

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УЧАСТКОВ
КРУПНЫХ РАВНИННЫХ РЕК ДЛЯ РАСЧЕТА И
ПРОГНОЗА ПОЛЕЙ СКОРОСТИ, СТОКА НАНОСОВ И
РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ**

Земцов В.А., Вершинин Д.А., Инишев Н.Г.
Томский государственный университет

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 (1D 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.

Цифровые модели рельефа

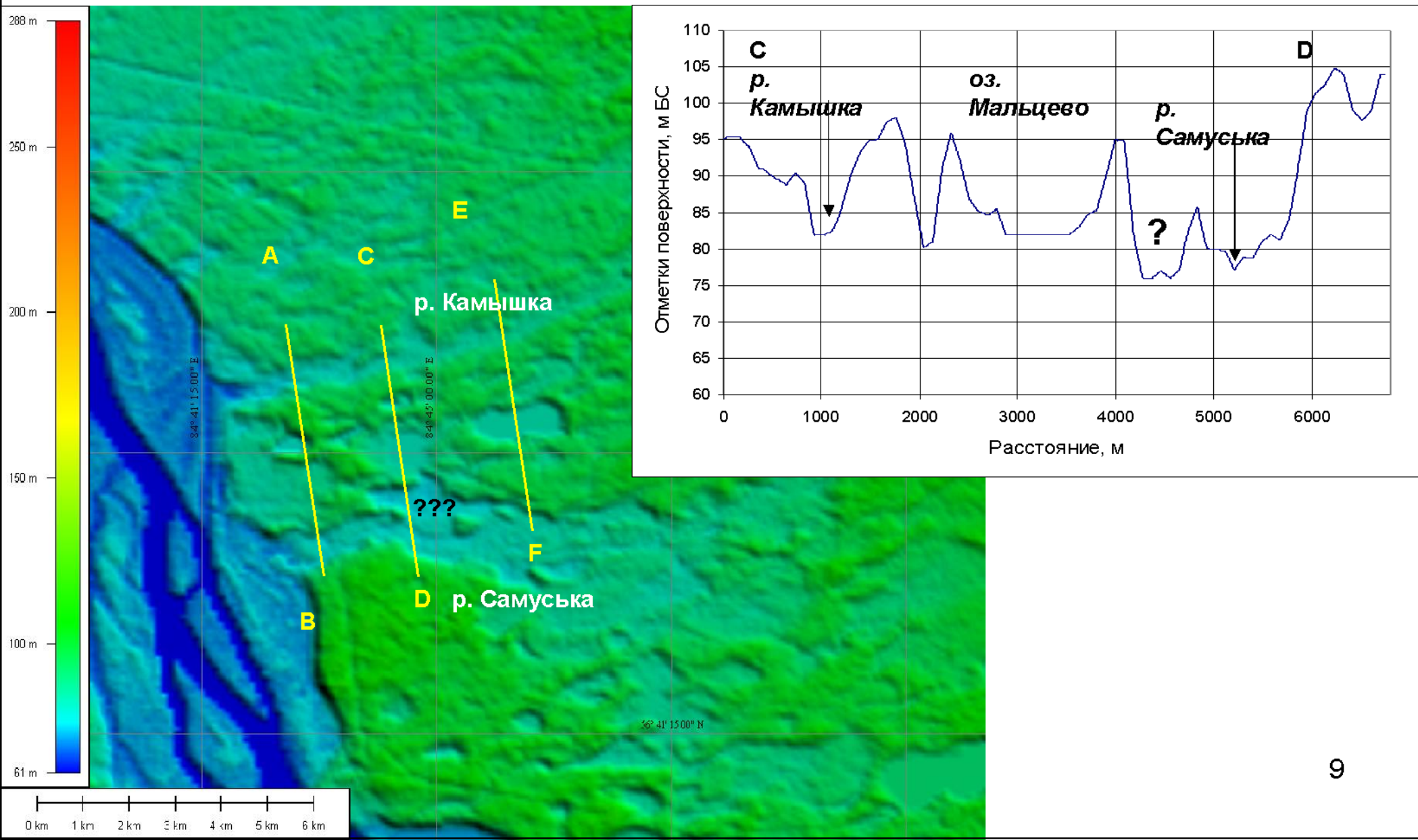
Сложность рельефа поймы при небольших относительных превышениях местности, деление и слияние потоков предъявляют повышенные требования к точности задания геометрии и усложняет компьютерные модели.

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.

