

**ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ
УЧАСТКОВ РЕЧНОЙ СЕТИ ДЛЯ РАСЧЕТА И ПРОГНОЗА ПОЛЕЙ
СКОРОСТИ, СТОКА НАНОСОВ И РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ**

**APPLICATION OF IMITATIVE COMPUTER MODELS OF THE RIVER
NETWORK REACHES FOR COMPUTATION AND FORECAST OF
VELOCITY FIELDS, SEDIMENT FLOW AND RIVER CHANNEL
DEFORMATIONS**

Земцов В.А., Вершинин Д.А., Инишев Н.Г.

Zemtsov V.A., Vershinin D.A., Inishev N.G.

*Томский государственный университет, Tomsk
State University,*

vz@mail.tomsknet.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 10-05-00625-а)

Этапы процесса моделирования:

- подготовка и адаптация исходных материалов для применения их в компьютерном моделировании;
- создание модели для естественных или соответствующих заданной расчетной обеспеченности условий и ее калибровка с определением значений параметров модели;
- моделирование процессов квази-естественной эволюции русла, а также разных вариантов гидротехнических сооружений и других техногенных воздействий, анализ полученных результатов и выдача рекомендаций для оптимизации воздействий

Решаемые нами задачи включают расчет и прогноз:

- положения кривой свободной поверхности потоков (1D HEC-RAS, 2D RMA2 в системе SMS 9.2);
- перераспределения расходов воды между протоками при изменении водности реки и геометрии русла (1D HEC-RAS, 2D RMA2);
- полей скорости на вертикалях, глубин, отметок свободной поверхности, уклонов в русле и пойме, касательных напряжений и др. динамических параметров (2D RMA2);
- заторных явлений и подпоров (1D HEC-RAS);
- стока наносов в русловой системе и его пространственно-временной изменчивости, определяемой изменчивостью водности реки и геометрии русла (1D HEC-RAS);
- деформаций русла (размыв и аккумуляция), изменения гранулометрического состава донных отложений в границах смоченного периметра (2D HEC-RAS)

RMA2: уравнения сохранения массы и количества движения в двумерной прямоугольной системе координат:

$$\begin{aligned}
 & h \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + h \cdot u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + h \cdot v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \cdot \left(E_{xx} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g \cdot h \cdot \left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \\
 & + \frac{g \cdot u \cdot n^2}{\left(h^{\frac{1}{6}} \right)^2} \left(u^2 + v^2 \right)^{0.5} - \zeta \cdot V_a^2 \cdot \cos \psi + 2 \cdot h \cdot \omega \cdot v \cdot \sin \phi = 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 & h \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + h \cdot u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + h \cdot v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \cdot \left(E_{yx} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g \cdot h \cdot \left(\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \\
 & + \frac{g \cdot v \cdot n^2}{\left(h^{\frac{1}{6}} \right)^2} \left(u^2 + v^2 \right)^{0.5} - \zeta \cdot V_a^2 \cdot \sin \psi + 2 \cdot h \cdot \omega \cdot v \cdot \sin \phi = 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \tag{3}$$

Условные обозначения к формулам (1)–(2):

h – глубина;

u, v – проекции скорости вдоль направления потока и горизонтально перпендикулярно направлению потока;

x, y – координаты в горизонтальной плоскости по направлению потока и перпендикулярно к нему;

t – время;

ρ – плотность жидкости;

E_{xx}, E_{yy} – коэффициенты турбулентной вязкости на поверхности, перпендикулярной оси x и y соответственно;

E_{xy}, E_{yx} – коэффициенты турбулентной вязкости по касательной к каждой из указанных поверхностей;

g – ускорение свободного падения;

a – отметка дна;

n – коэффициент шероховатости Маннинга;

ζ – эмпирический коэффициент касательного напряжения ветра;

V_a – скорость ветра;

ψ – направление ветра;

ω – угловая скорость вращения Земли;

ϕ – широта местности.

Расчеты и прогнозы выполняются:

- для естественной динамики потока и
- при антропогенных воздействиях – для спокойного, бурного и смешанного состояния потока, в основном, при установившемся движении воды.

При этом учитывается изменчивость водности реки внутри года и за многолетний период.

Перераспределение стока воды в
русловой системе.
Ледовые заторы

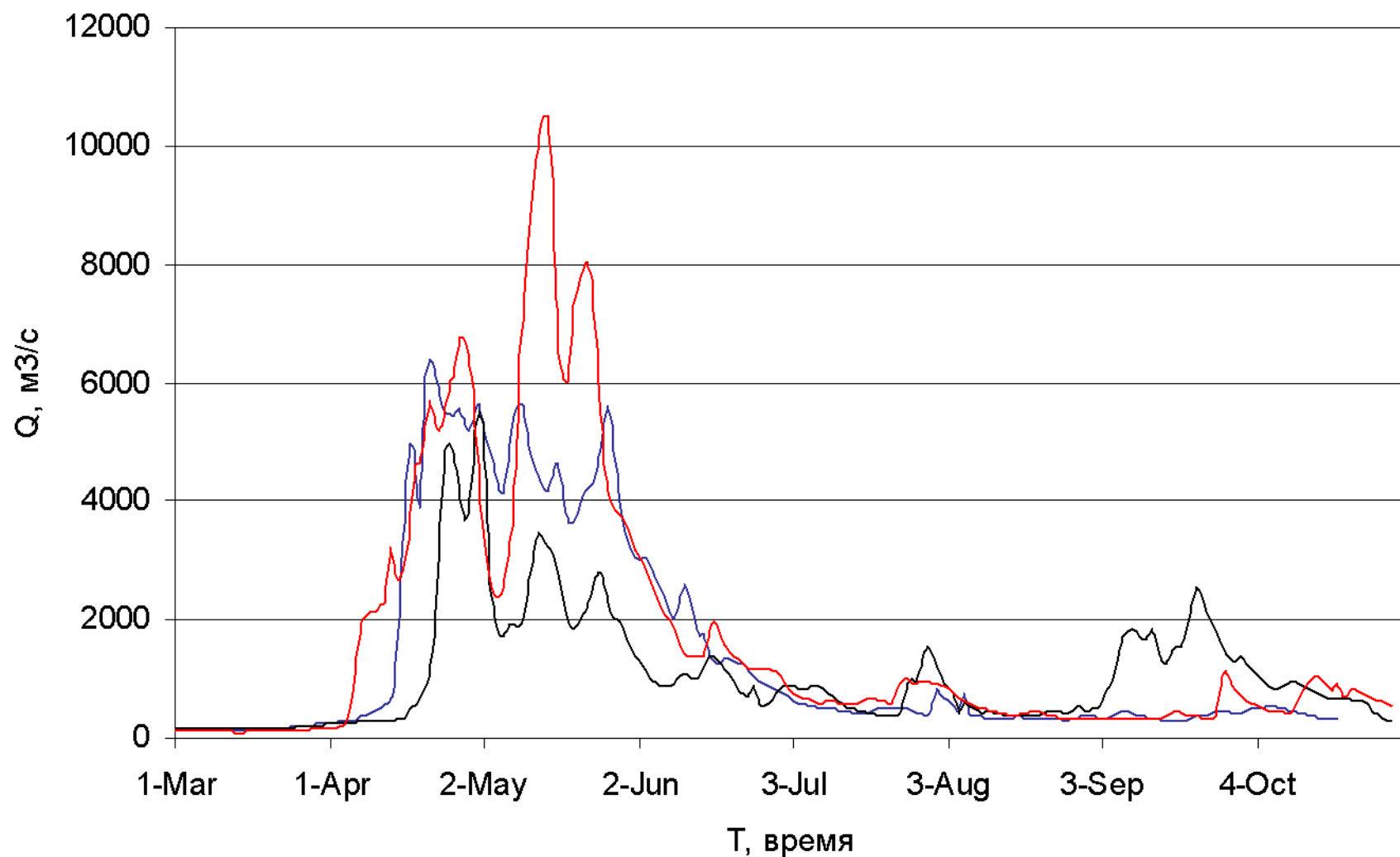
Для таких крупных сибирских рек, как Обь и Томь на исследуемых участках характерно *наличие поймы и большого количества проток*, соотношения между которыми сильно меняются с изменением водности реки при прохождении половодья.



