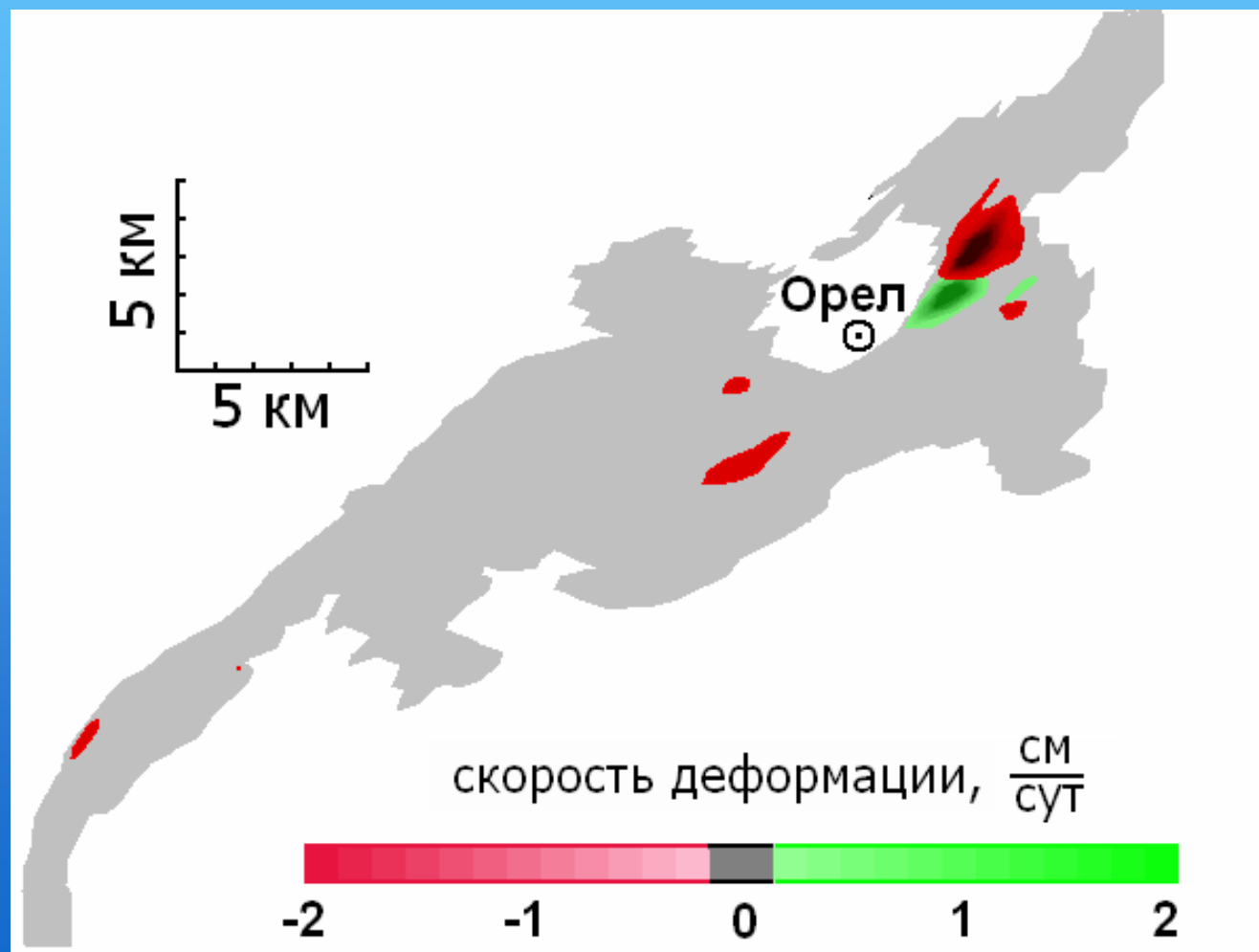
Сопоставляя эти данные с расчетными скоростями течения, можно видеть, они не превышают 0.06-0.08 м/с (за исключением отдельных локальных усилений), т.е. не достигают критических значений. Отсюда следует, что большая часть донного рельефа оказывается устойчивой к русловым деформациям.

