

**Гидродинамические модели движения
водных потоков и их практическое
применение для участков рек.**

Крыленко И.Н.

географический факультет МГУ, кафедра гидрологии суши



Гидродинамические модели:

-одномерная

-двумерная

- **Исходная информация для моделирования**
- **Выбор типа модели**
- **Основные этапы построения гидродинамической модели участка реки**
- **Применение ГИС-технологий**
- **Калибровка и верификация моделей**
- **Выбор расчетных сценариев**
- **Примеры применения моделей для решения задач, связанных с затоплением территории при наводнениях**

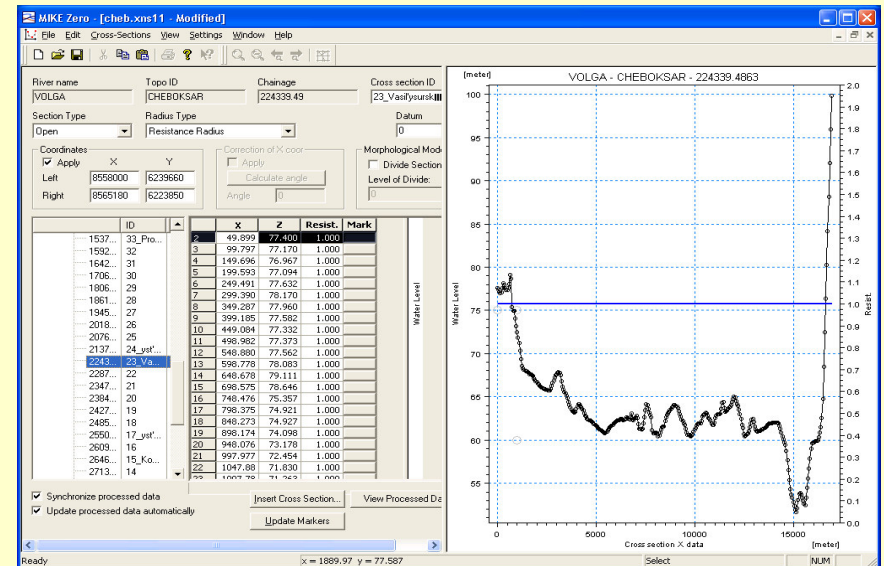
одномерная модель

$$\frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha U^2 / 2g)}{\partial x} + \frac{U^2}{C^2 h} = I$$

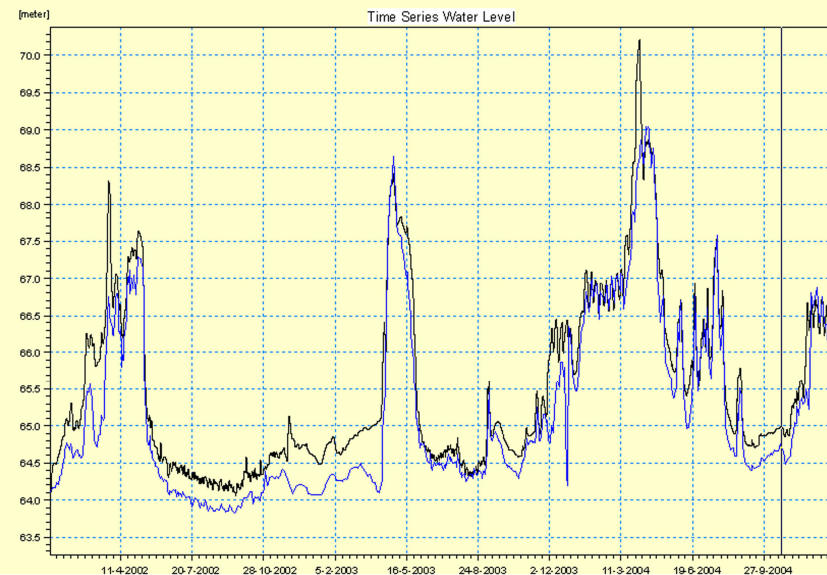
$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial t} = q$$

где U - средняя скорость потока,
 q - боковой приток (отток),
 Q - расход воды,
 h - средняя глубина потока,
 I - уклон водной поверхности,
 C - коэффициент Шези,
 a - коэффициент Буссинеска,
 g - ускорение силы тяжести,
 x - расстояние по продольной оси водотока,
 t - время.

Исходные данные:
информация о рельефе
территории в виде
поперечных профилей через
долину реки



Результаты моделирования:
временной ход уровней и
расходов воды по длине
участка реки



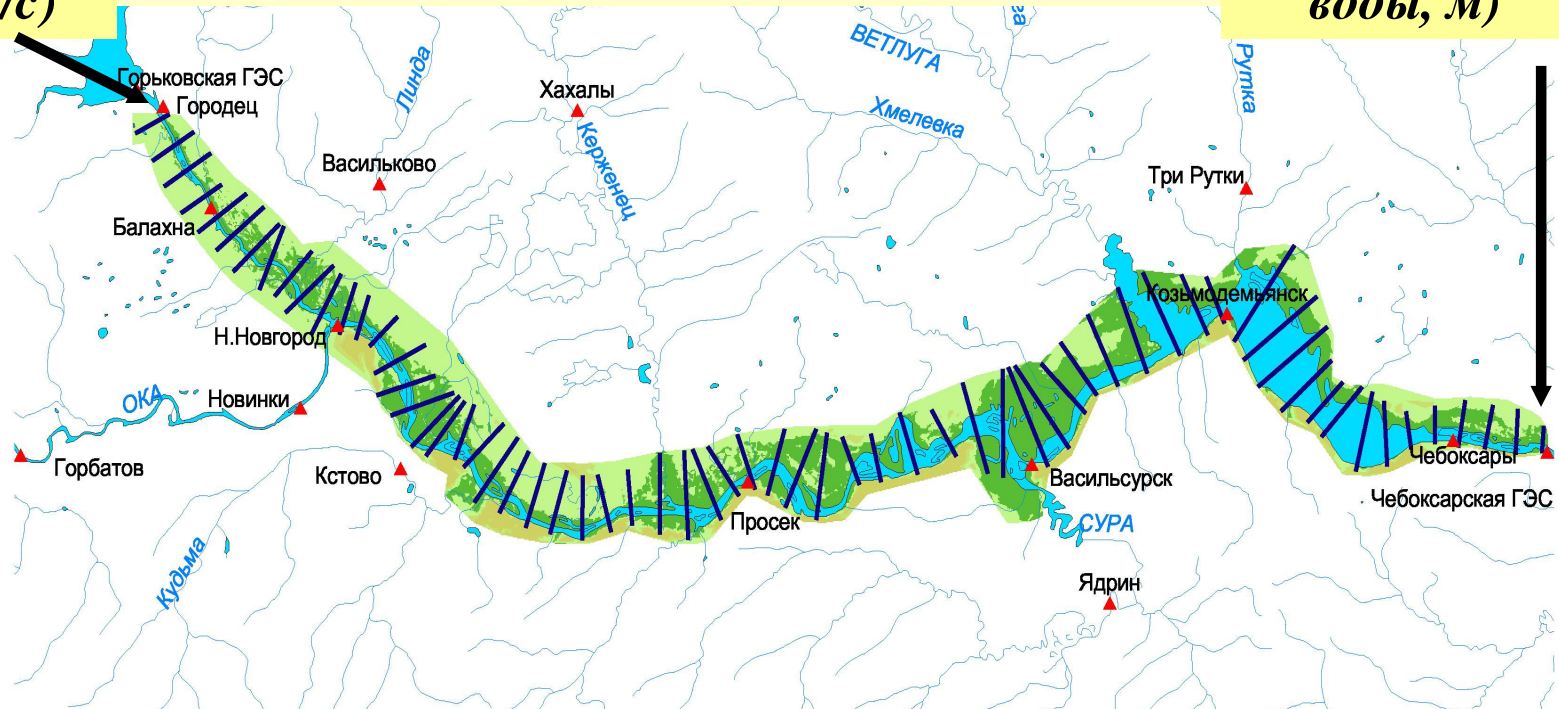
Уровни воды р. Волги по г/п. Н.Новгород (Чебоксарское вдхр.) за 2002 – 2004 гг.