Распределение расходов воды по протокам на исследуемом участке Томи

Год	Основное русло				Протока Светлая				Протока Калтайская			
	верхняя часть		нижняя часть		верхняя часть		нижняя часть		верхняя часть (пр. Панькова)		нижняя часть	
	Q, м ³ /с	Q, %	Q, м ³ /с	Q, %	Q, м ³ /с	Q, %	Q, м ³ /с	Q, %	Q, м ³ /с	Q, %	Q, м ³ /с	Q, %
1984	1610	49	2100	42	1380	42	2130	43	280	9	750	15
1998	1775	55	2525	46	1140	35	1945	35	300	9	1030	18
2001	1203	52	2400	48	842	36	1800	36	192	8	800	16
2007	н.д.	н.д.	1655	41	н.д.	н.д.	1780	44	н.д.	н.д.	587	15
2008	1838	47	1749	47	1761	45	1535	41	279	8	444	12
2009	2043	50	2030	48	1803	43	1645	40	315	7	644	13

Характерные гидрографы стока р.Томь – г.Томск-гидроствор за период половодья

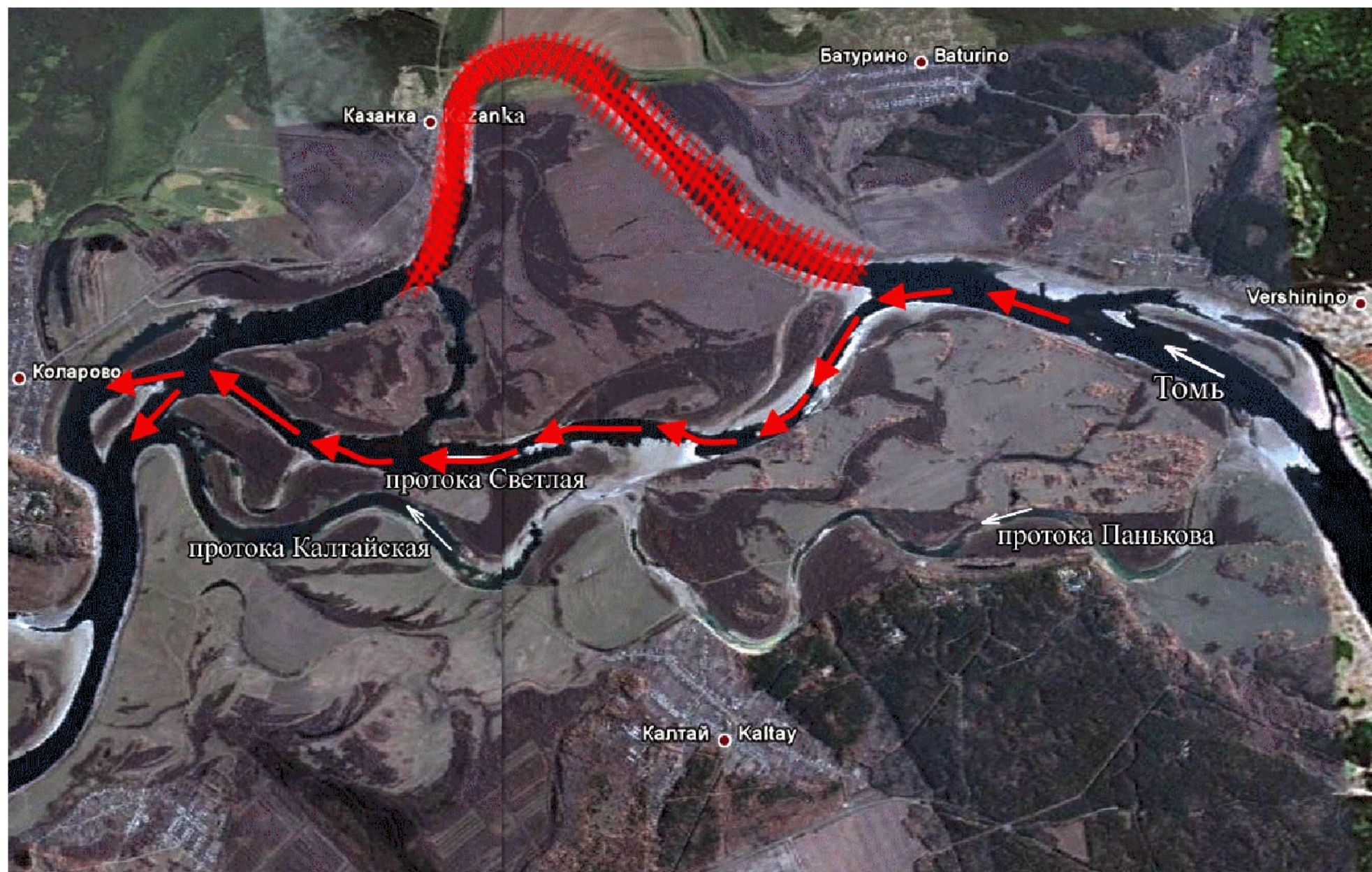


— Средний по водности 2000 г. — Маловодный 1996 г. — Многоводный 2001