Автор формулы	Березн., размыв	Березн., аккумуляц.
Бэгнольд	<b>3.2</b>	<b>2.7</b>
Бэйлард	<b>179</b>	<b>183</b>
Аккерс-Уайт	<b>45</b>	<b>52</b>
Энгелунд-Хансен	<b>0.74</b>	<b>0.76</b>
Граф-Акароглу	<b>0.74</b>	<b>0.76</b>
Петров	<b>0.82</b>	<b>0.68</b>

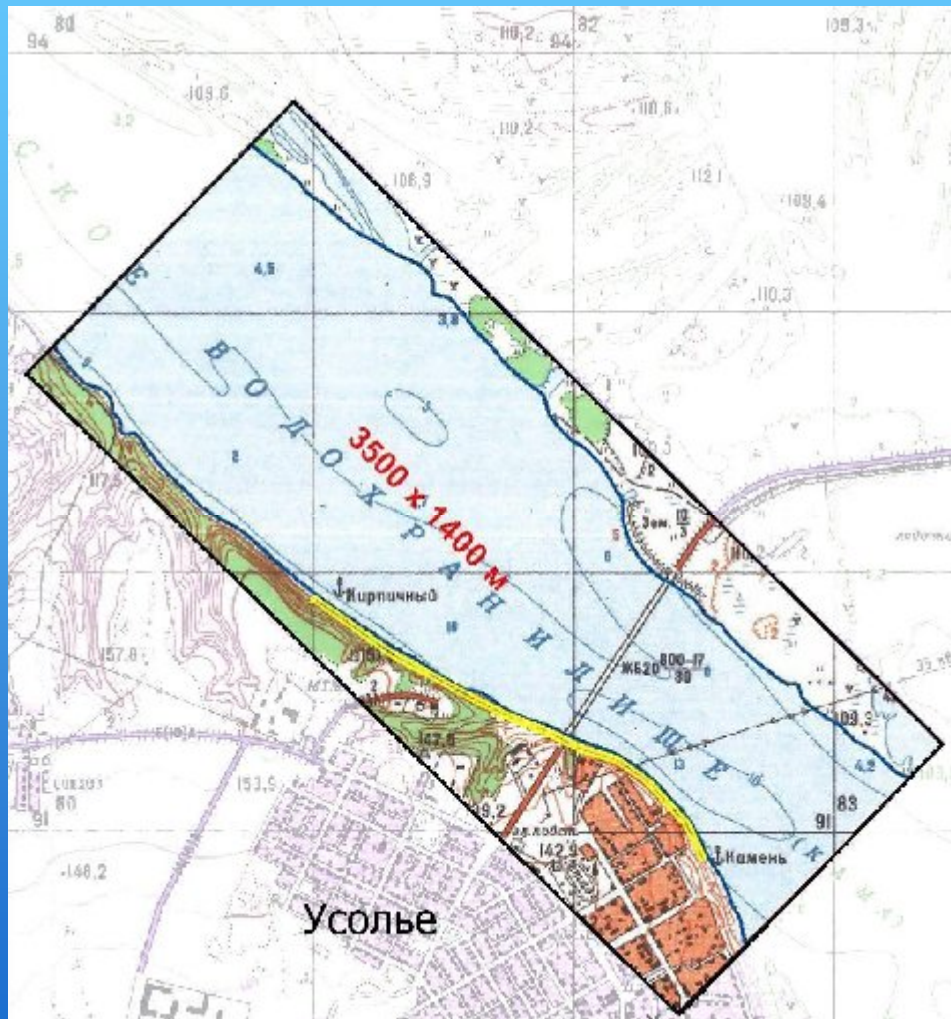
Таблица показывает расчетные скорости деформации (см/сут) в районе Березников, полученные по наиболее употребительным зависимостям твердых расходов разных авторов.

## Расчет скоростей русловой деформации

Рисунок дает визуальное представление о скорости деформации (см/сут) в районе Березников. Зона интенсивного размыва грунта  $R = -3.2$  см/сут (красная заливка) чередуется с зоной аккумуляции (зеленая заливка).