- фактические по данным Роскомгидромета,
- рассчитанные по гидродинамической модели

границные условия:

Q (расход
воды, $\text{м}^3/\text{с}$)

H (уровень
воды, м)



начальные условия:

уровни водной
поверхности по длине
участка реки на начало
расчета

ДВУМЕРНАЯ МОДЕЛЬ

уравнения Сен-Венана в приближении
“мелкой воды”:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{g} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{v}{g} \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{u^2}{C^2 h} = - \frac{\partial z}{\partial x} \\ \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{v}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{|uv|}{C^2 h} = - \frac{\partial z}{\partial y} \\ \frac{\partial(u \cdot h)}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot h)}{\partial y} = 0 \end{array} \right.$$

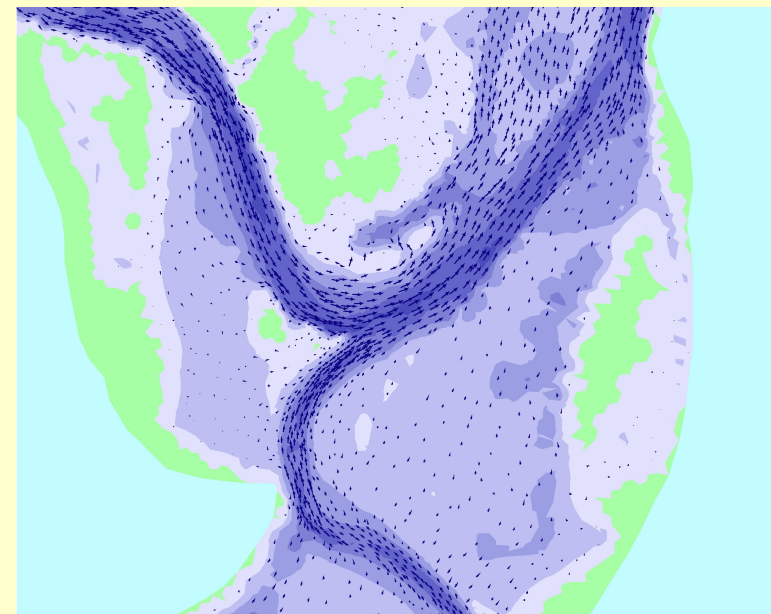
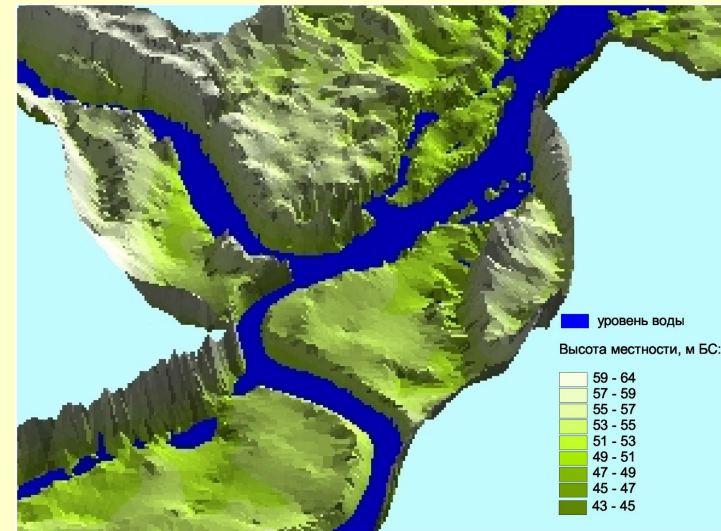
x, y – декартовы координаты

t – координата времени

z – отметка водной поверхности

u, v – составляющие скорости

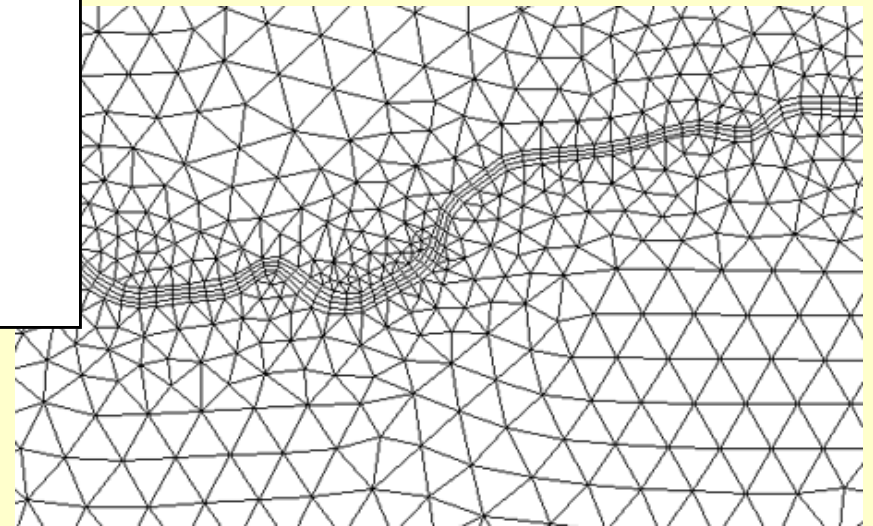
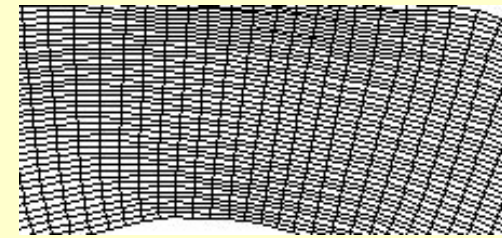
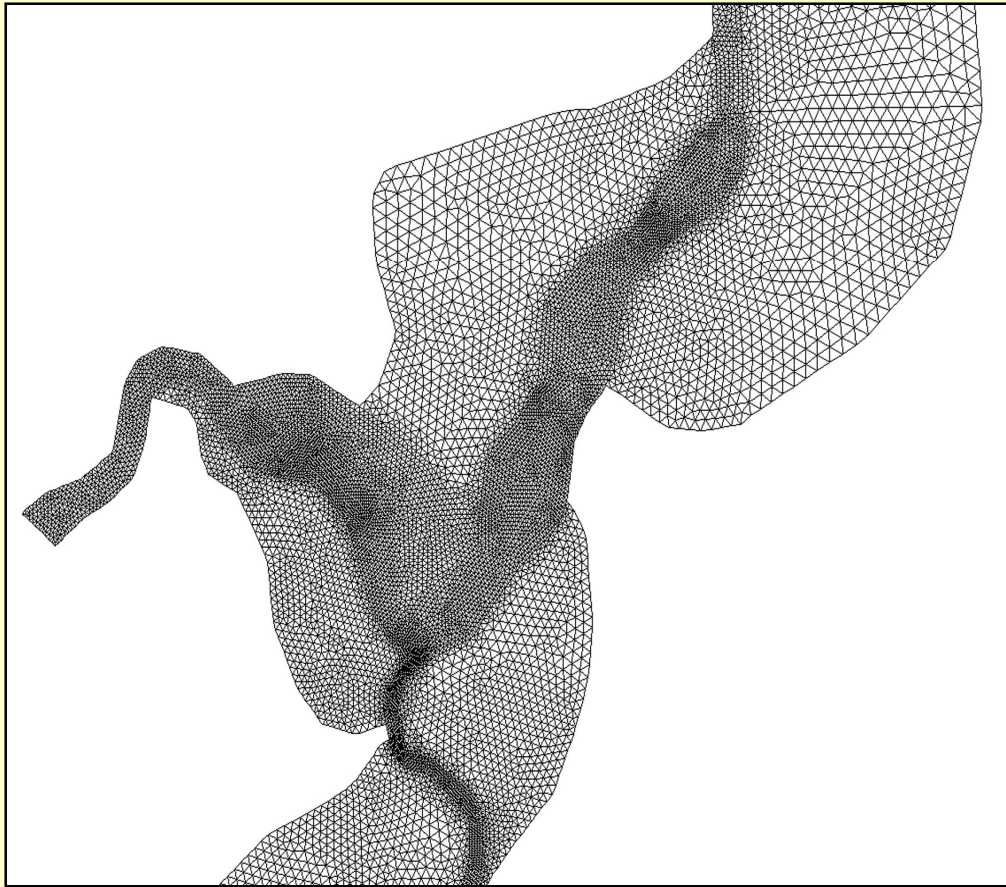
Исходные данные:
информация о рельефе
территории в виде поля
точек (x, y, z_0)



Результаты моделирования:

- 1) плановая картина распределения уровней водной поверхности
- 2) глубин воды
- 3) векторное поле осредненных по вертикали скоростей течения потока

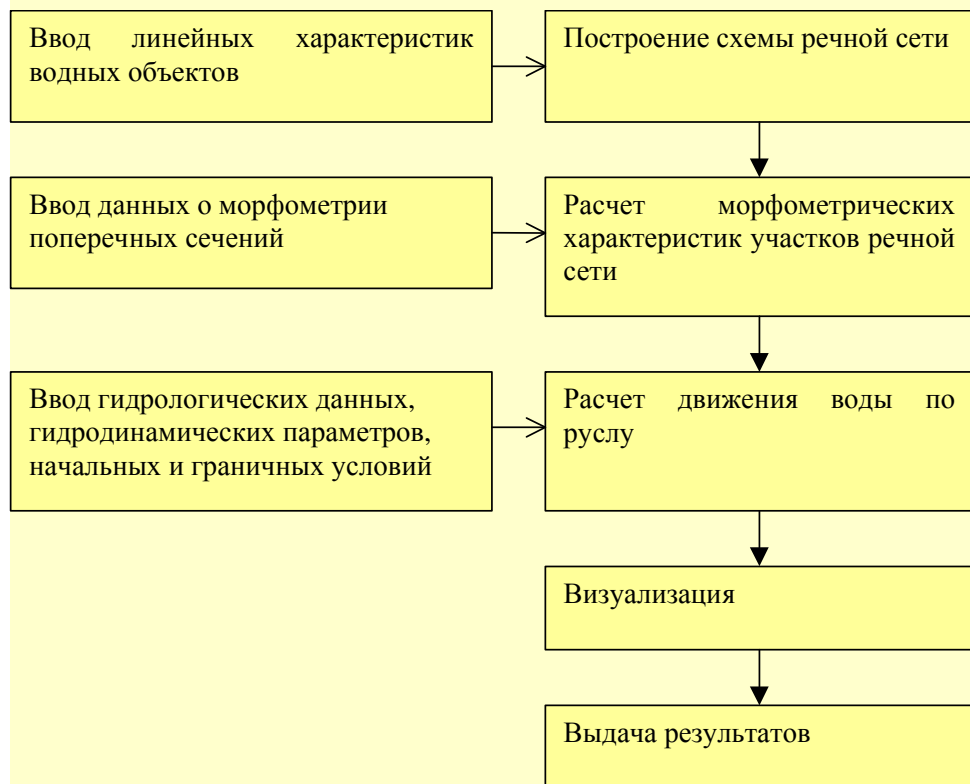
Расчетные сетки



Этапы построения модели участка реки:

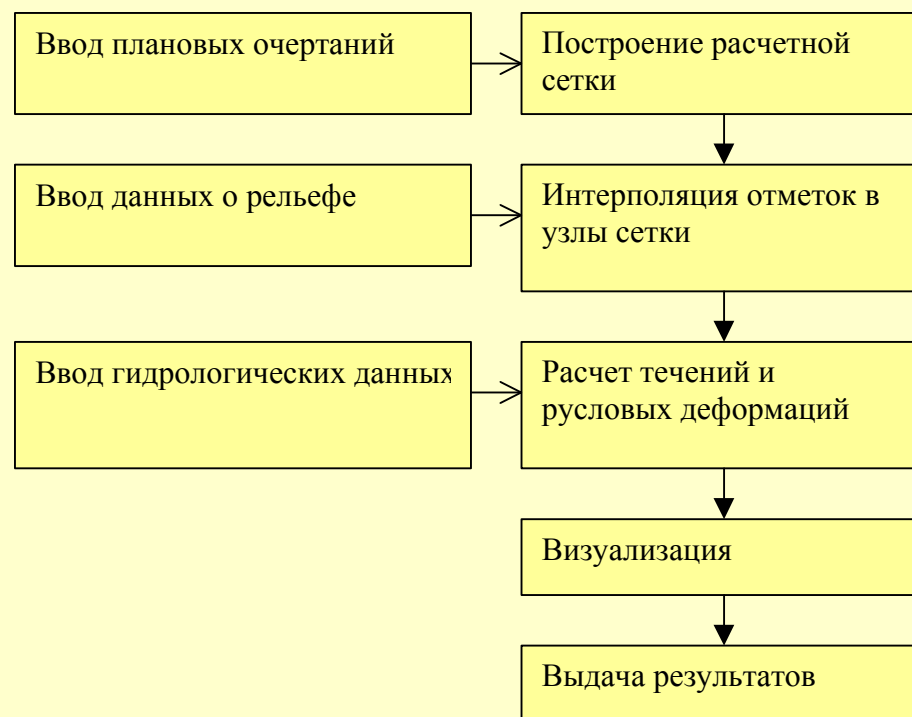
Алгоритм построения

одномерной модели:



Алгоритм построения

двумерной модели:



калибровка моделей:

$$C = \frac{h^{1/6}}{n} \quad - \text{ формула Маннинга}$$

где C - коэффициент Шези,
 h - средняя глубина потока, м
 n - коэффициент шероховатости.

информация для калибровки моделей:

одномерных:

- уровни воды (измеренные и по гидрологическим постам)

двумерных:

- уровни воды (измеренные и по гидрологическим постам)
- скорости течения воды
- границы затопления

Уровень воды на участке реки в некоторый момент времени

[Алексеевский, Ободовский, Самохин, 2005, Алексеевский, 2005]:

$$H(x, t) = H_Q + \Delta H_n + \Delta H_{nz} \pm \Delta H_p \pm \Delta H_{nn} \pm \Delta H_{np} \pm \Delta H_n \pm \Delta H_m$$

H_Q - СТОКОВАЯ,

ΔH_n - ПОДПОРНАЯ,

ΔH_{nz} - ЗАТОРНАЯ,

ΔH_p - РУСЛОВАЯ,

H_{pp} - ПОДЗЕМНАЯ,

ΔH_{np} - ПРИЛИВНАЯ,

ΔH_n - СГОННО-НАГОННАЯ,

ΔH_m - ТЕКТОНИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ УРОВНЯ ВОДЫ.

Анализ условий затопления территории и возможные варианты предупреждения наводнений в районе расположения пансионата “Сосны” (Тверская область) на основе двумерной модели “River” (авт.Беликов В.В., Милитеев А.Н.)



Исходные данные для моделирования:

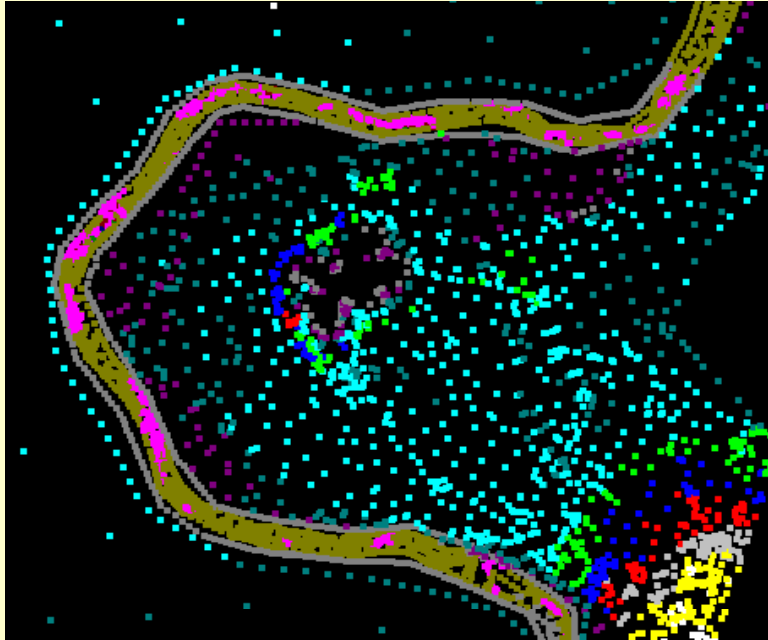
получены при экспедиционных изысканиях кафедры гидрологии суши

- **отметки рельефа пойм,**
- **глубины р.Тьма,**
- **тип растительности на поймах**
- **скорости течения**
- **уклоны водной поверхности**

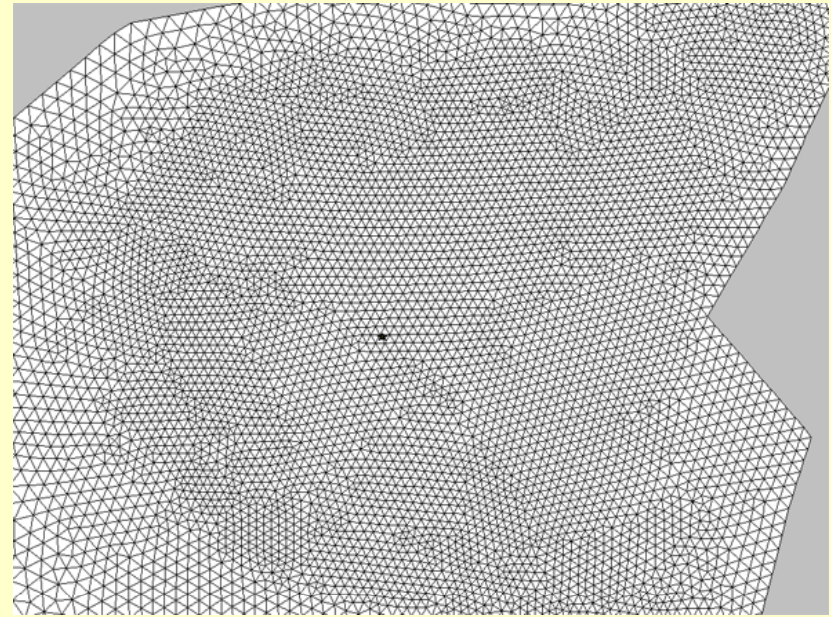


Общая длина участка 6 км

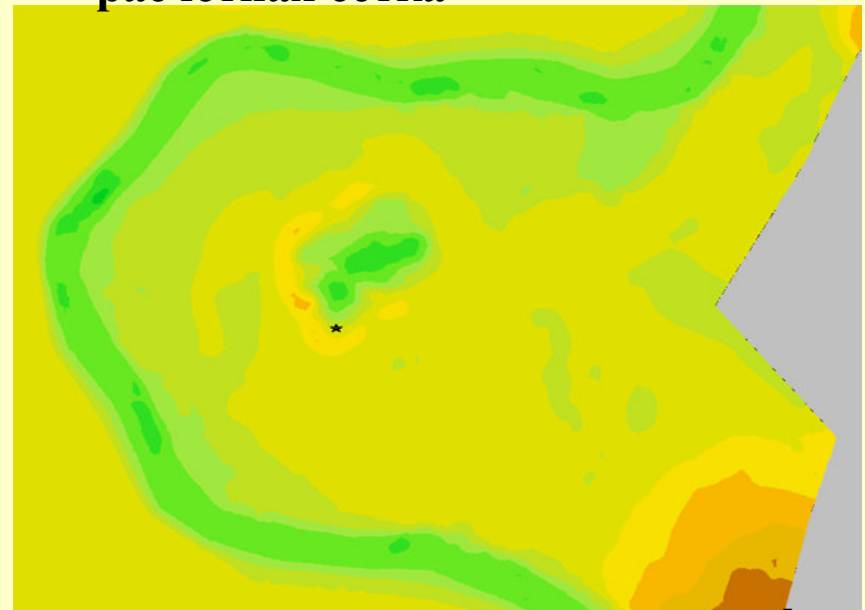
Построение модели:



исходное поле точек рельефа
(цвет точек - в зависимости от высоты местности)

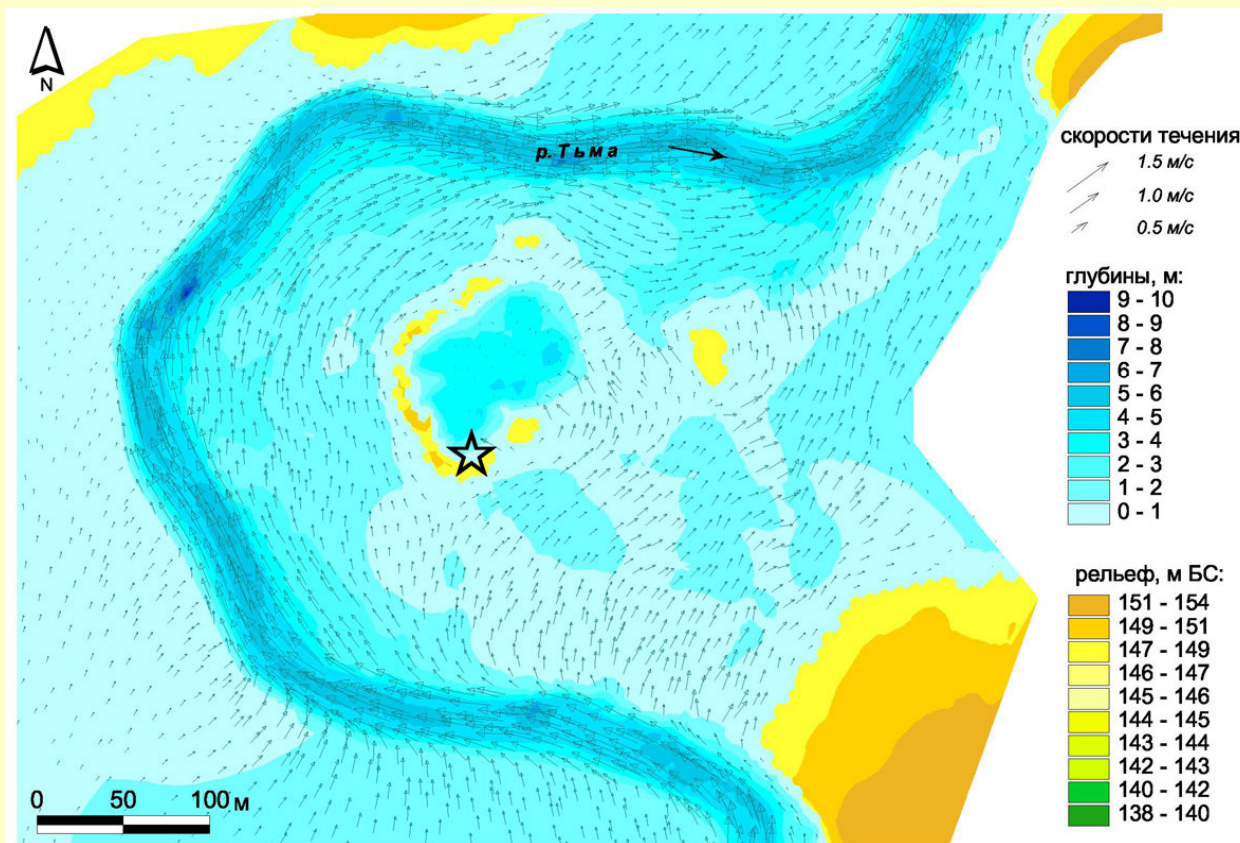


расчетная сетка

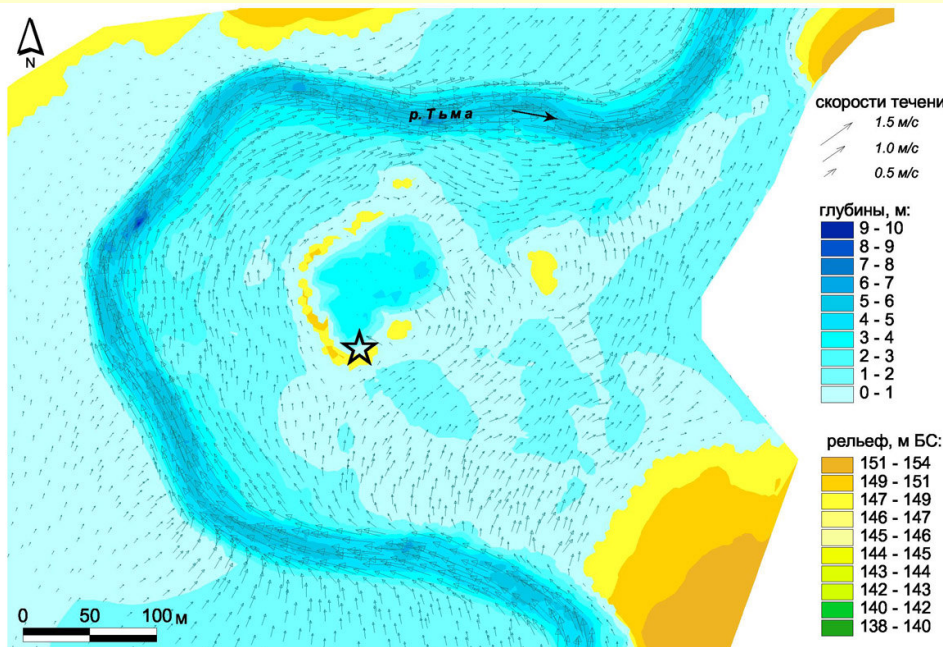


результаты интерполяции рельефа

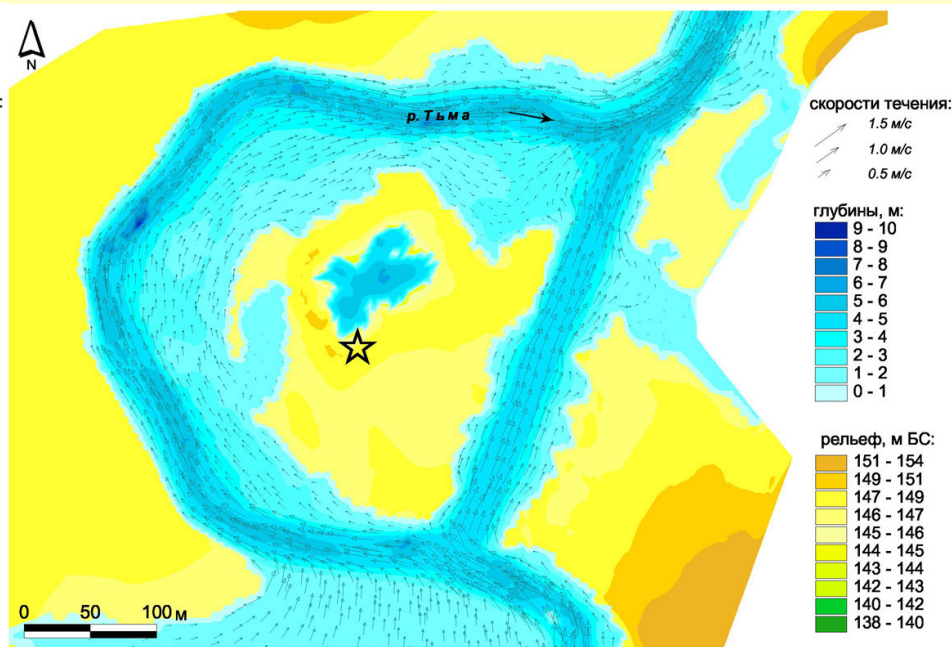
Рассчитанные на основе модели “*River*” глубины затопления пойм и русла р.Тьмы и скорости течения в районе пансионата “Сосны” при прохождении расхода воды 1% обеспеченности:



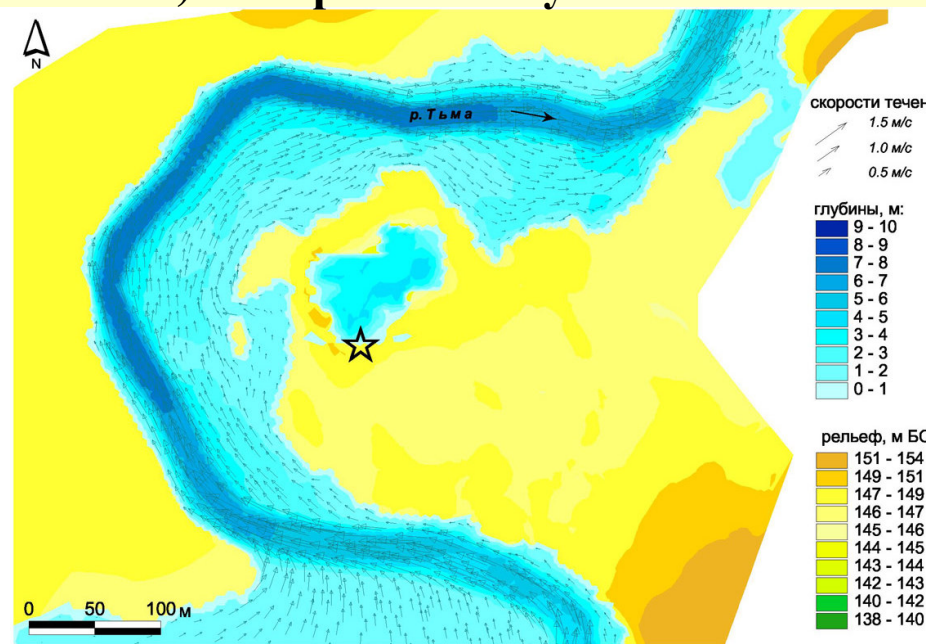
а) в современных условиях



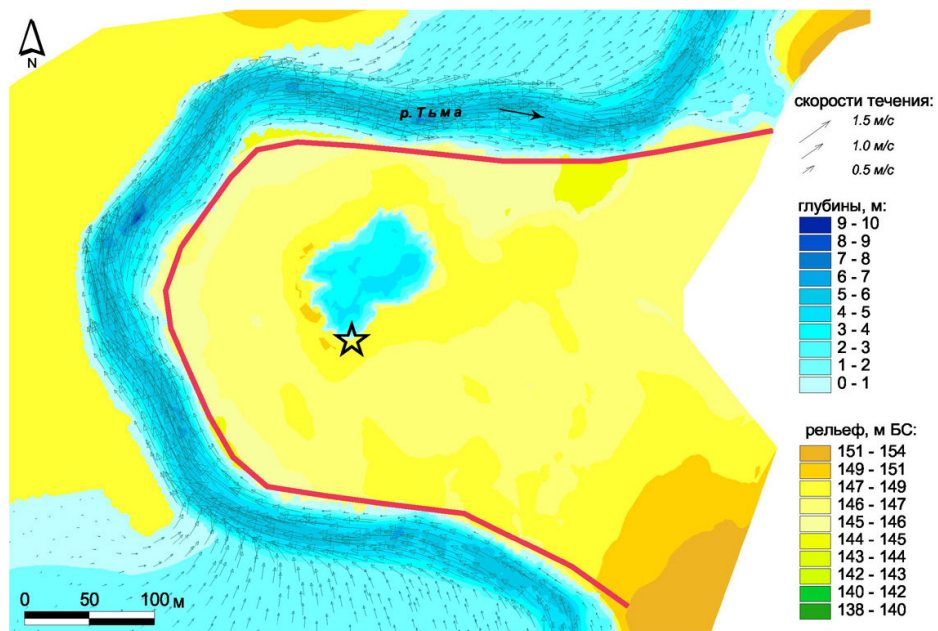
а) в современных условиях



б) при организации искусственного канала



в) при углублении основного русла



г) при наличии противопаводочной дамбы

*Водный режим и зоны затопления освоенных участков
речных долин в узле слияния рек Сухоны и Юга (г.
Великий Устюг)*

программный комплекс "River" (В.В.Беликов, А.Н. Милитеев)

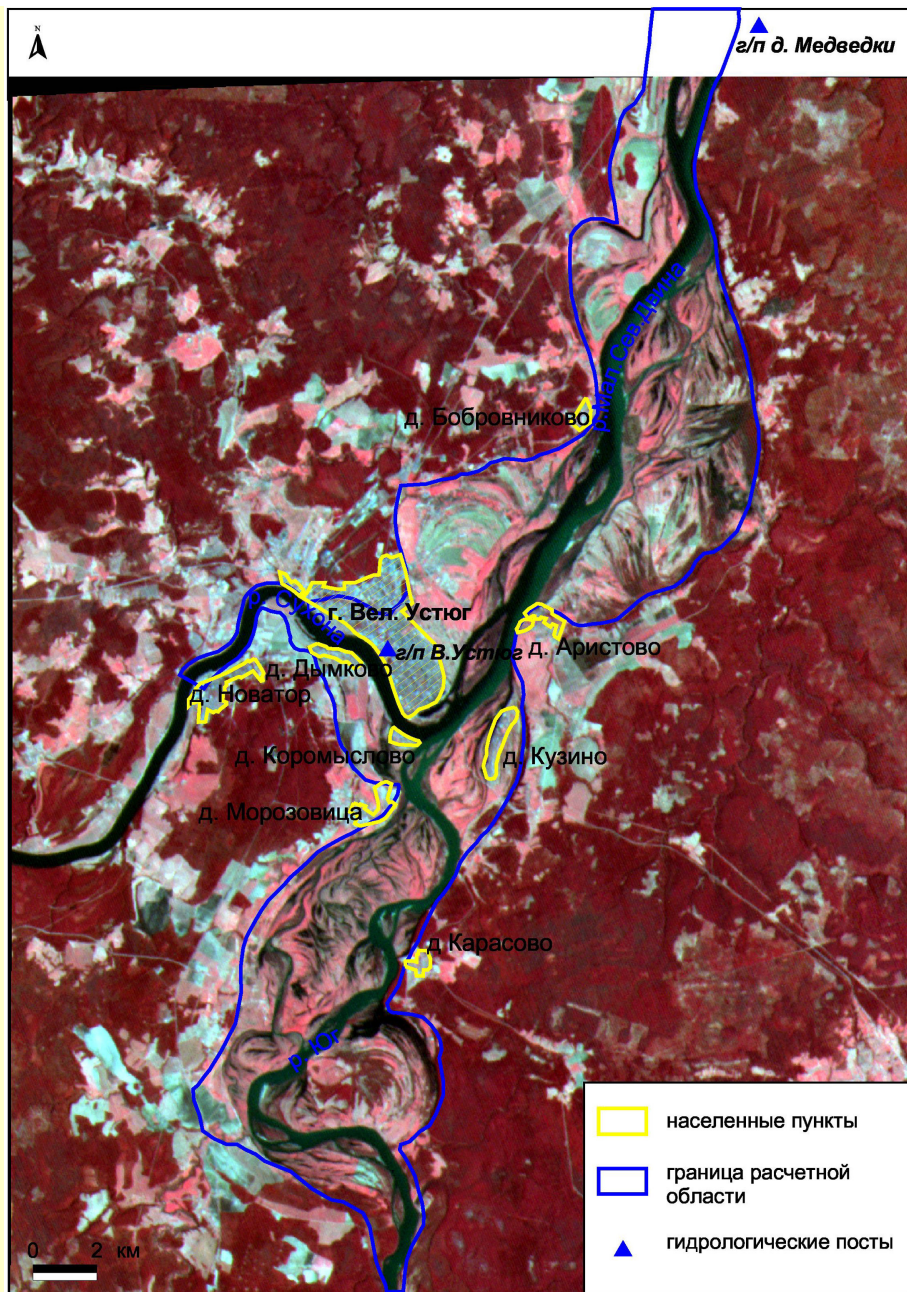


Наводнение 1998 г.

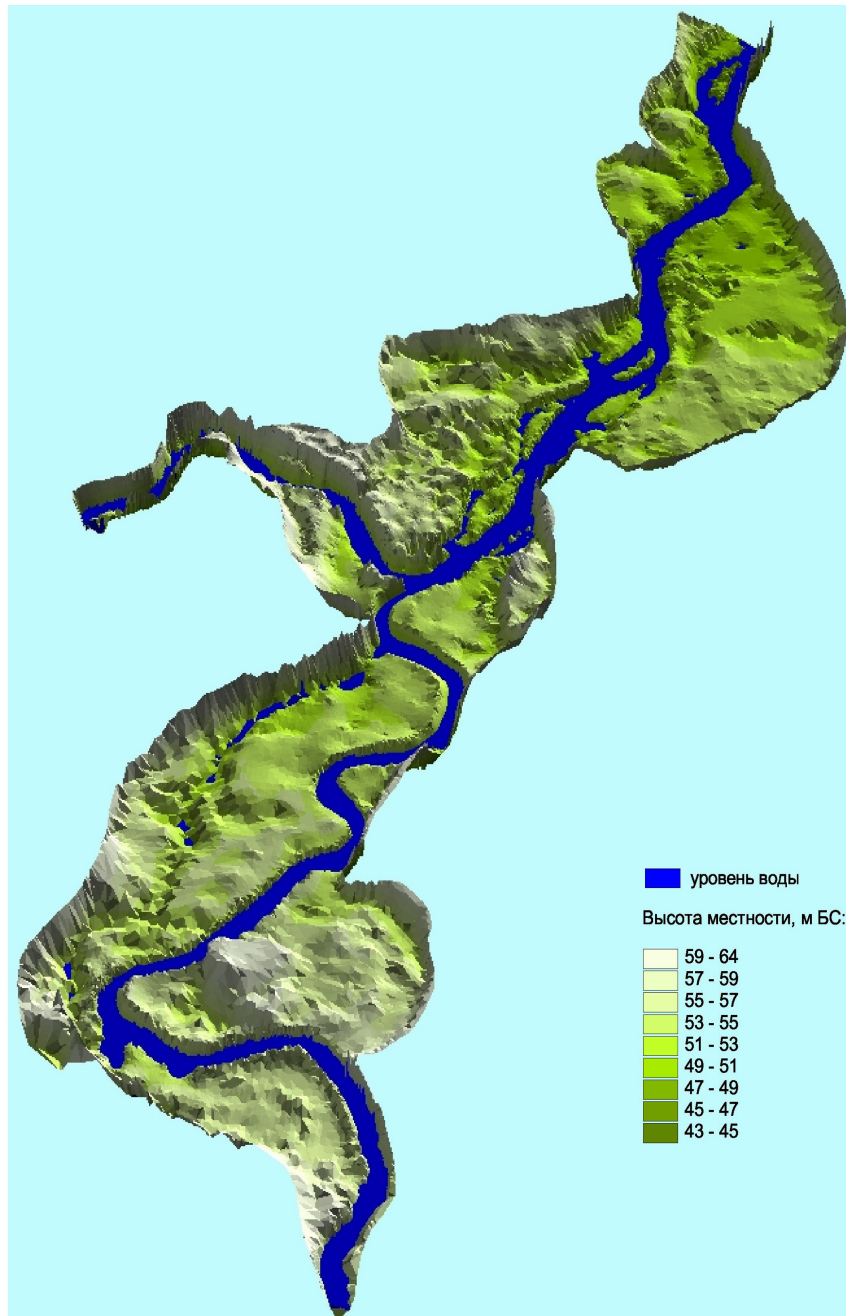
Исходные данные для моделирования:

- **данные о рельефе местности (топографические карты масштаба 1:25000, планы города масштаба 1:10000)**
- **результаты промеров глубин (*получены при экспедиционных изысканиях кафедры гидрологии суши*)**
- **расходы воды по г/п р. Юг - Гаврино, р. Сухона - Каликино (*на входных границах расчетной области*) за 1966-2005 гг.**
- **уровни воды Мал. Сев. Двины по г/п Медведки (на нижней границе расчетной области), г/п р. Сухона - Вел. Устюг (контрольный створ) за 1966-2005 гг.**

Общая протяженность участка моделирования 60 км



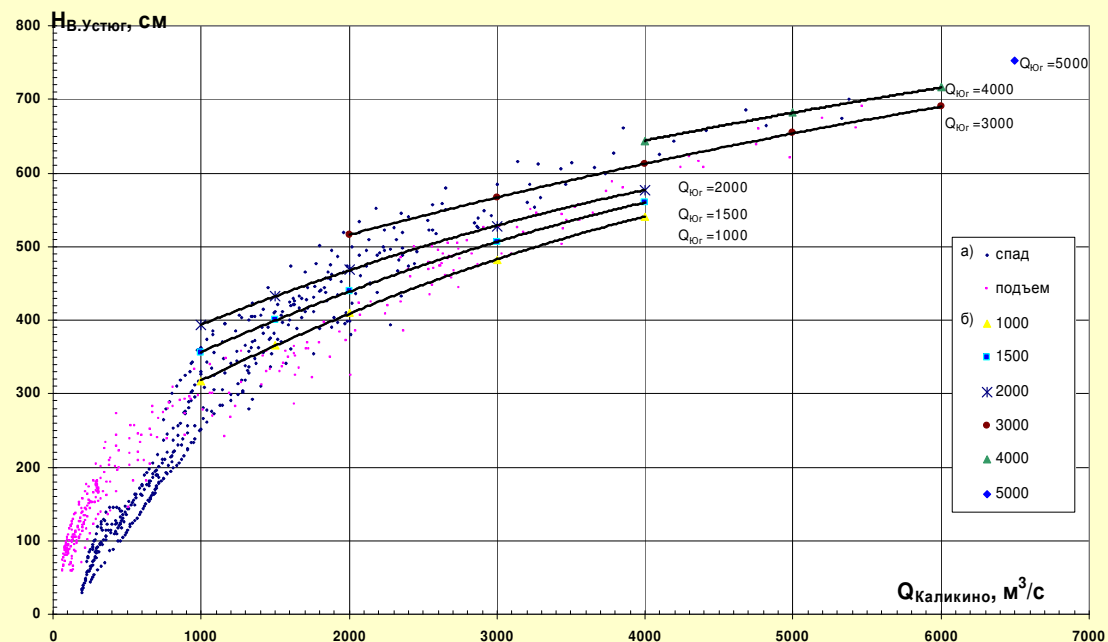
Границы расчетной области



Цифровая модель рельефа ¹⁹

Верификация модели:

Уровни воды по г/п. Вел. Устюг		относительная ошибка, %
измеренные (Нф)	рассчитанные по модели (Нр)	
267	270	1.1
308	317	2.9
350	356	1.7
386	393	1.8
316	328	3.8
360	366	1.7
398	400	0.5
436	433	0.7
370	381	3.0
418	409	2.2
434	439	1.2
472	468	0.8
536	516	3.7
489	482	1.4
528	528	0.0
578	567	1.9
588	577	1.9
614	612	0.3
664	644	3.0
648	654	0.9
682	682	0.0



Зависимость $Q_{\text{Сухона-Каликино}} = f(H_{\text{В.Устюг}})$:
 а) ряды наблюдений; б) рассчитанные по модели при различных сочетаниях расходов рек Сухоны и Юга

максимальные уровни
воды и зон затопления при
отсутствии заторов
(преимущественно
стоковая составляющая
уровней H_Q)

на основе двумерной модели "River"

Пик половодья

Рассчитанная по модели граница
затопления, совмещенная с
космическим снимком. 11.05.98 (а),

глубины, полученные на основе
моделирования (б)

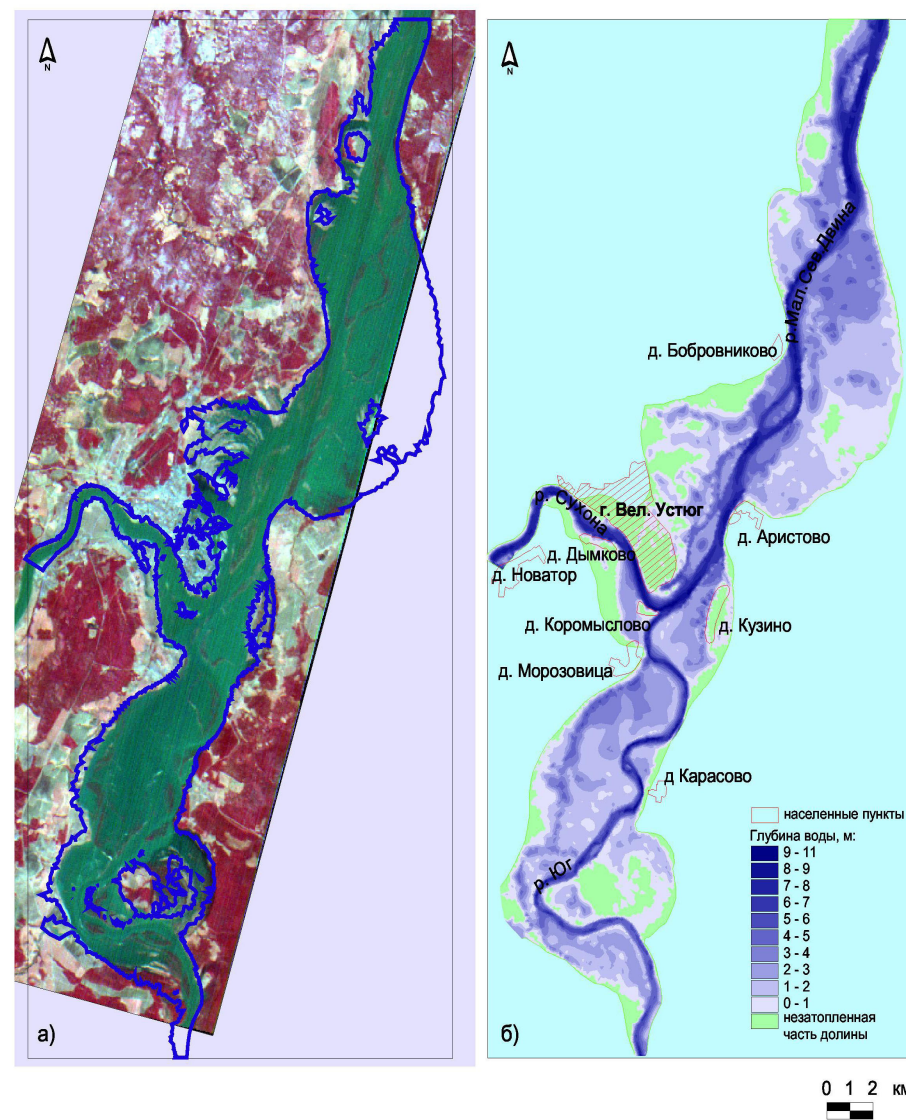


Рис. 3.6 Затопление пойм в районе г. Великий Устюг в период весеннего половодья:

а) космический снимок 11.05.98.