Затор льда в главном русле р. Томь при прохождении половодья 2010 года



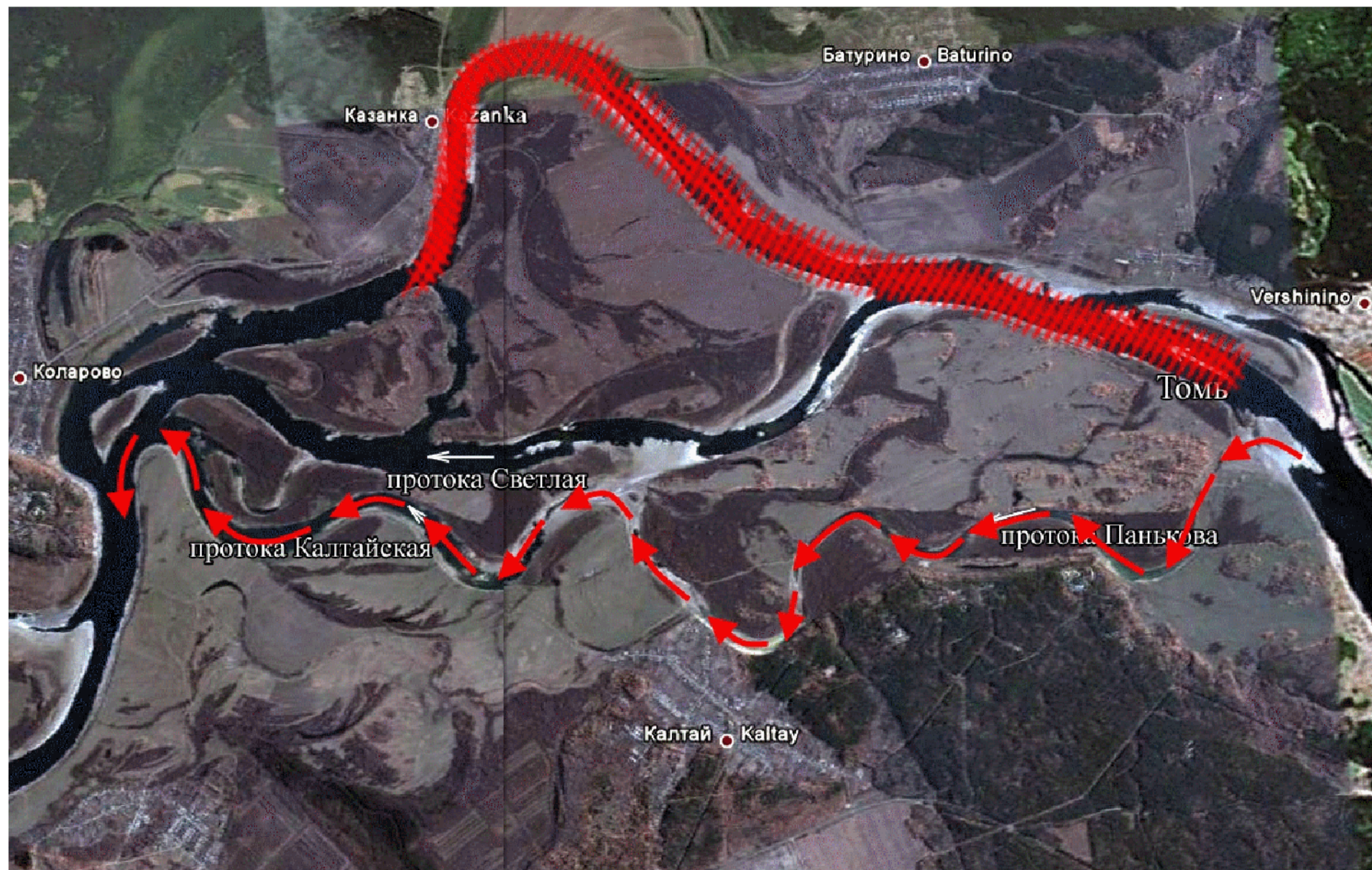
Вариант 1: затор в главном русле ниже входа в пр.Светлая



Вариант 2: затор в главном русле и нижней части пр.Светлая



Вариант 3: затор в главном русле ниже входа в пр.Панькова



Поля гравийных гряд



Поле гравийных гряд 2









Цифровые модели рельефа

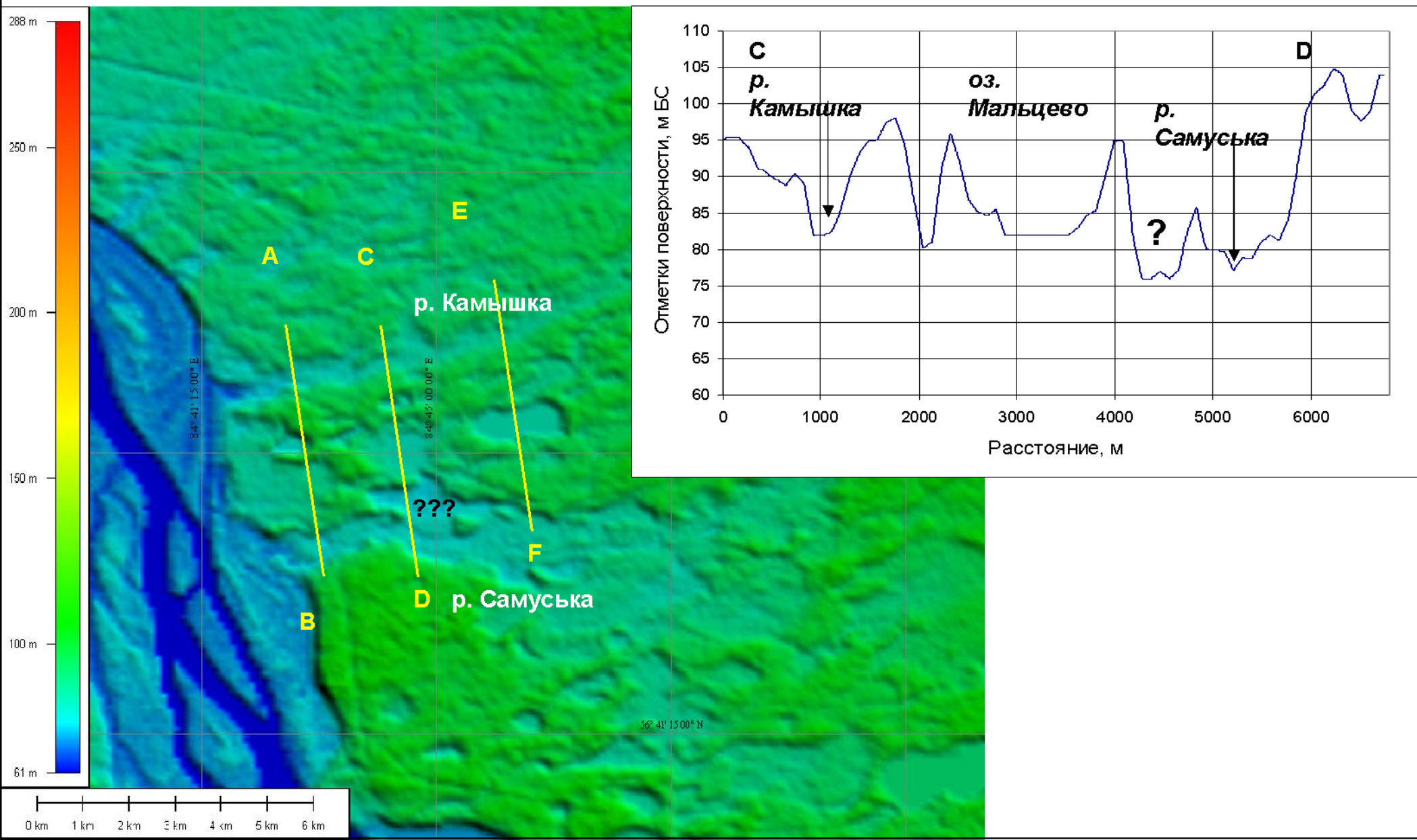
Сложность рельефа поймы при небольших относительных превышениях местности, деление и слияние потоков предъявляют повышенные требования к точности задания геометрии и усложняет компьютерные модели.

Поэтому все блоки и отдельные программы, входящие в указанные моделирующие системы, для решения любых задач нуждаются в адекватной по точности **цифровой модели рельефа (ЦМР)**, позволяющей задать геометрические данные.