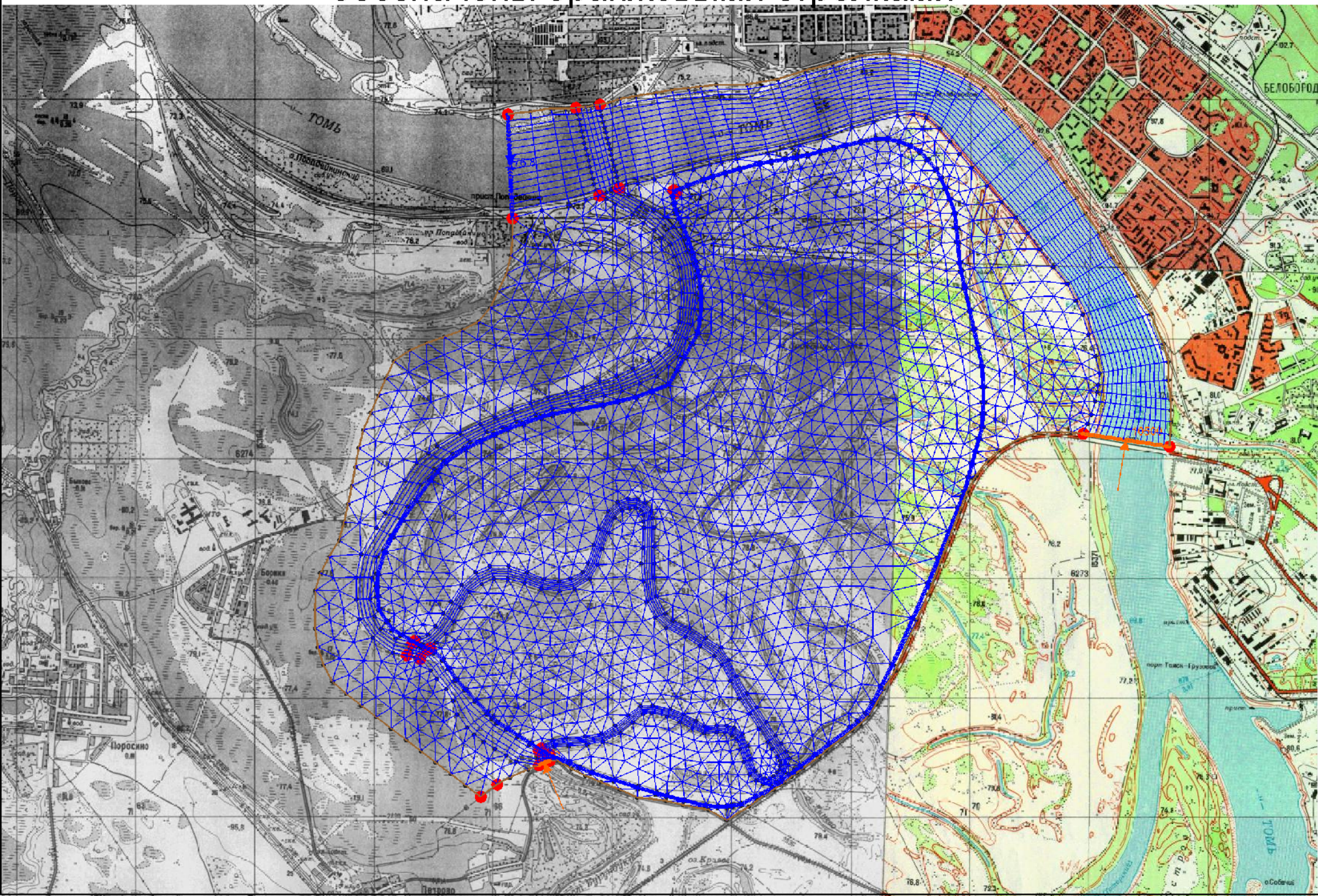
Источники информации для построения ЦМР:

- 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



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



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)

