

«Волгоградский государственный университет»

**Гидродинамическое моделирование
катастрофических затоплений Волго-
Ахтубинской поймы с использованием
технологии CUDA.**

**Докладчик: Дьяконова Татьяна Андреевна
Соавторы: Храпов С.С., Агафонникова Е.О.**

**Россия, Переславль-Залесский, ИПС имени А.К. Айламазяна РАН
24-27 ноября 2015 года**

Прямое гидродинамическое моделирование затопления территорий

Основные решаемые задачи:

- 1) Определение и уточнение площади водосбора.
- 2) Исследование характерных особенностей водостока.
- 3) Моделирование динамики затопления территорий с учетом различных физических факторов.
- 4) Имитационное моделирование катастрофических паводков и аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях (прорыв плотин).
- 5) Прогноз последствий затопления территорий и поиск оптимальных решений минимизации ущерба при наводнениях.

Прямое гидродинамическое моделирование затопления территорий

Основные факторы, влияющие на динамику

- 1) Поверхностные и подземные источники воды – плотины, осадки, ключи, гейзеры, выход грунтовых вод на поверхность суши.
- 2) Рельеф местности с учетом антропогенной застройки территорий и рельефа дна водоемов.
- 3) Свойства подстилающей поверхности – придонное трение, инфильтрация (впитывание воды в грунт).
- 4) Внутреннее вязкое трение.
- 5) Ветровое воздействие – нагонные волны.
- 6) Вращение Земли – сила Кориолиса.
- 7) Испарение.

Данные факторы могут быть эффективно учтены в модели мелкой воды, получаемой из уравнений гидродинамики посредством усреднения по вертикальной координате (уравнения Сен-Венана).

Модель динамики поверхностных вод

Основные уравнения (Сен-Венана)

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(Hu_x)}{\partial x} + \frac{\partial(Hu_y)}{\partial y} = q,$$

Функция источников/стоков

$$q = q^{(s)} - q^{(inf)} - q^{(ev)}$$

↑
Приток
за счет
источников

↑
Инфильтрация

↑
Испарение

$$\frac{\partial(H\mathbf{u})}{\partial t} + \nabla(H\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -gH\nabla\eta + H\mathbf{f},$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}^{frict} + \mathbf{f}^{Cor} + \mathbf{f}^{wind} + \mathbf{f}^{visc},$$