Источники информации для построения ЦМР:

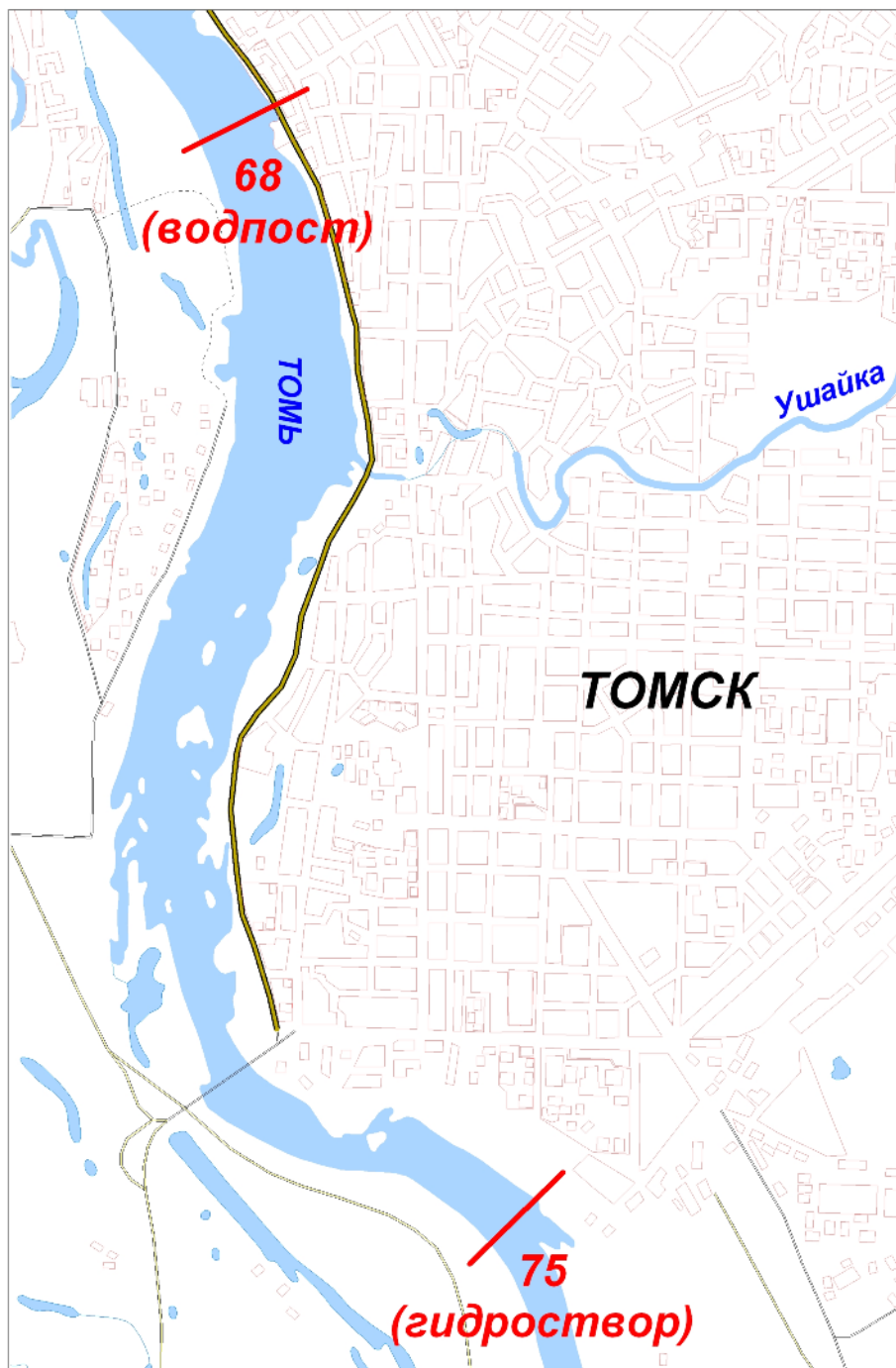
- Топокарты
- Аэрофото и космоснимки
- SRTM-матрицы (<http://srtm.csi.cgiar.org>)
- Полевые топографические и гидрографические съемки

Цифровая модель рельефа правобережья Томи, полученная по SRTM-матрицам (данные дистанционного зондирования с корабля «Шаттл») и разрез по линии С-Д. Вопросами обозначена глубокая депрессия, отсутствующая в рельефе



Параметры шероховатости

- В геометрический блок входят также значения коэффициентов шероховатости Шези и, в 2D модели RMA2 – параметра турбулентности.
- Шероховатости русла (и даже его отдельных частей) и проток могут заметно различаться в соответствии с рельефом и строением их дна



Дамба г.Томска

Участок
моделирования
(р. Томь в
75-68 км от
устья)

Река Томь у Лагерного сада, г. Томск. Выходы коренных пород (дайка)