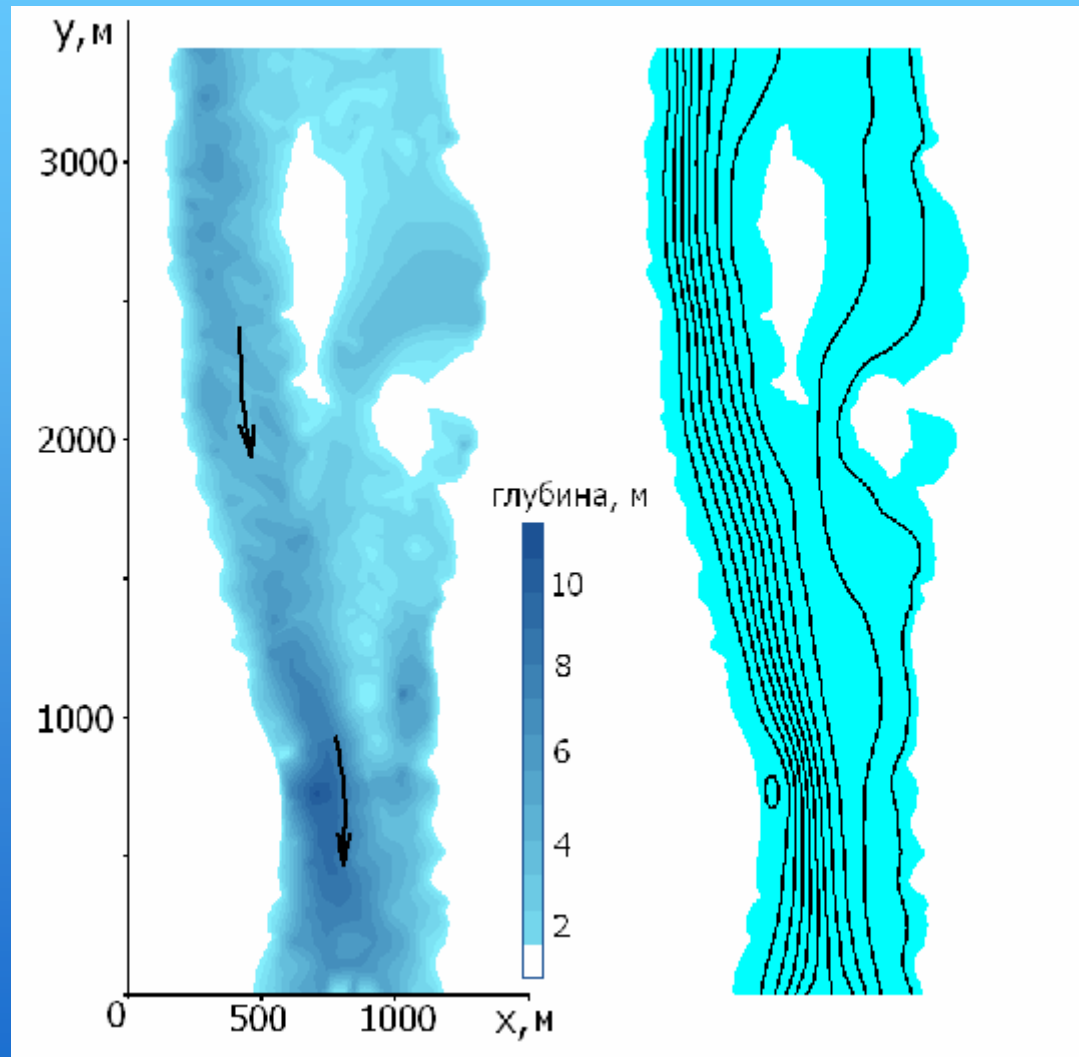


## Численное моделирование течения на участке Березники – Усолье. Оценка эффективности защиты берегов.



Пос. Усолье расположен в его верхней (русловой) части водохранилища . Морфометрические условия обуславливают здесь формирование сравнительно высоких скоростей течения, что способствует интенсивным русловым деформациям и подмыванию берегов. Для изучения возможностей защиты берегов проведено моделирование скоростного режима в бытовых условиях и при возведении защитных инженерных сооружений. На рисунке показано положение расчетного участка русла в плане.