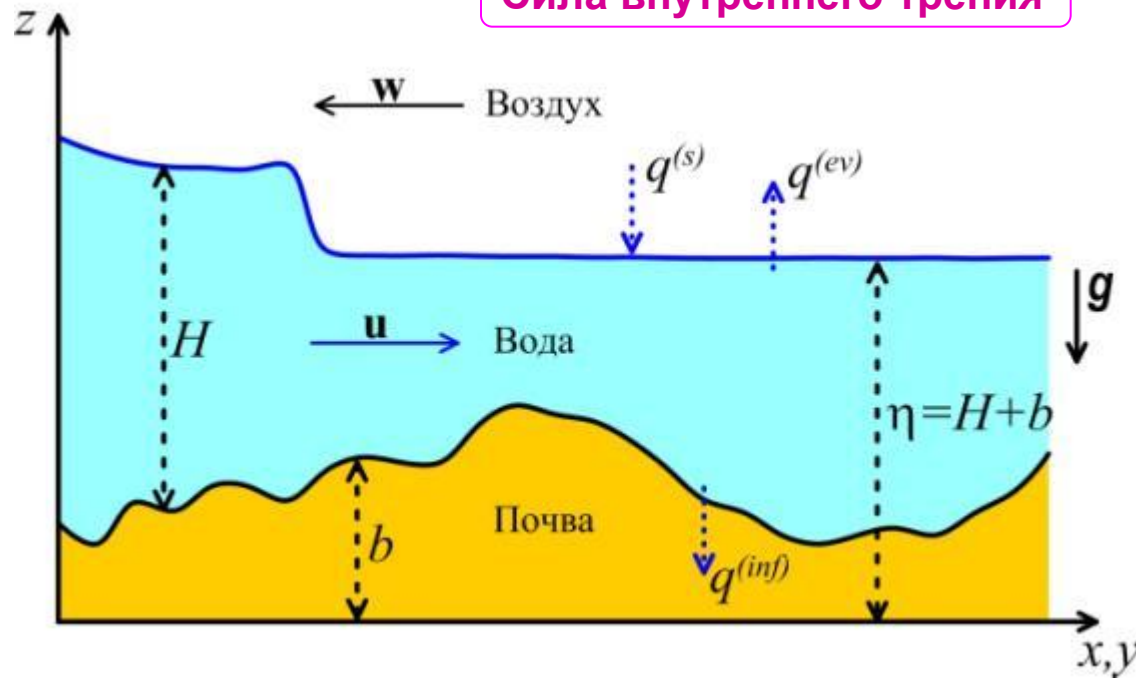
Сила внутреннего трения

**Придонное
трение**

**Влияние
ветра**

**Сила
Кориолиса**

$$f_x^{Cor} = -2\Omega \sin(\Theta) u_y$$
$$f_y^{Cor} = 2\Omega \sin(\Theta) u_x$$



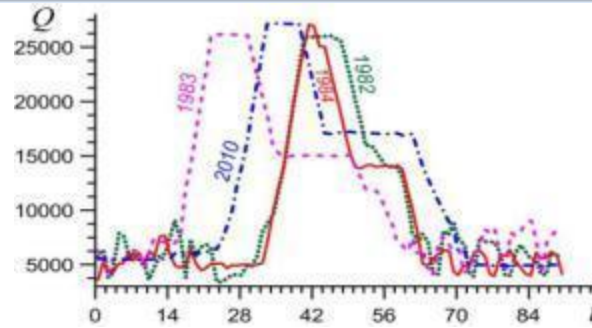
Модель динамики поверхностных вод

Источники и стоки воды

Источники: $q^{(s)} = q^{(s)}(x, y, t)$ – скорость притока воды (м/с)

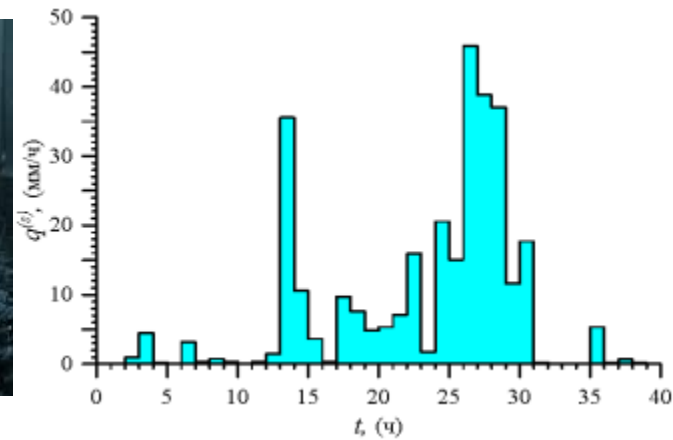
$Q^{(s)}(t) = \iint_{S_k} q^{(s)}(x, y, t) dx dy$ – суммарный расход источника (куб. м/с),
где S_k – площадь источника

В случае регулируемого стока через плотины задается величина суммарного расхода (гидрограф), а скорость притока воды определяется по формуле



$$q^{(s)}(t) = Q^{(s)}(t) / S_k$$

Когда источником воды являются осадки, то скорость притока воды определяется интенсивностью осадков на заданной территории.