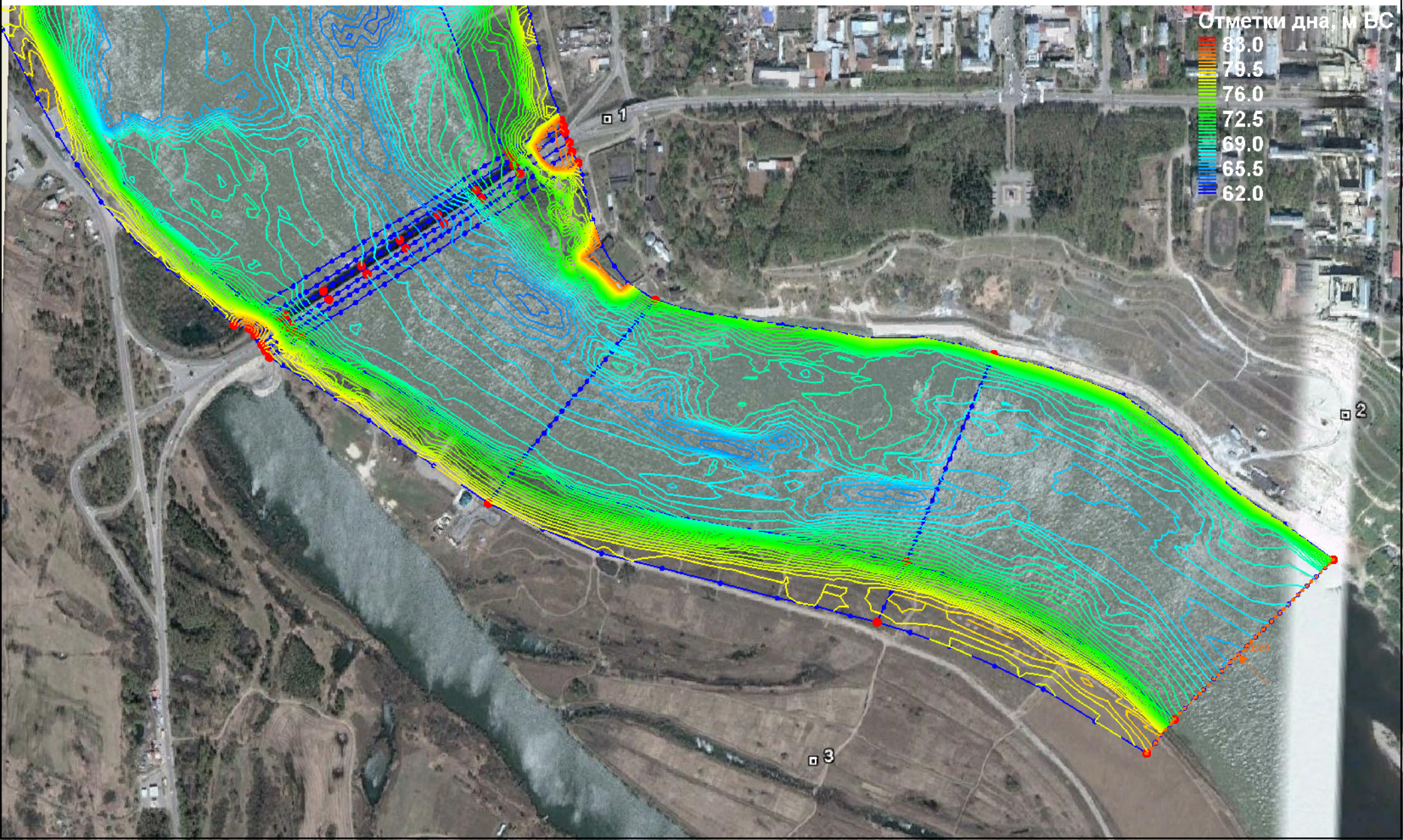




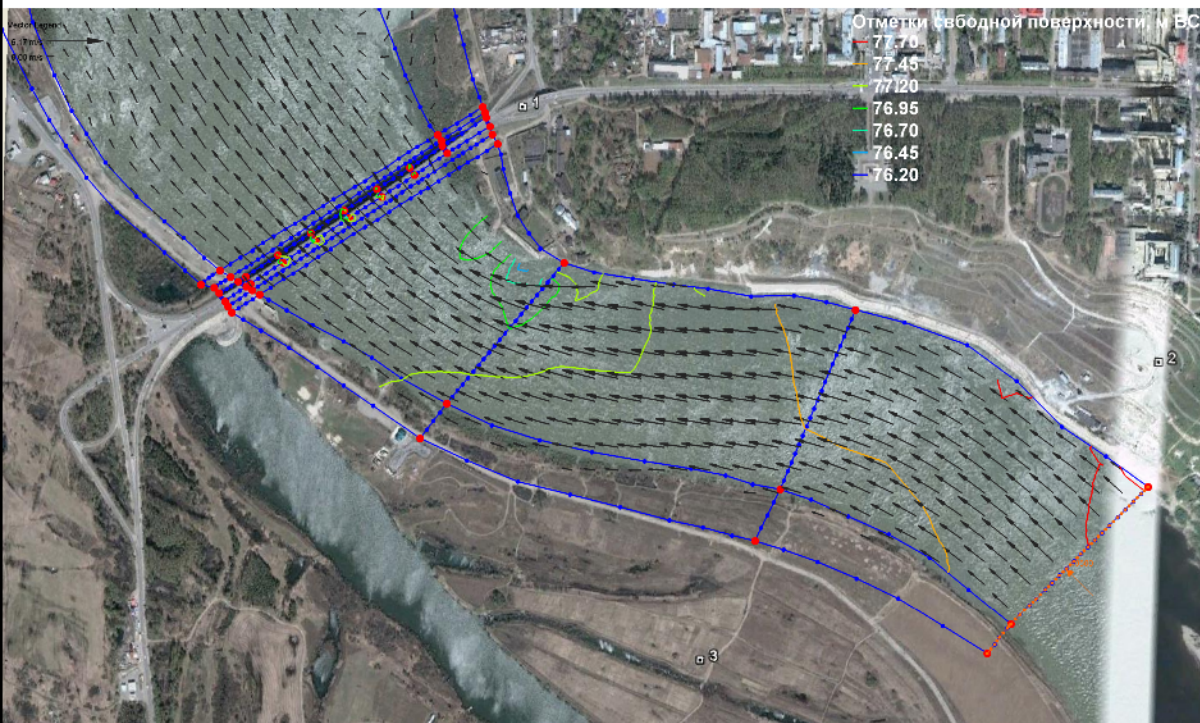
Отложения
аллювия ниже
коммунального
моста,
г. Томск