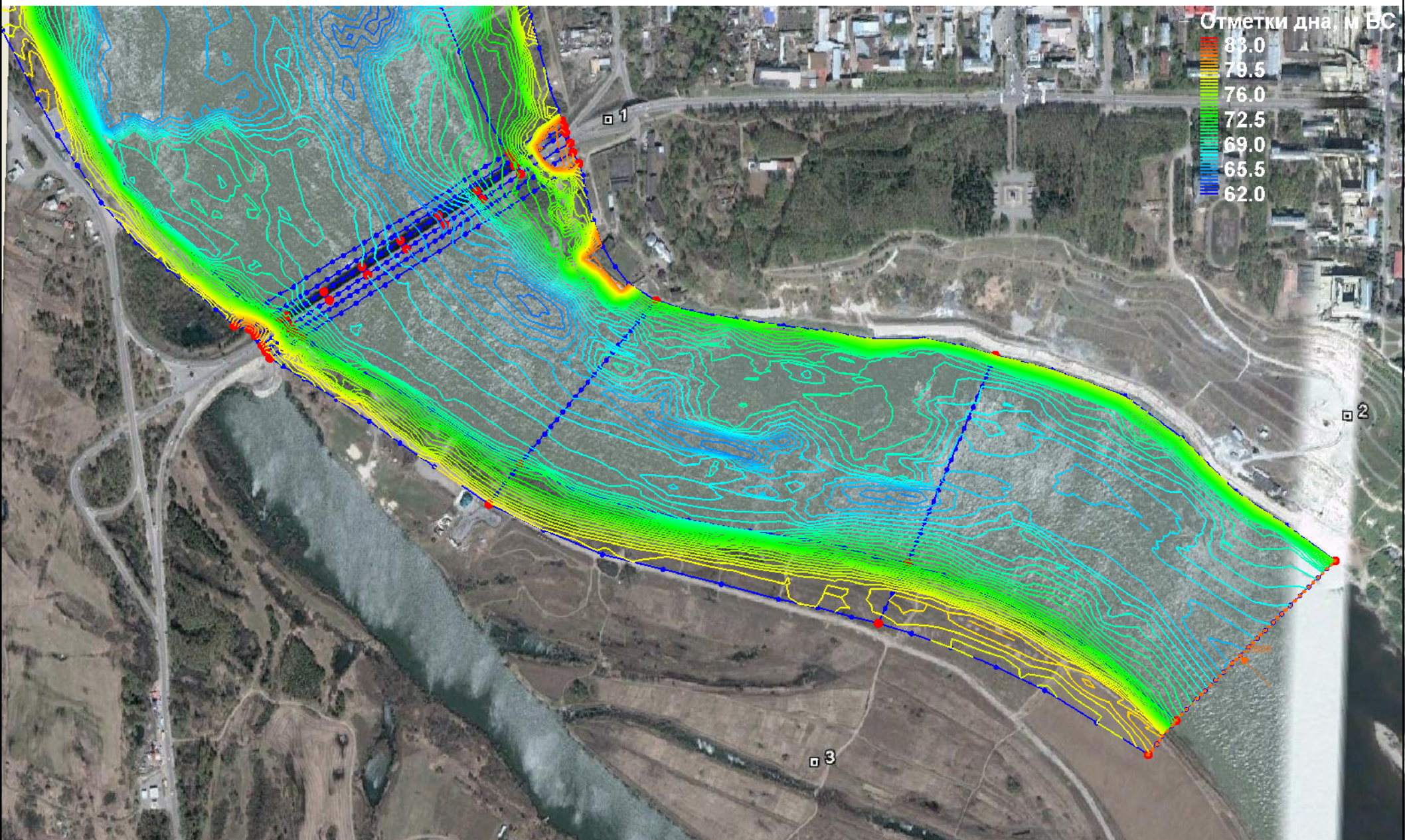




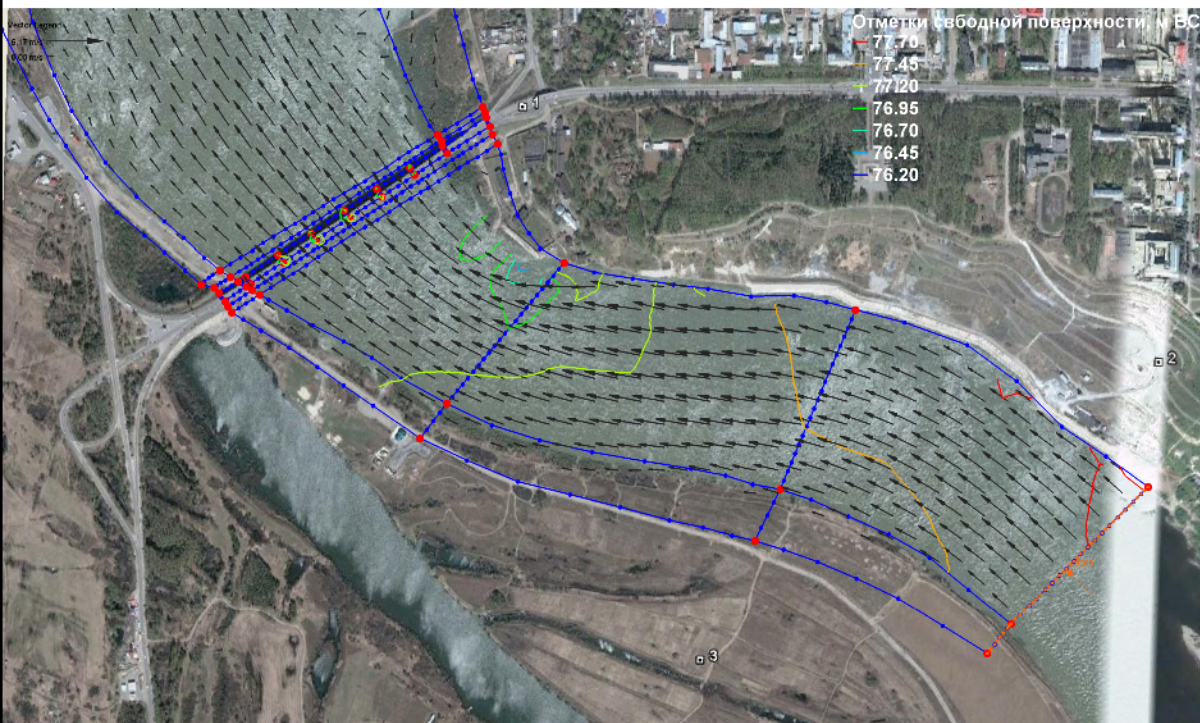
Отложения
аллювия ниже
коммунального
моста,
г. Томск



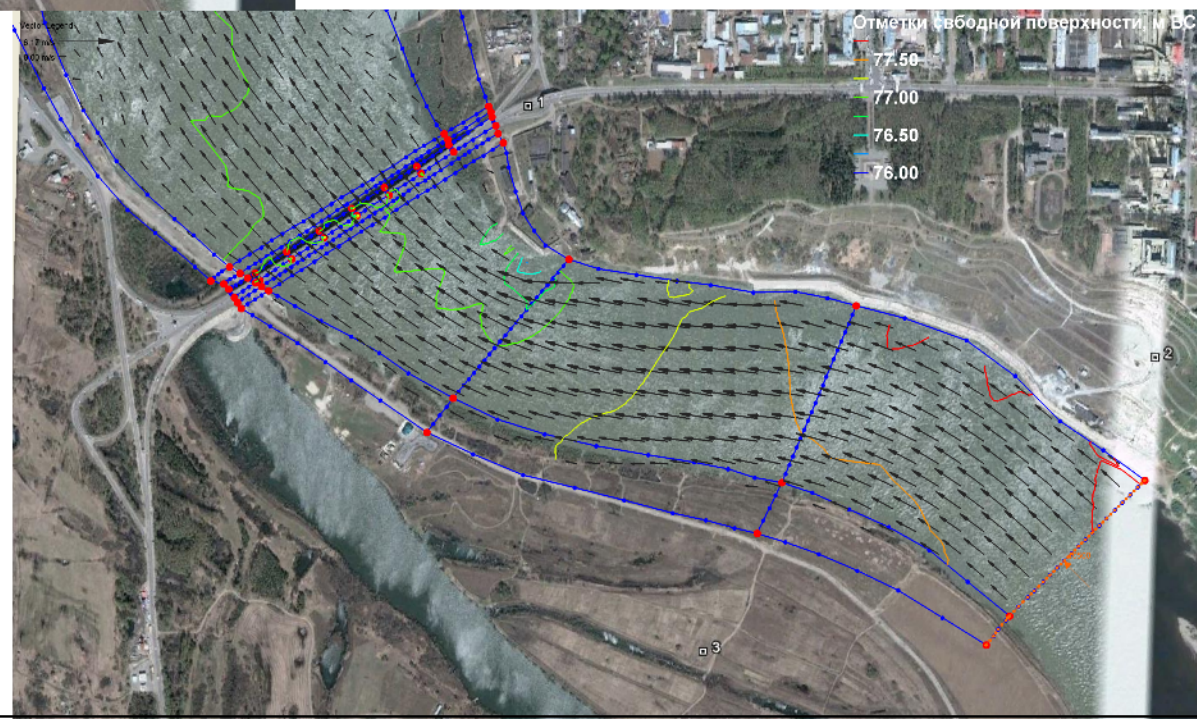
ЦМР русла Томи у Томска, $Q=10500 \text{ м}^3/\text{с}$