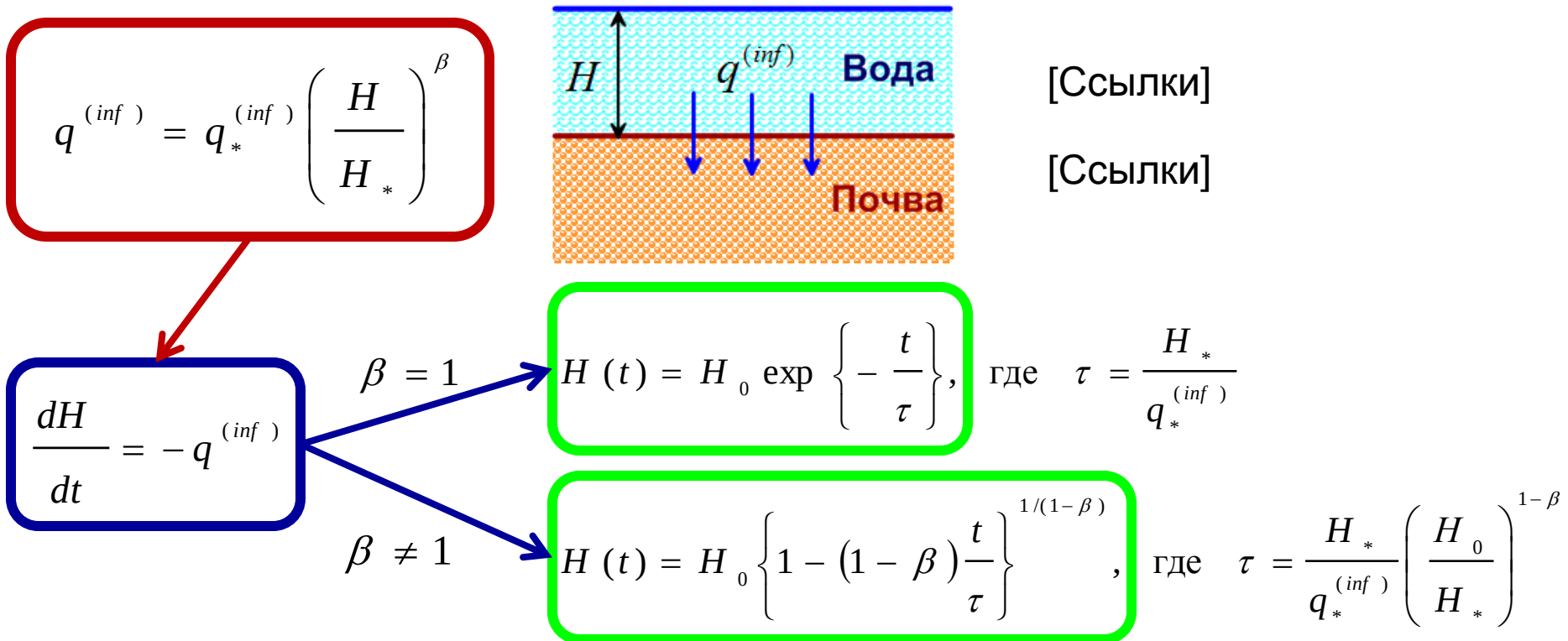
Модель динамики поверхностных вод

Источники и стоки воды

Стоки: $q^{(inf)}$ и $q^{(ev)}$ – скорость оттока воды (м/с),
инфильтрация и испарение