ЦМР русла Томи у Томска, $Q=10500 \text{ м}^3/\text{с}$

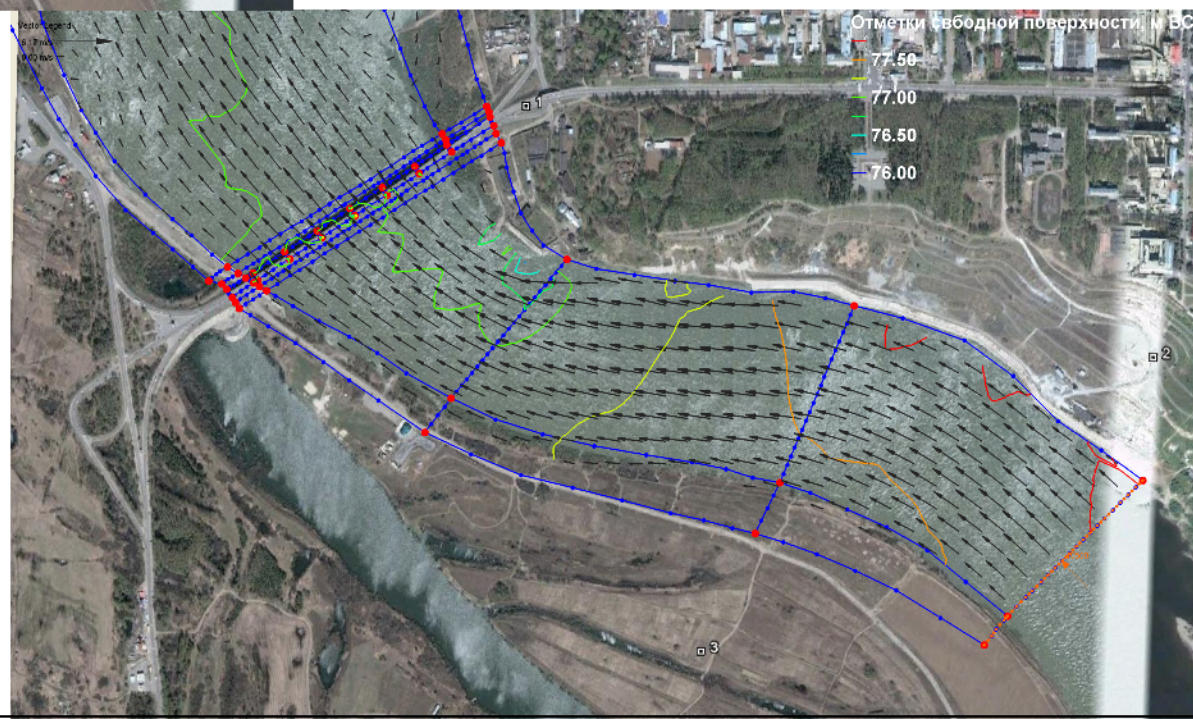


Поле скоростей и отметок свободной поверхности

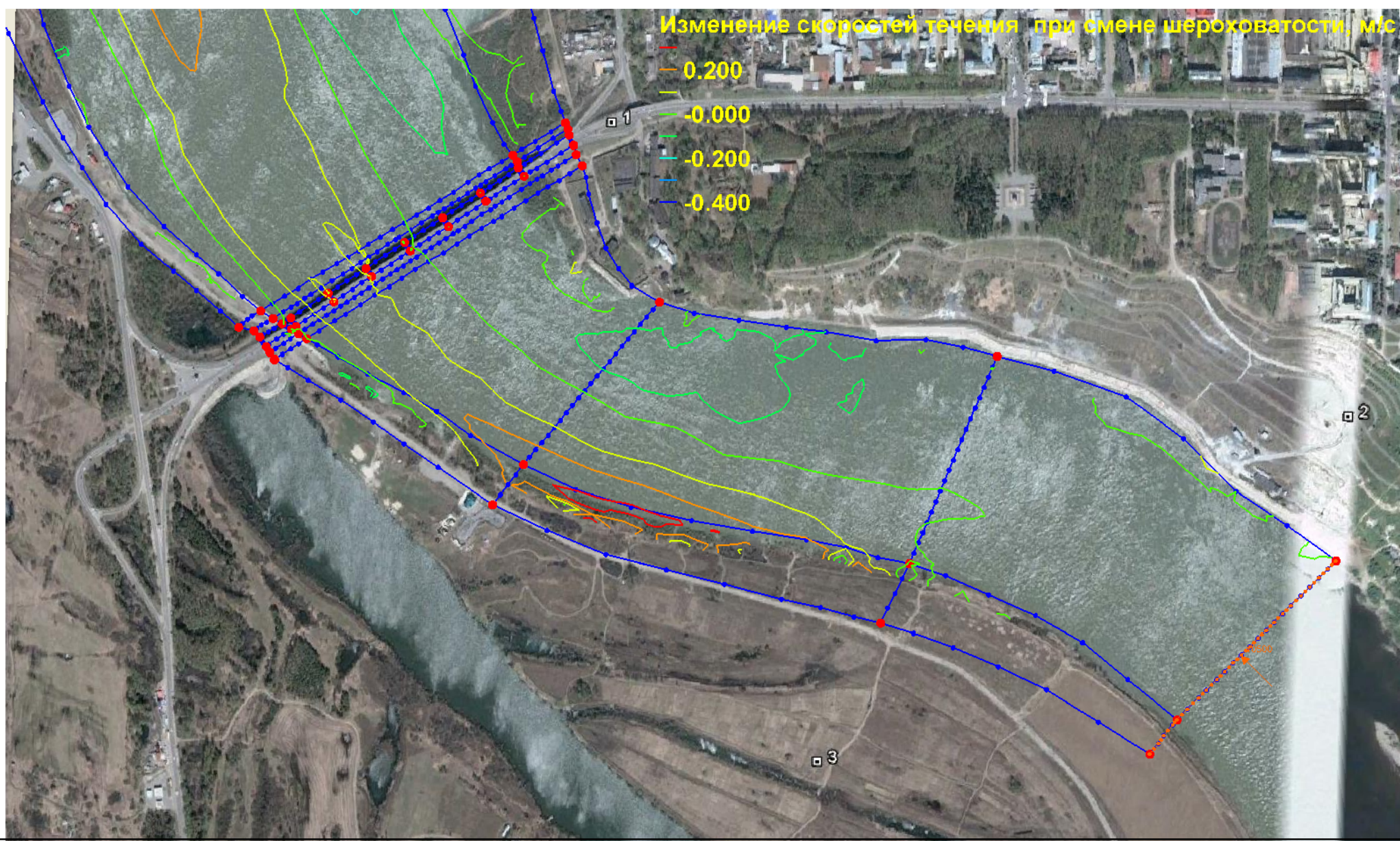


при одинаковой шероховатости в русле ($n=0,025$)

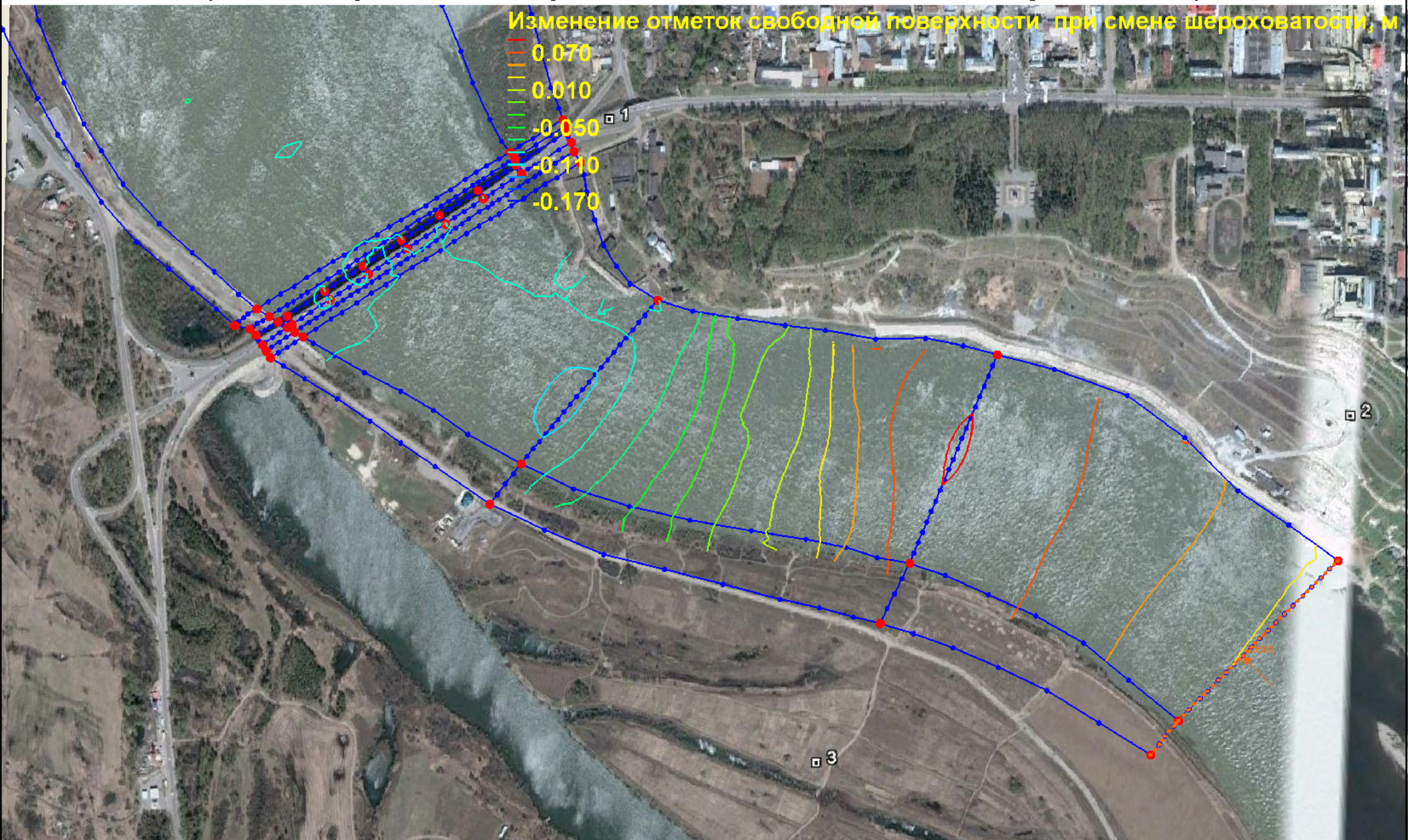
с учетом разной шероховатости в русле ($n=0,02$) и на скале ($n=0,035$)



Изменение скоростей течения при уточнении шероховатости (модельное течение над скалой замедлилось, в области основного потока – ускорилось)