Поле скоростей и отметок свободной поверхности

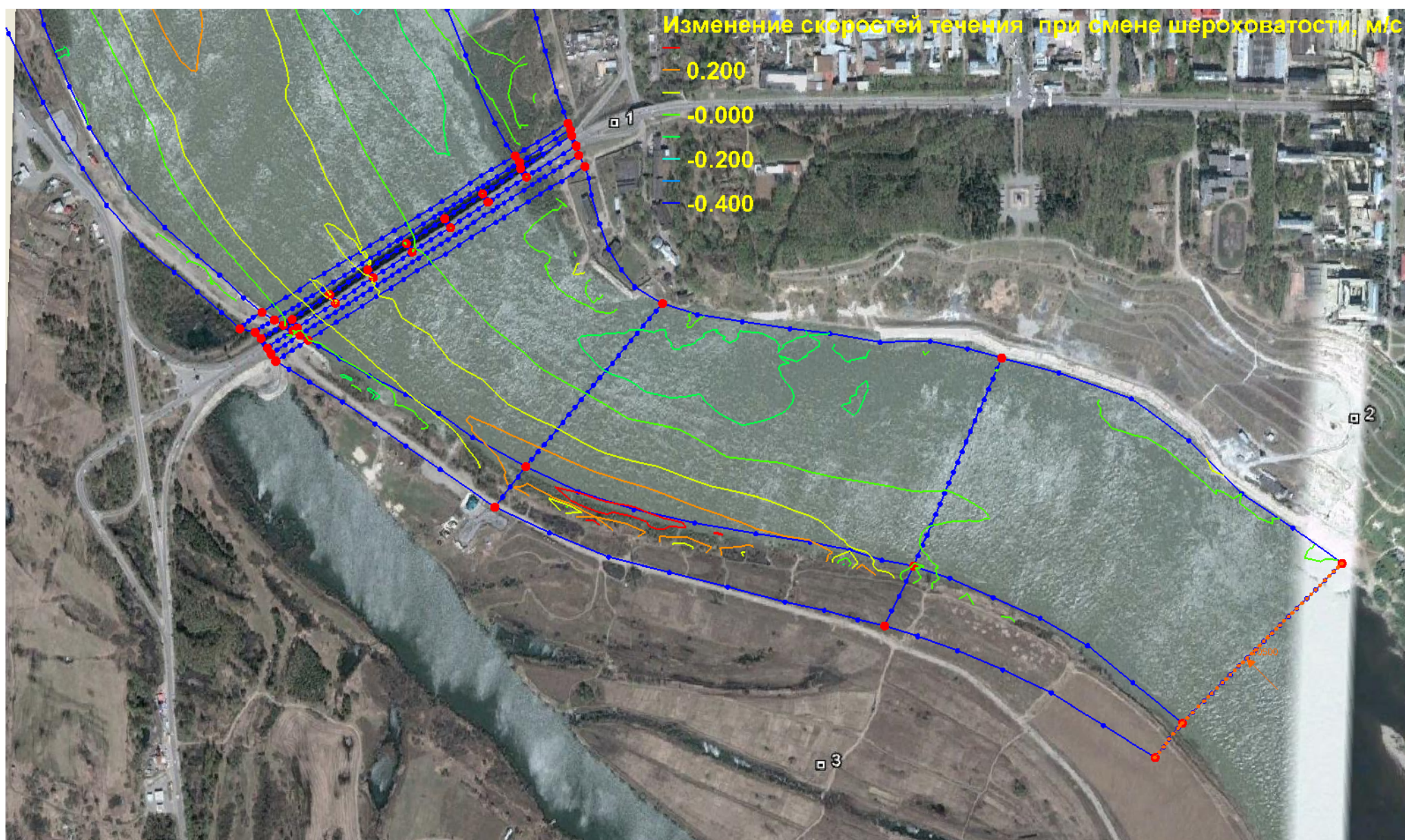


при одинаковой шероховатости в русле ($n=0,025$)