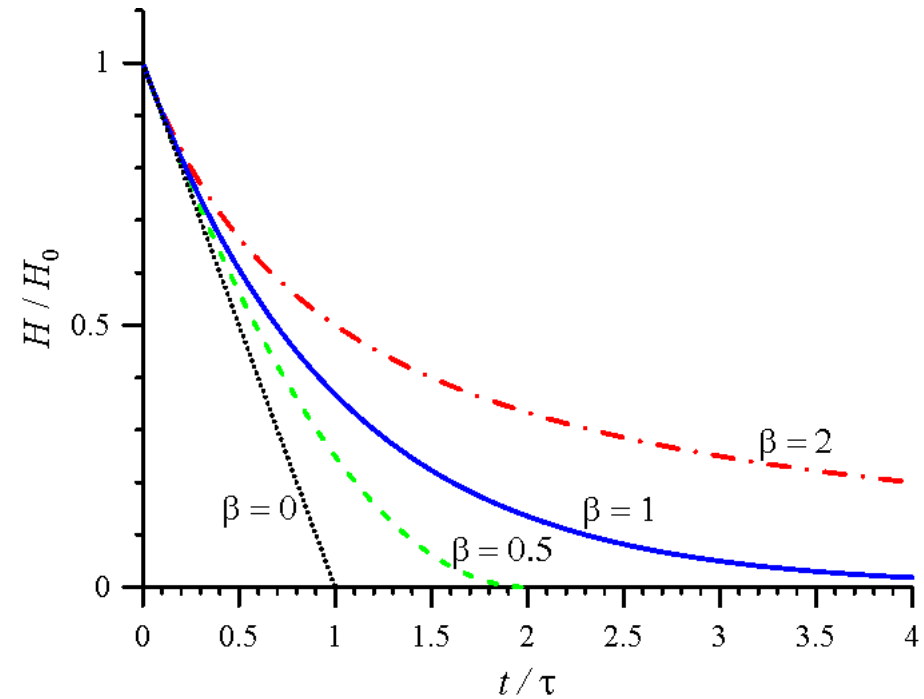
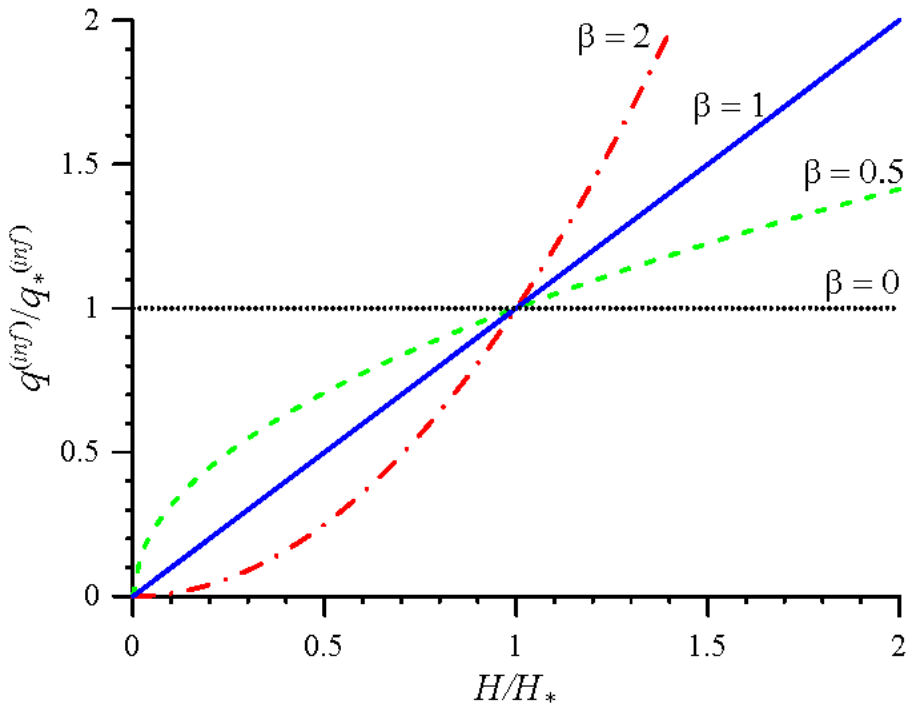
Модели инфильтрации (впитывания воды в почву)

1. Однослойные степенные модели, зависящие только от глубины воды H



Модель динамики поверхностных вод

Источники и стоки воды



для $\beta < 1 \Rightarrow H(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \tau/(1 - \beta)$

для $\beta \geq 1 \Rightarrow H(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$