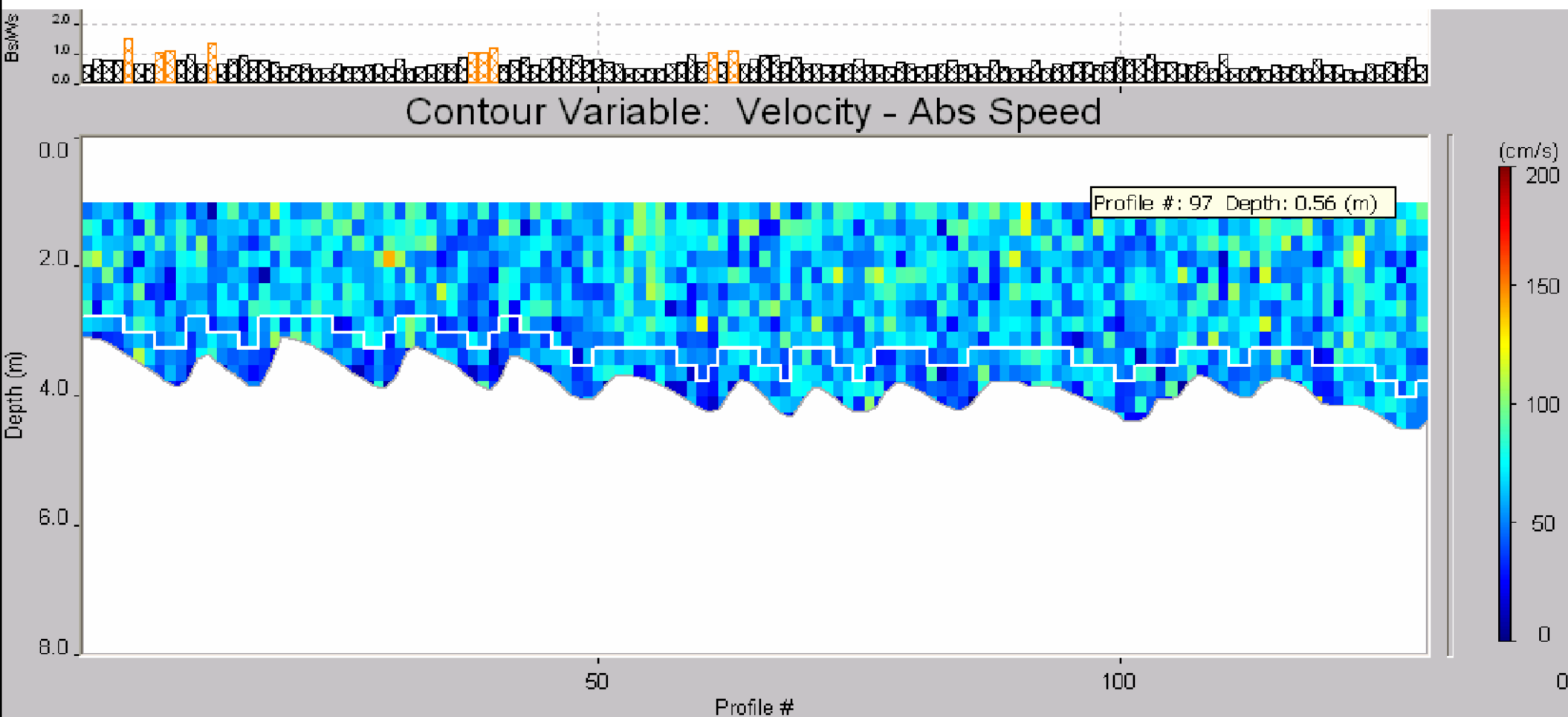
Изменение отметок свободной поверхности при уточнении шероховатости (стало резче выражено падение КСП у скалы)



Добыча песчано-гравийной смеси в русловом карьере на Томи (пр. Светлая),
глубина карьера – до 6 м

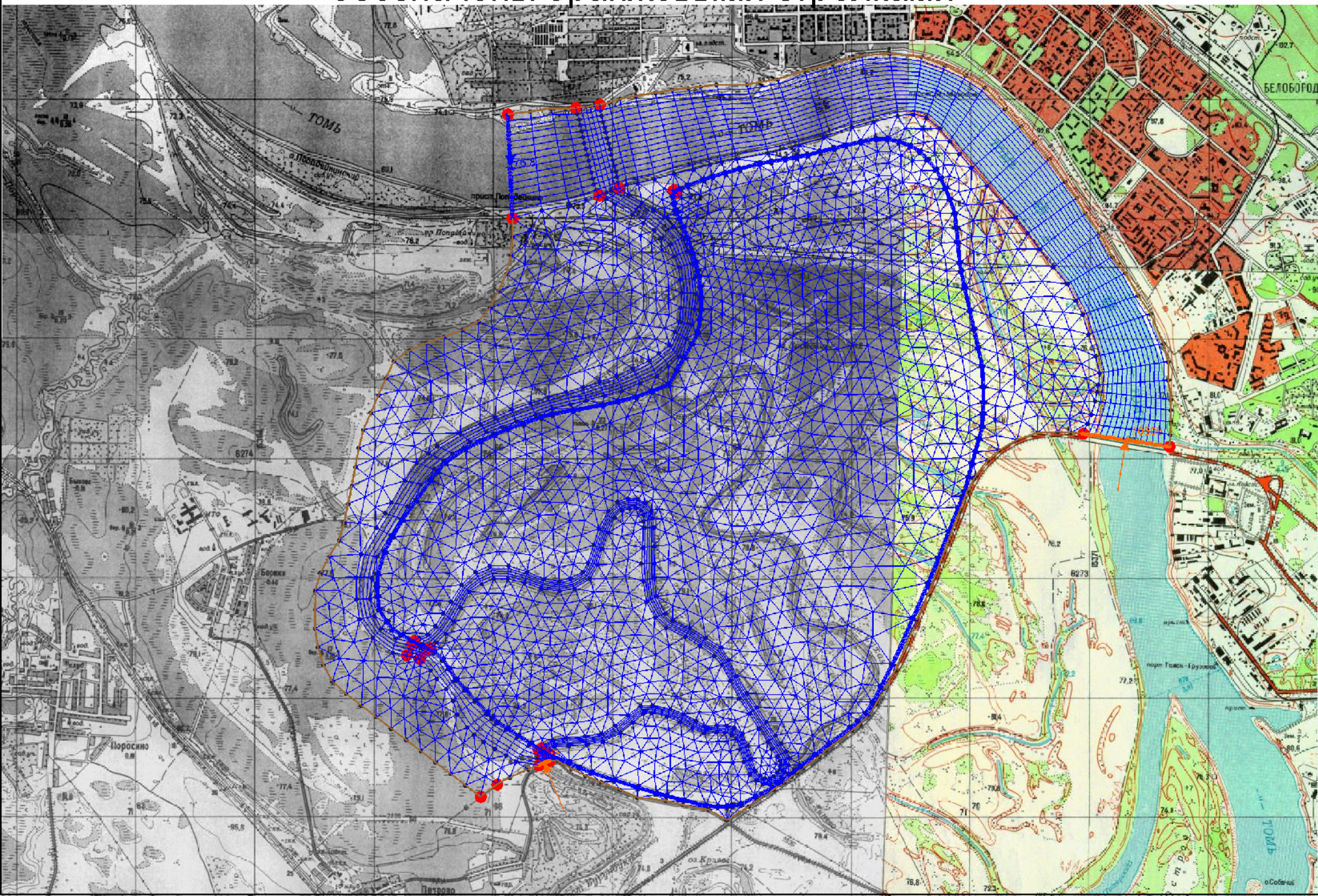


Песчаные гряды на дне русла р. Обь в 6 км ниже устья Томи и скоростное поле над ними (измерение ADP SonTek 29.05.2012 по тальвегу), $Q=2100 \text{ м}^3/\text{с}$, течение справа налево