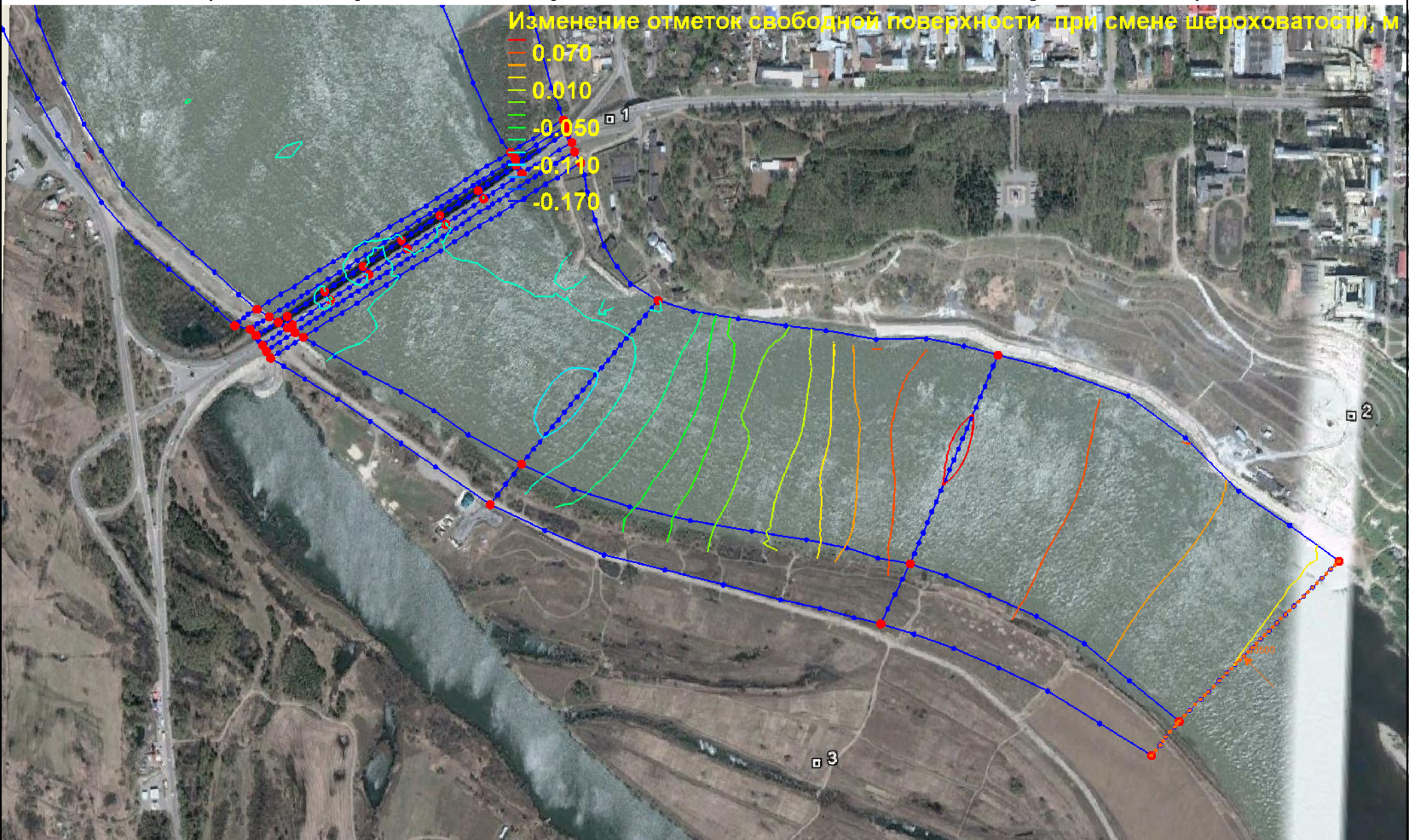


с учетом разной шероховатости в русле ($n=0,02$) и на скале ($n=0,035$)

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



Перераспределение стока воды в
русловой системе.

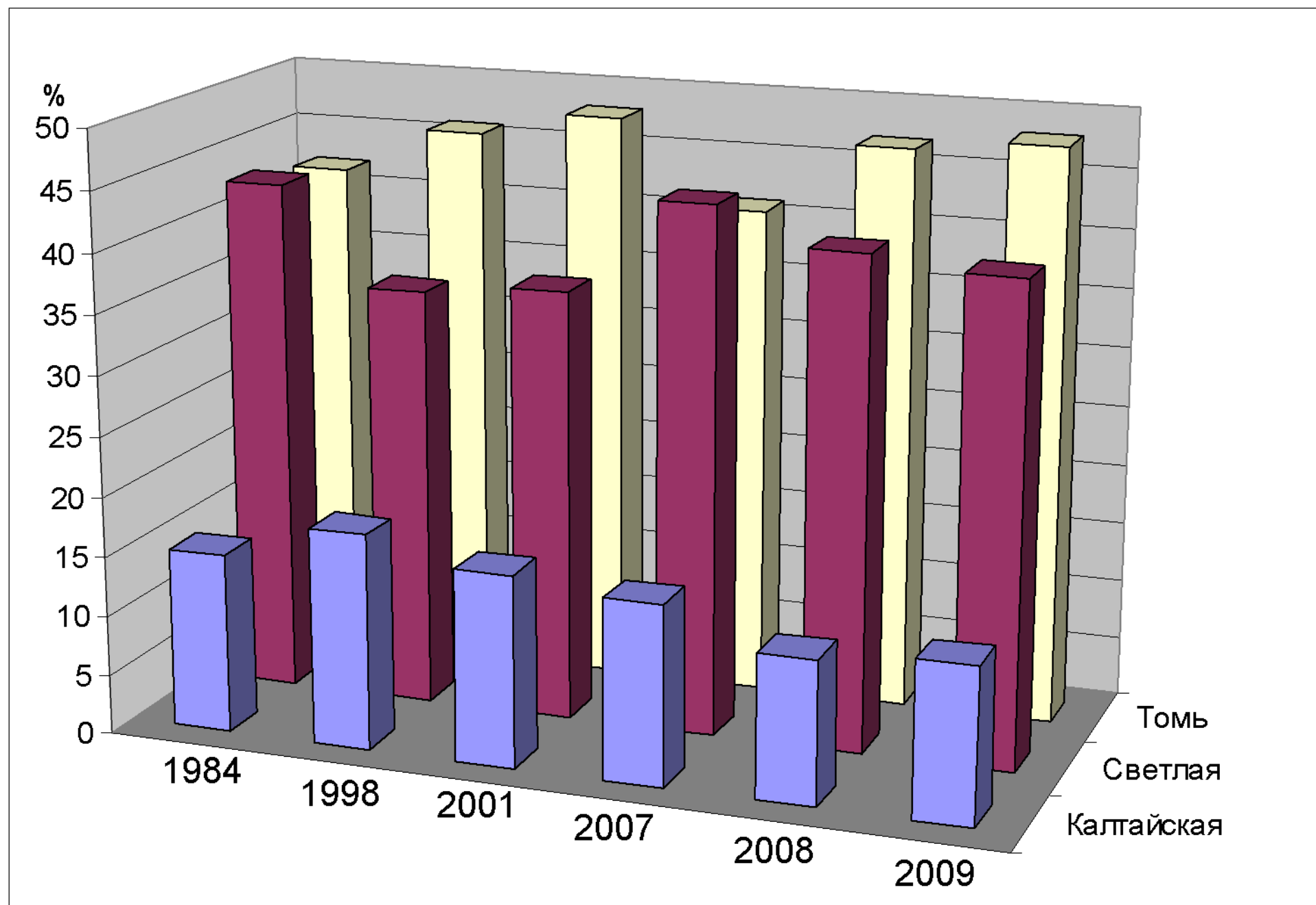
Для таких крупных сибирских рек, как Обь и Томь на исследуемых участках характерно *наличие поймы и большого количества проток*, соотношения между которыми сильно меняются с изменением водности реки при прохождении половодья.