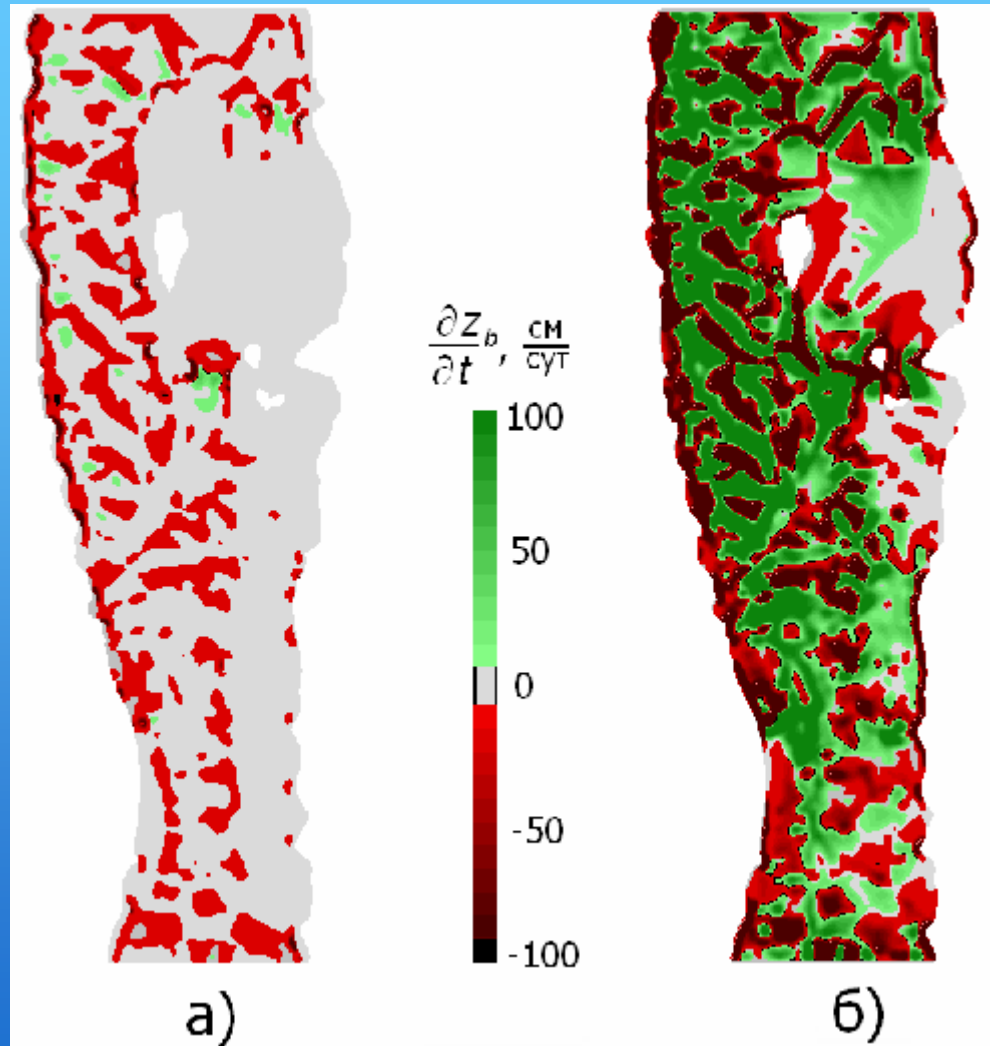
## Численное моделирование течения на участке Березники – Усолье.



Пространственный шаг в конечно-разностной сетке был взят равным 5 метрам, а общее число узлов в области составило около 200 тысяч. Элементарный сеточный бокс представлял собой квадрат со стороной 5 м. Рисунок иллюстрирует конфигурацию линий тока для значения  $Q=1000 \text{ м}^3/\text{с}$  (расход одиночной трубки тока на рисунке составляет  $100 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Основной водоток проходит вдоль правого берега, левый рукав пропускает не более 20% общего расхода.