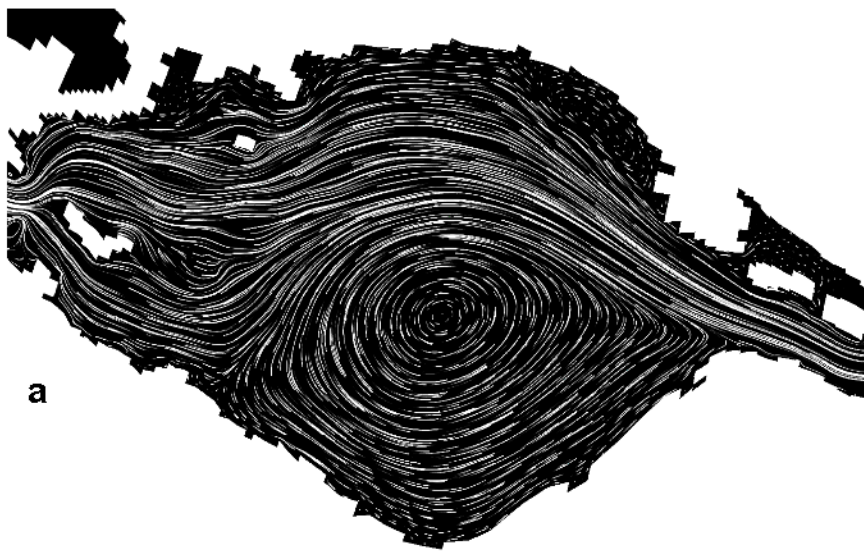


Распределение расходов во входных створах в первом приближении задается с учетом глубины, шероховатости и уклона свободной поверхности потока в каждой расчетной точке. Затем уточняется при калибровке модели.

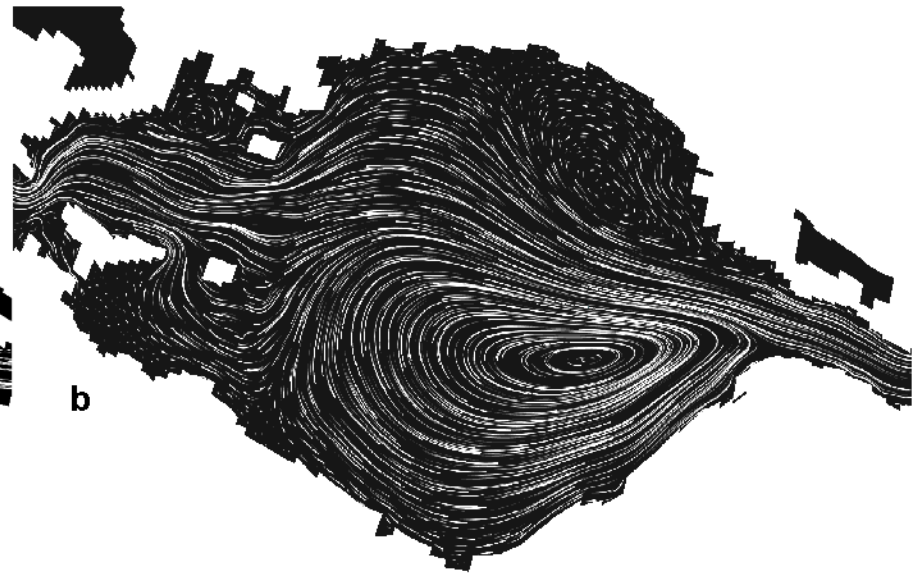
Расчетная сетка на пойме р. Томь у Томска. Входные створы обозначены оранжевыми стрелками



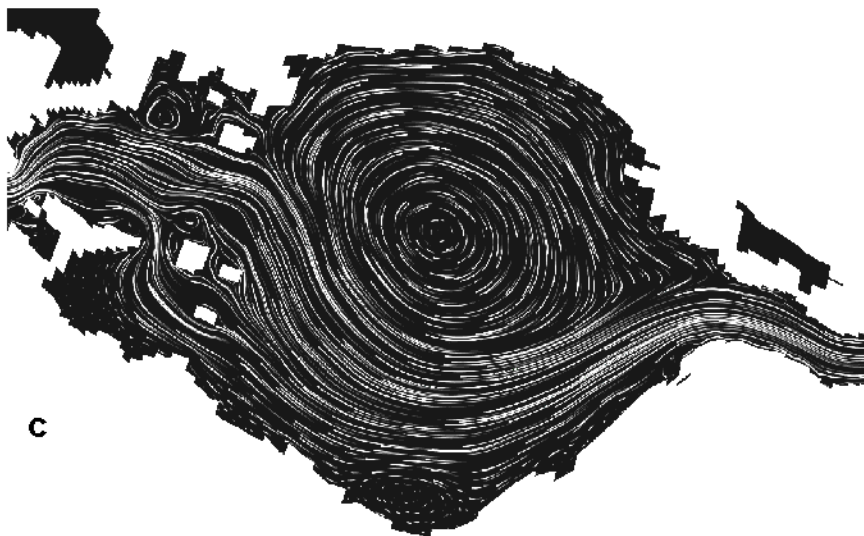
Параметры турбулентности. Характер течений в Курайском палео-озере при транзитном расходе воды 9,6 млн.м³/с (а), 5,5 млн.м³/с (b), 4,5 млн.м³/с (c) и 2,8 млн.м³/с (d). Транзитное течение направлено с востока на запад



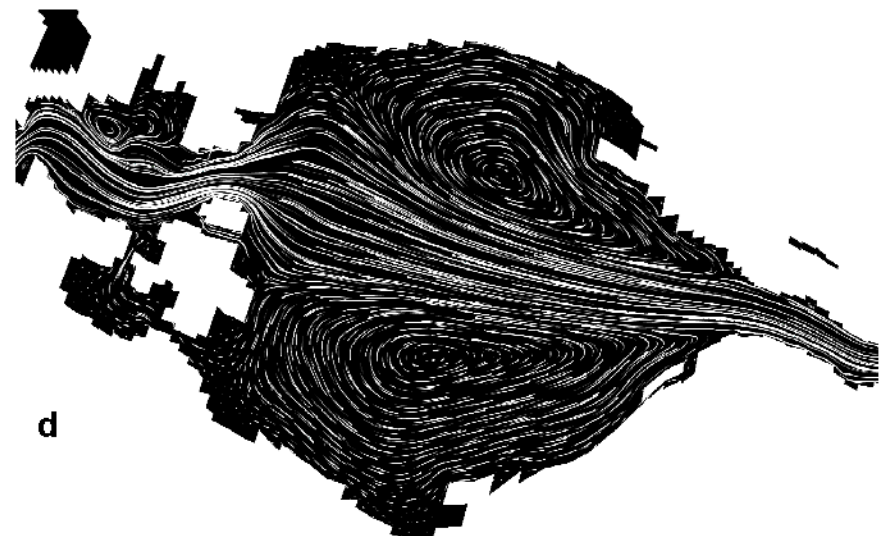
a



b



c



d

Спасибо за внимание!