Распределение расходов воды по протокам на исследуемом участке Томи в половодье

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

Распределение расходов по протокам



Затор льда на р. Томь в черте г. Томска при прохождении половодья 2010 года



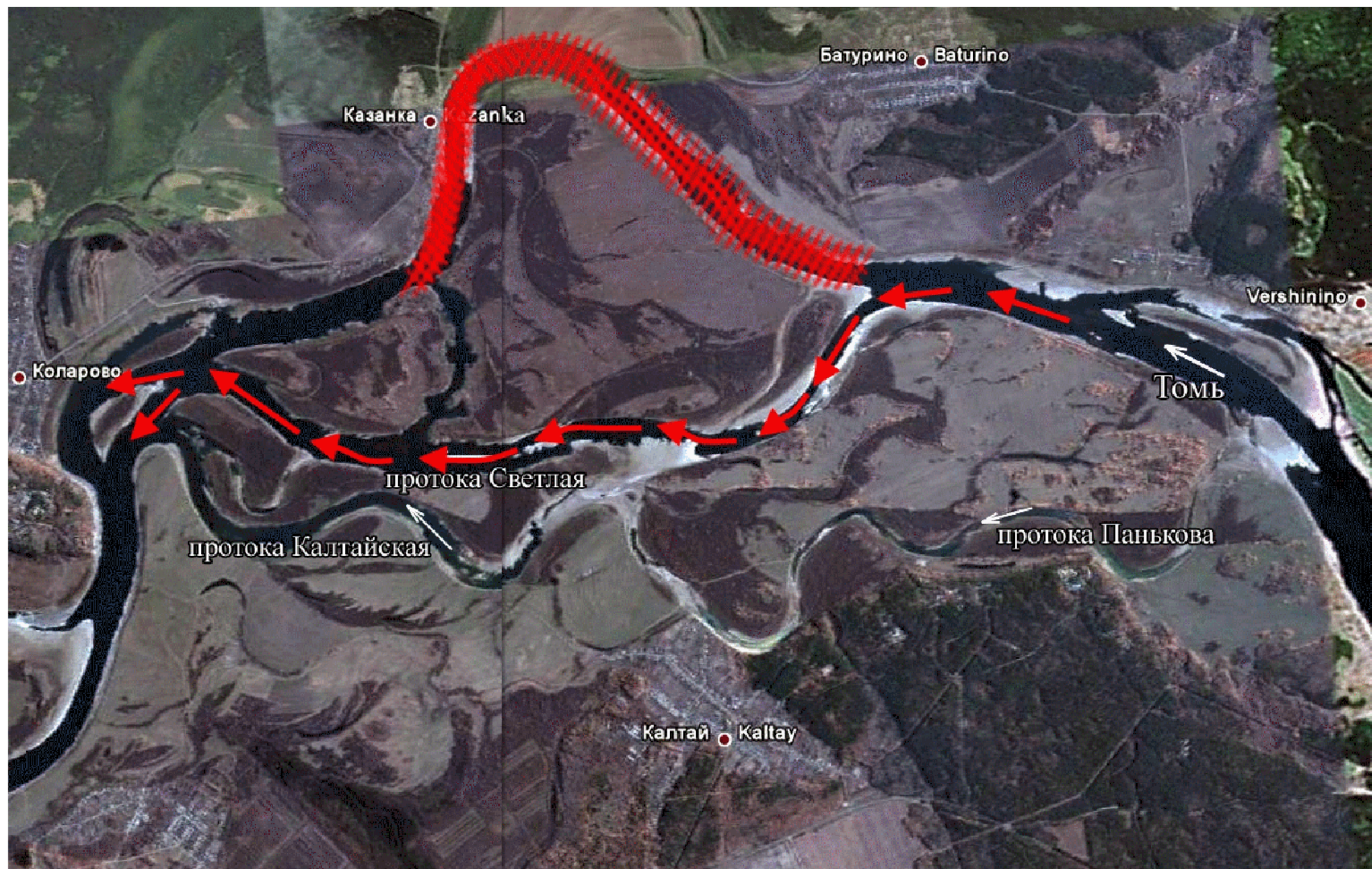
Затор льда на р. Томь при прохождении половодья 2010 года