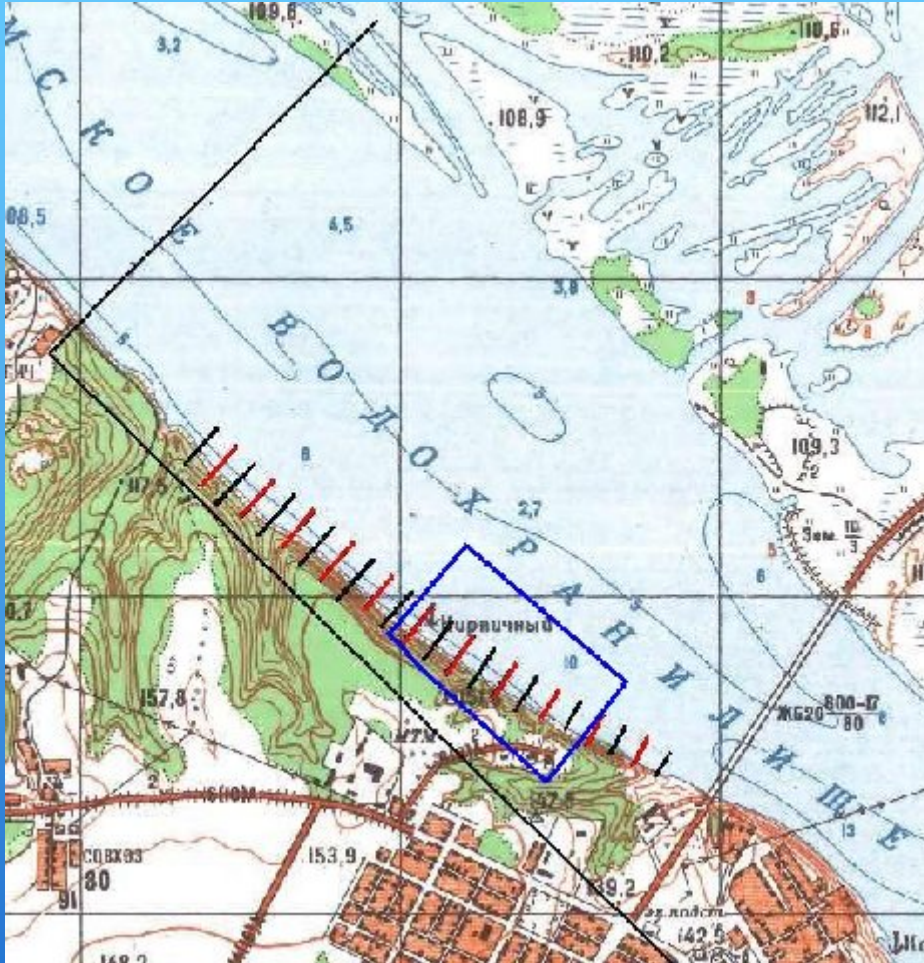


## Численное моделирование течения на участке Березники – Усолье.



Характерные значения неразмывающей скорости на данном участке составляют 0.24 - 0.27 м/с. При малых расходах эти значения сопоставимы со средней скоростью течения, а вблизи берега вследствие торможения потока скорости течения уменьшаются и не превышают размывающую. Поэтому в меженные периоды береговые участки можно считать устойчивыми к размыву (рис. слева). При больших расходах эрозионный процесс интенсифицируется, а скорость деформации увеличивается на порядок (рис. справа). Зона правого берега оказывается подвержена интенсивному размыву.