Спутник Ресурс-01, съемочная система МСУ-Э. Синтез RGB 3:2:1

б) рассчитанная по гидрологической модели граница затопления,
совмещенная с космическим снимком

б) глубины воды, полученные на основе гидрологического моделирования

Уровень по г/п г.Вел.Устюг - 654 см, расход р. Сухоны - 4210 м³/с, р. Юг - 2780 м³/с

Расчетные сценарии:

различные сочетания расходов рек р. Сухона (от 1000 до 6500 м³/с (Q_{1%})) и Юга (от 1000 до 5000 м³/с (Q_{1%}))

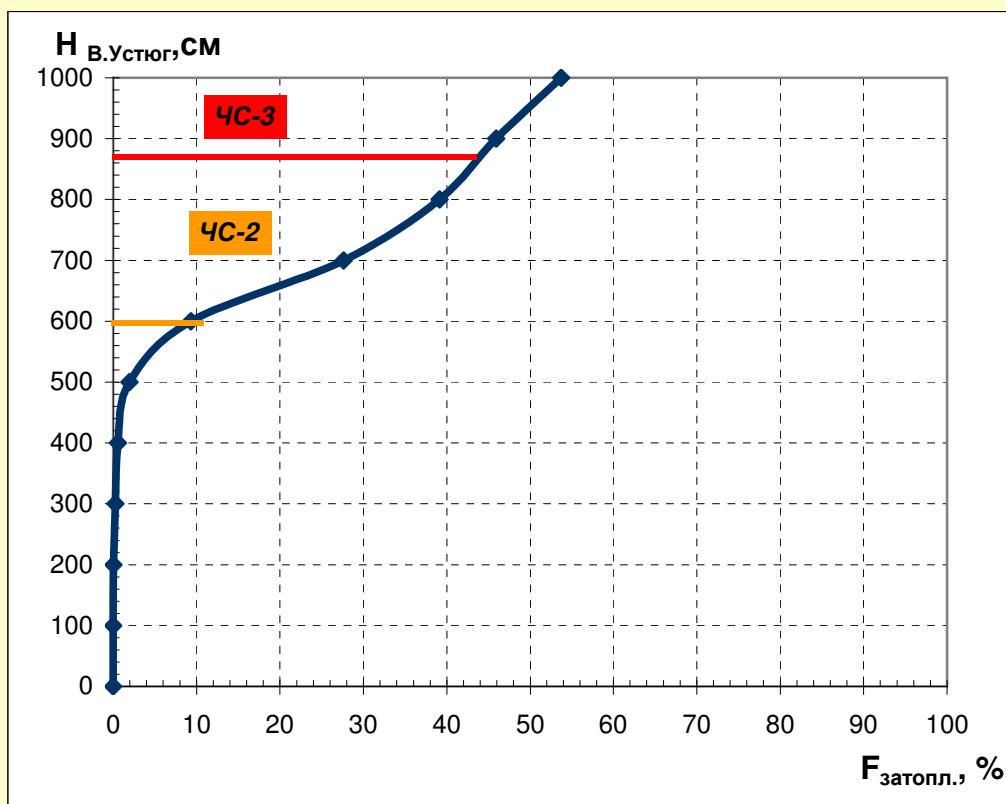
Расчитанные по модели уровни по г/п В. Устюг (в см над "0" графика поста)

расход р.Юг, м ³ /с	расход р. Сухона, м ³ /с							
	1000	1500	2000	3000	4000	5000	6000	6500
1000	317	366	409	482	541			
1500	356	400	439	506	560			
2000	393	433	468	528	577			
3000			516	567	612	654	690	
4000					644	682	716	
5000								753

Вклад стоковой составляющей уровней воды может превышать 7м, в этом случае возможно затопление до 1/3 территории города.

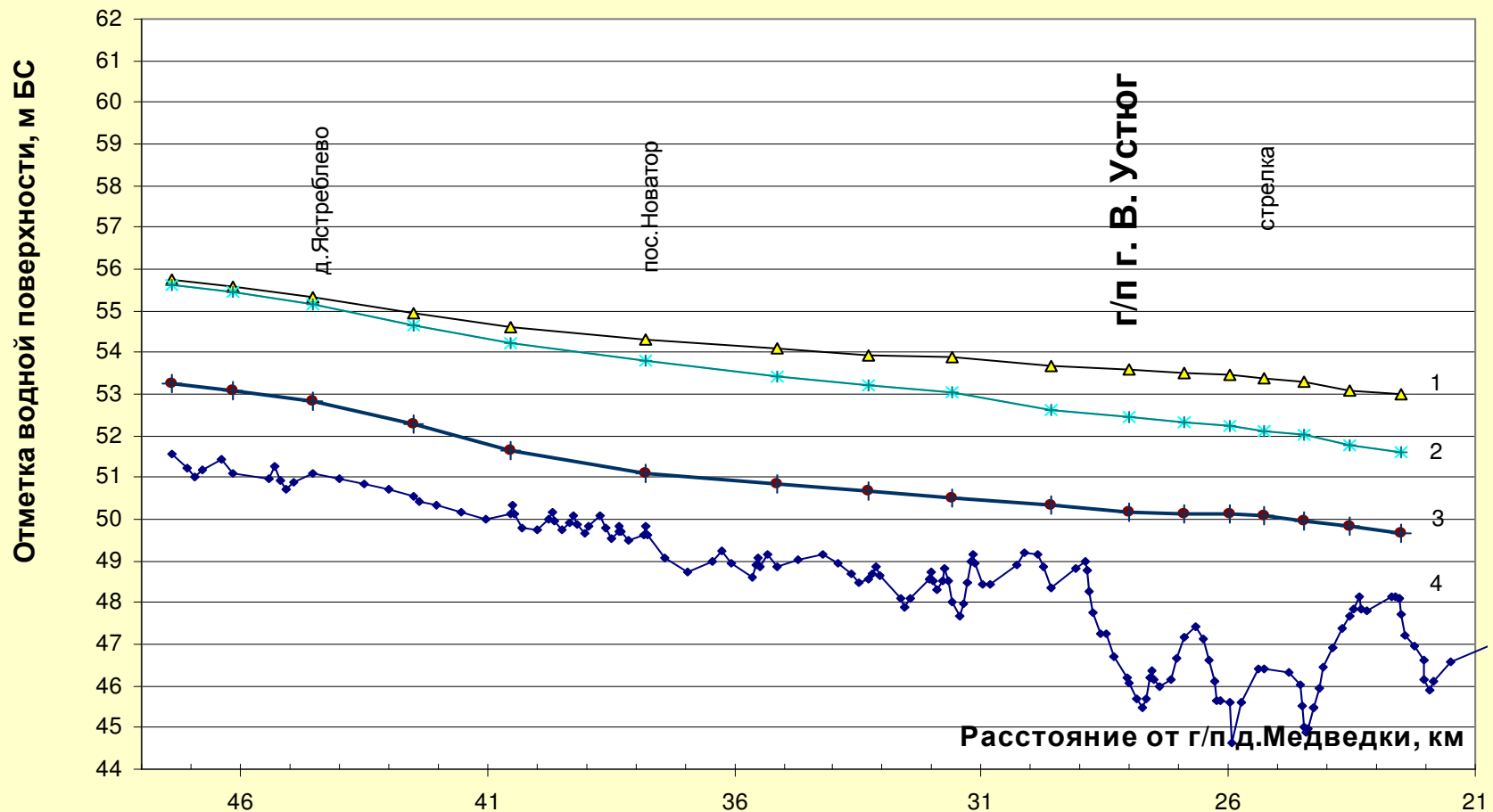


Глубины (а), отметки водной поверхности (б) и скорости течения (в) при прохождении по рекам Сухоне и Югу максимальных расходов 1% обеспеченности



Площадь затопления городских территорий в зависимости от уровня воды по г/п В. Устюг. Общая площадь городской застройки 9 км²

2) Исследование вклада подпорной составляющей ΔH_n уровней воды



Кривые свободной поверхности рр. Мал. Сев. Двины и Сухоны:

1- при подпоре р. Сухоны р. Юг (расход воды Сухоны $1160 \text{ м}^3/\text{с}$, Юга $-2050 \text{ м}^3/\text{с}$);

2- при отсутствии подпора (расход воды Сухоны $1160 \text{ м}^3/\text{с}$, Юга $-800 \text{ м}^3/\text{с}$);

3- меженный урез; 4 - дно.