Затор льда на р. Томь при прохождении половодья 2010 года



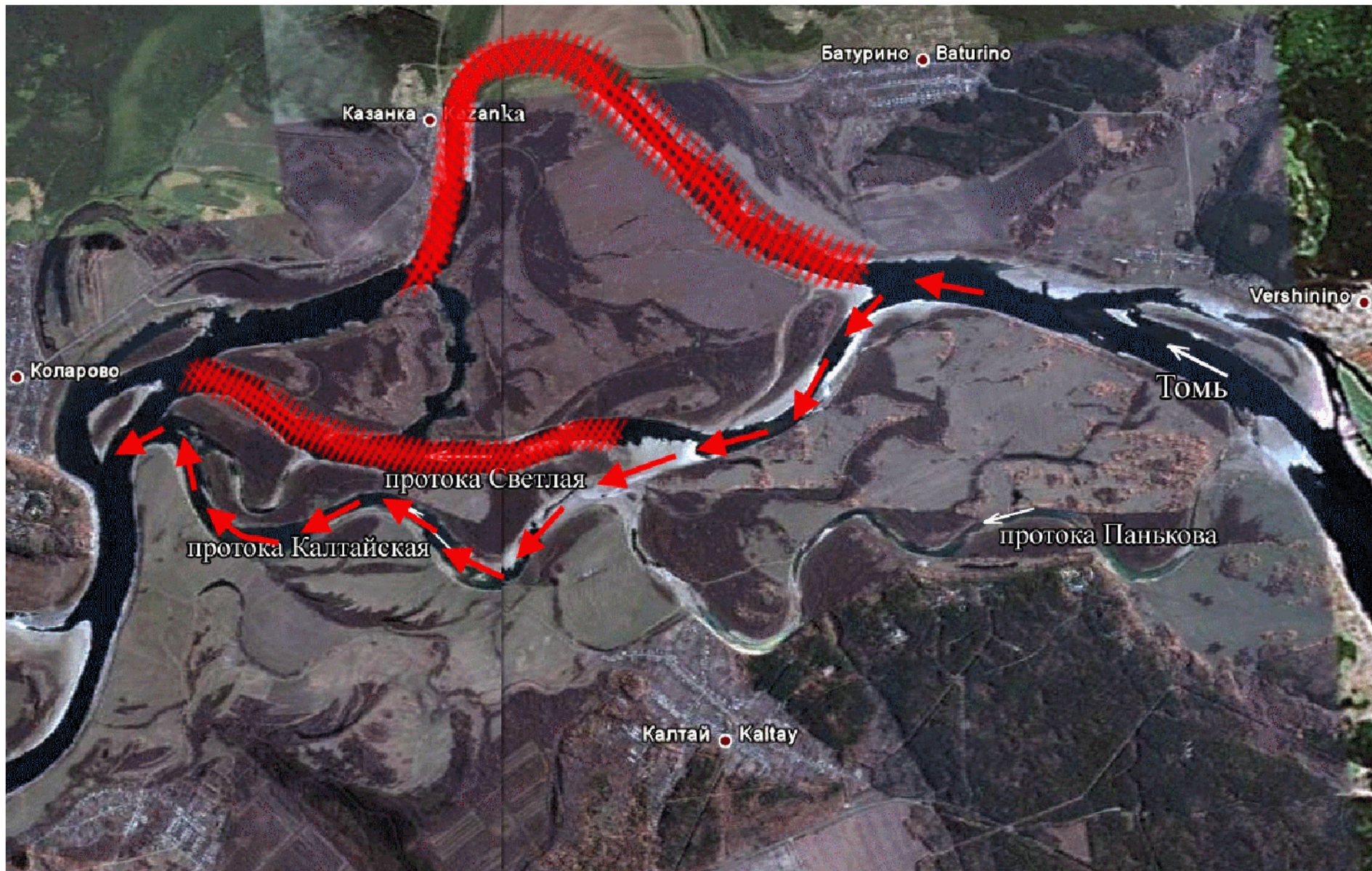
Вариант 1: затор в главном русле ниже входа в пр.Светлая



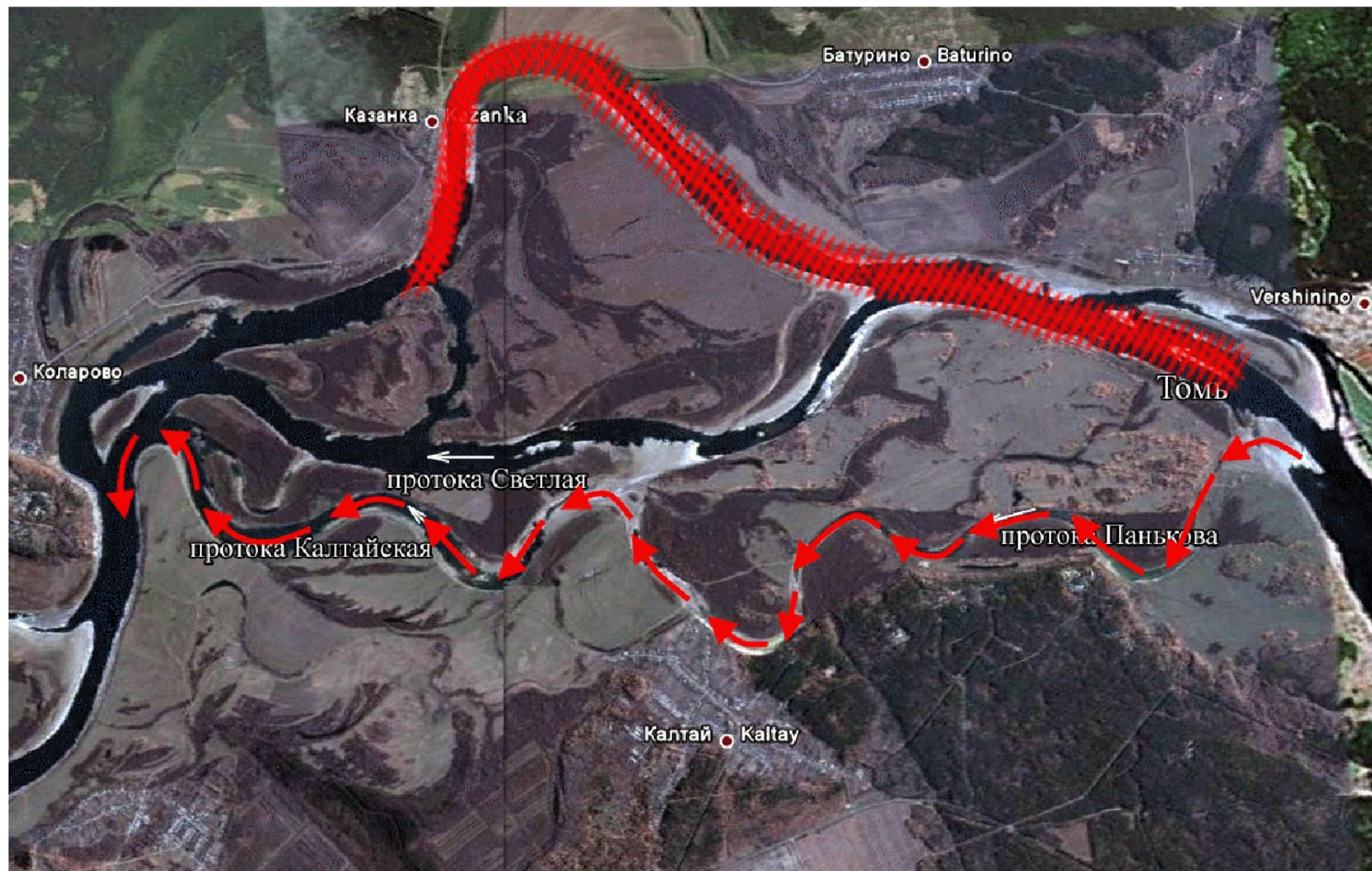
Затор льда в главном русле р. Томь при прохождении половодья 2010 года