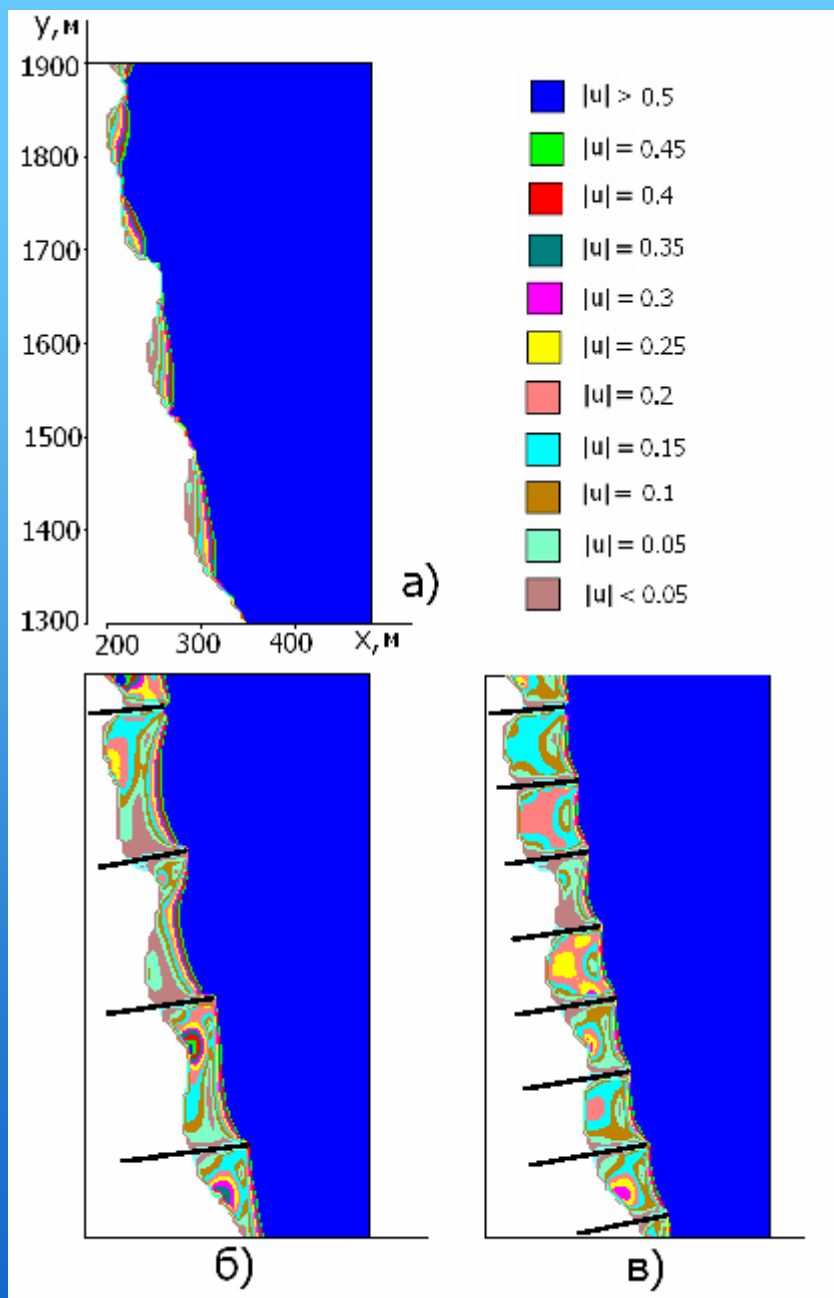
## Численное моделирование течения на участке Березники – Усолье.



Рассмотрен вариант береговой защиты в виде системы сооружений (шпор), берущих начало на суше и перпендикулярно выступающих в русло на 40 м. Исследовалось два варианта установки шпор:

- 1) расстояние между осями сооружений предполагалось равным 160 м (12 шпор, линии красного цвета)
- 2) межшпорное расстояние составляло 80 м (23 шпоры).

## Численное моделирование течения на участке Березники – Усолье.



Во всех случаях анализировалось расчетное поле скоростей путем его сопоставления с неразмывающими значениями. На рисунках изображен фрагмент  $300 \times 600 \text{ м}^2$  с расчетным полем скоростей в бытовых условиях и в вариантах 1,2 установки гидротехнических сооружений при максимальном расходе  $3000 \text{ м}^3/\text{с}$ . Цветовая градация детализирована до значений  $0.5 \text{ м/с}$ . В бытовых условиях скорость быстро возрастает от берега и становится выше критической. Возведение защитных сооружений приводит к торможению потока и образованию гидродинамической тени в межшпорных отсеках. В варианте-1 расположения шпор существует риск фрагментарной эрозии береговой полосы. Установка дополнительных шпор (вар.2) обеспечивает уменьшение скоростей до приемлемых величин, практически везде не превышающих неразмывающего значения.

## Резюме

Полученные результаты являются физически непротиворечивыми, значения расчетных параметров лежат в разумных диапазонах величин, обычно наблюдаемых и измеряемых в естественных руслах.

Представленные материалы по апробации численной модели стоковых течений, переноса наносов и эволюции примесей показывают эффективность использования численных моделей для расчета параметров крупных водохранилищ – таких, как Камское.