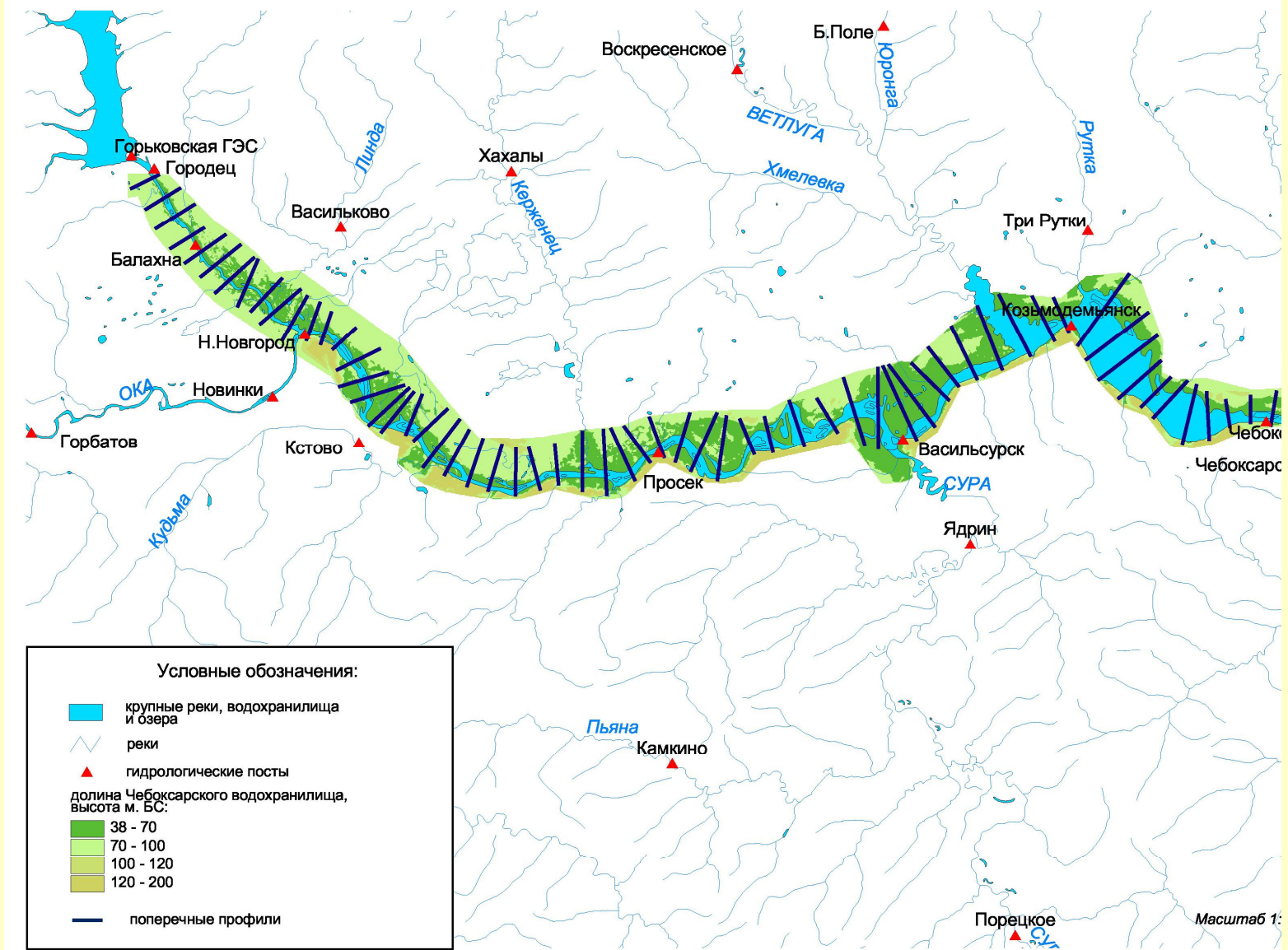
Вклад подпорного повышения ΔH_n (%) в уровень у г. Великий Устюг при различных сочетаниях расходов рек Сухоны и Юга

расход р.Юг, м ³ /с	расход р. Сухона, м ³ /с				
	1000	1500	2000	3000	4000
1000	0	0	0	0	0
1500	11	9	7	5	3
2000	19	15	13	9	6
3000			21	15	12
4000					16
	подпор р. Юг рекой Сухоней				
	подпор р. Сухоны рекой Юг				

- а) подпорное повышение уровней на участке р. Сухоны непосредственно выше слияния может достигать 1.2 м (до 30 % от общего подъема)
- б) не совпадает по времени с максимумом уровней стоково-заторного генезиса;
- в) распространяется вверх по течению р. Сухоны на расстояние 21 км от устья

Исследование уровня режима р.Волги и зон затопления на участке Чебоксарского водохранилища в период весеннего половодья

Расчеты выполнены на основе программного комплекса "MIKE 11" Датского гидравлического института



Общая протяженность участка моделирования 300 км

Исходные данные для моделирования:

- **цифровая модель рельефа долины водохранилищ**

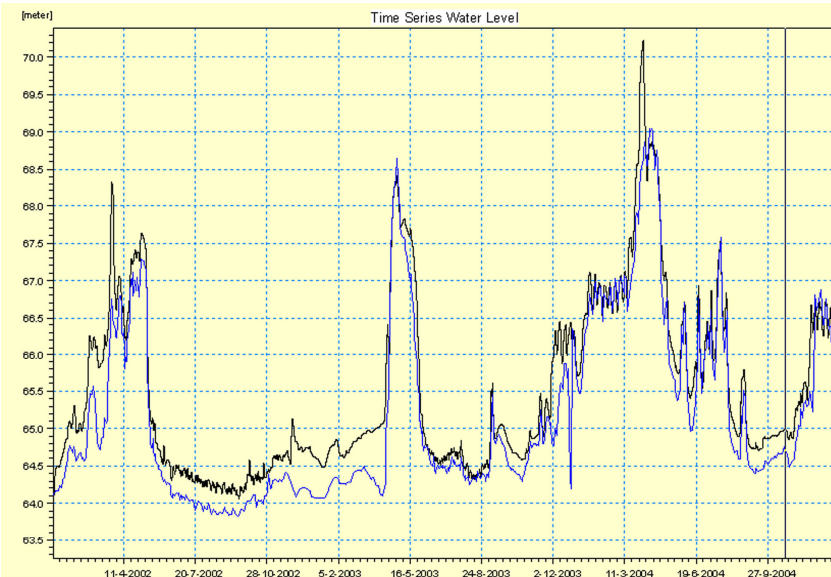
ежедневные данные:

- **сбросы воды Горьковской ГЭС (*верхняя граница*)**
- **уровни в верхнем бьефе Чебоксарской ГЭС (*нижняя граница*)**
- **расходы воды крупных притоков рек Оки, Суры, Ветлуги**
- **боковой приток**
- **уровни воды по г/п Н.Новгород, Просек, Балахна, Васильсурск (*контрольные створы*)**

Общая протяженность участка 300 км

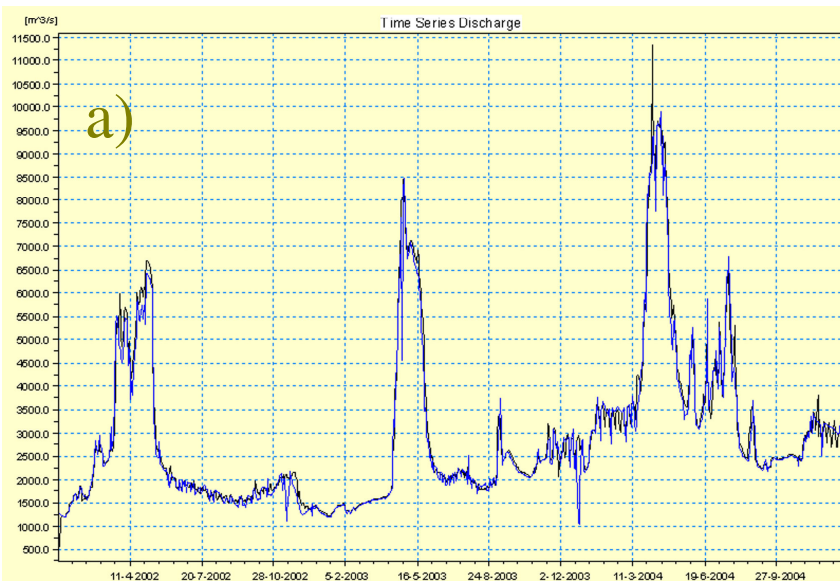
Чебоксарское водохранилище. Результаты расчетов по одномерной модели:

1) временной ход уровней (а) и расходов воды (б) по длине водохранилищ за 2002-2005 гг по г/п Н.Новгород;
продольные профили водной поверхности за различные моменты времени (в)

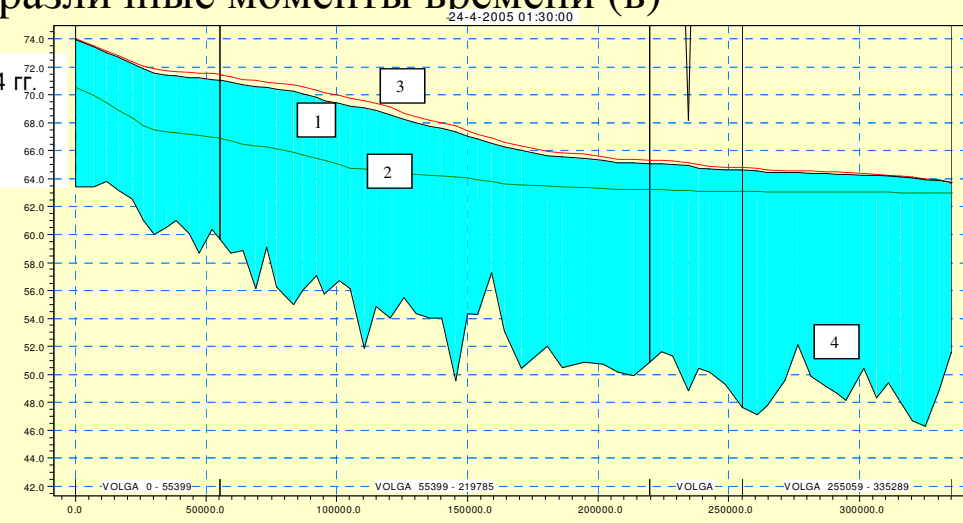


Уровни воды р. Волги по г/п. Н.Новгород (Чебоксарское вдхр.) за 2002 – 2004 гг.

— фактические по данным Роскомгидромета,
— рассчитанные по гидродинамической модели



а)



Продольный профиль Чебоксарского водохранилища. Рассчитанные по модели уровни водной поверхности: 1 - на 24.04.2005, 2 - максимальный, 3 – минимальный, 4 - продольный профиль дна

в)

Расходы воды р. Волги по г/п. Н.Новгород (Чебоксарское вдхр.) за 2002 – 2004 гг.

— фактические по данным Роскомгидромета,
— рассчитанные по гидродинамической модели

б)

карты затопления для случая увеличения НПУ Чебоксарского вдхр. до 68 м при прохождении половодья 1% обеспеченности