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



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



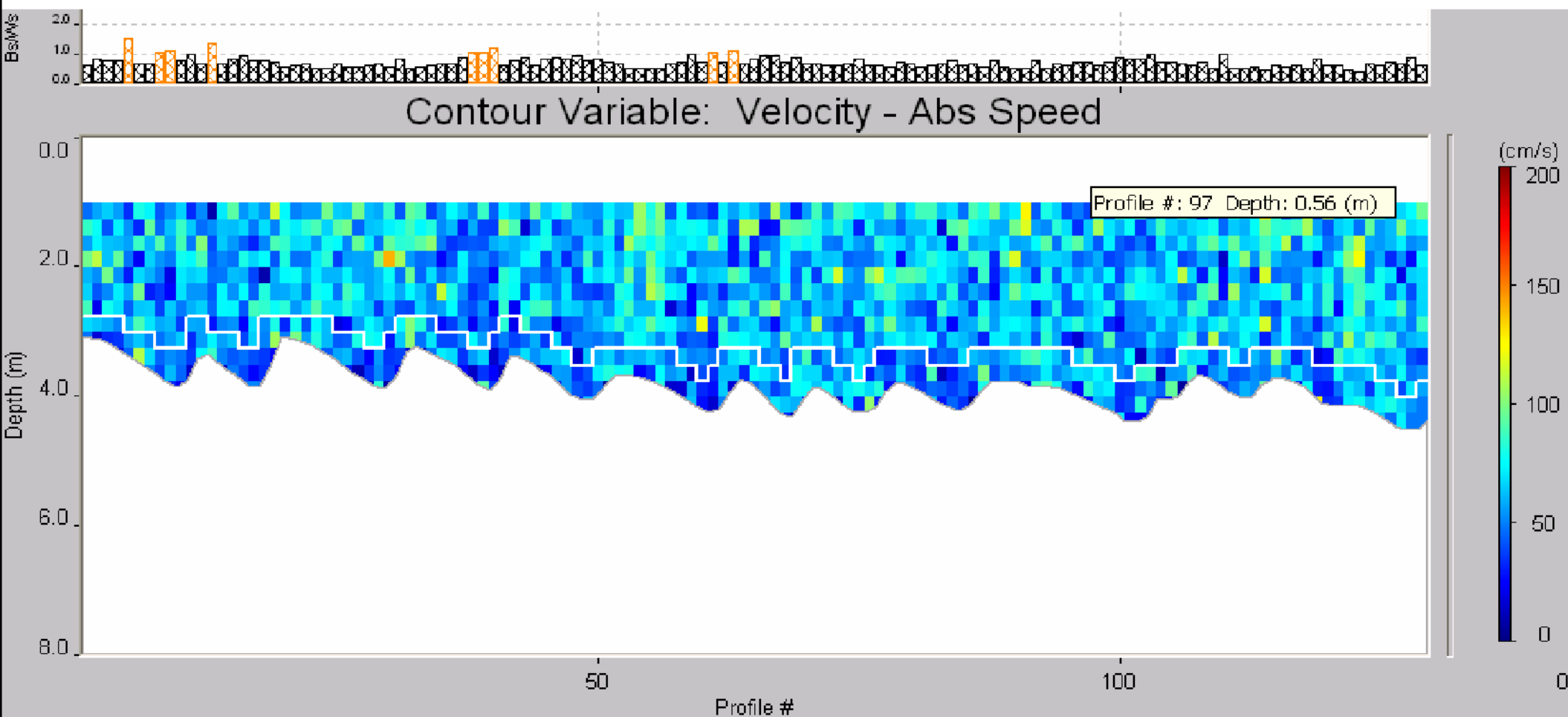
Поля гравийных гряд



Поле гравийных гряд 2



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



Спасибо за внимание!