Модель динамики поверхностных вод

Источники и стоки воды

2. Многослойные модели инфильтрации

$$q^{(inf)} = q_*^{(inf)} (1 - \alpha_A)^\gamma \left(\frac{H}{H_*} \right)^\beta$$

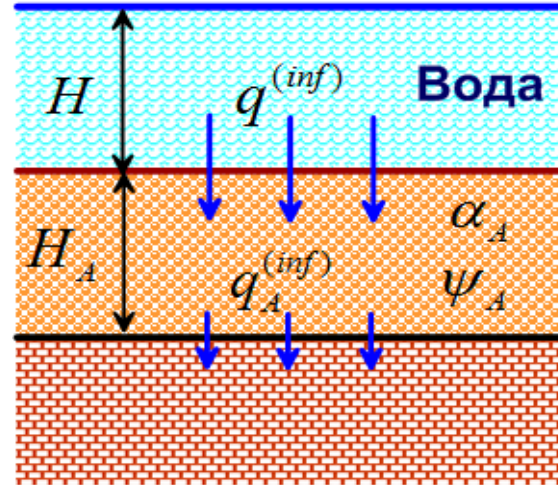
$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{q^{(inf)} - q_A^{(inf)}}{\psi_A H_A}$$

при $\gamma = 1$

и $H = H_* = \text{const}$

$$q^{(inf)}(t) = q_A^{(inf)} + (q_*^{(inf)} - q_A^{(inf)}) \exp \left\{ -\frac{t}{\tau} \right\},$$

где $\tau = \frac{\psi_A H_A}{q_*^{(inf)}}$, $q_A^{(inf)} \ll q_*^{(inf)}$

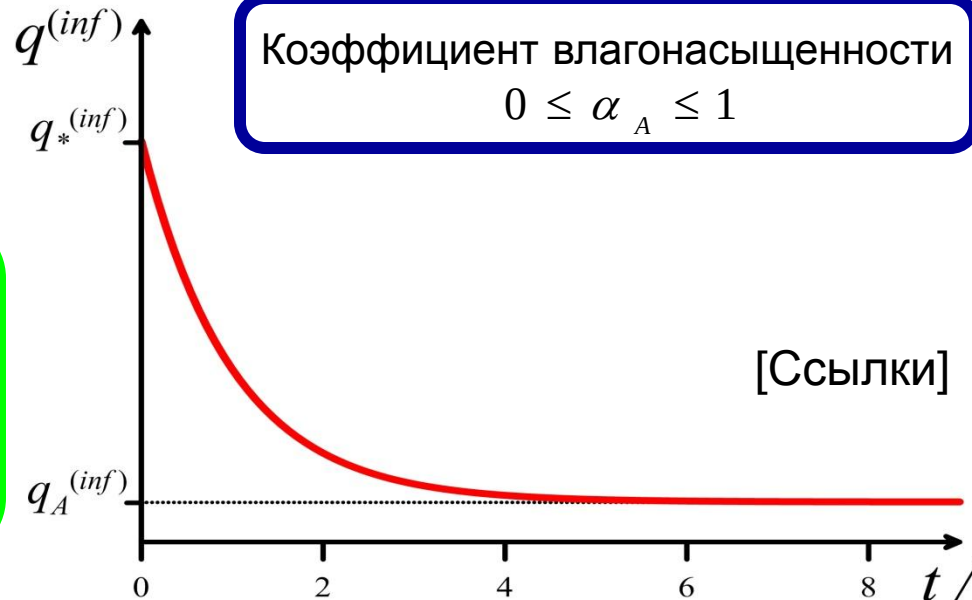


Пористость среды

$$0 \leq \psi_A \leq 1$$

Коэффициент влагонасыщенности

$$0 \leq \alpha_A \leq 1$$



[Ссылки]

Модель динамики поверхностных вод

Основные силы

Сила гидравлического трения между жидкостью и дном:

$$\mathbf{f}^{frict} = -\frac{\lambda}{2} \mathbf{u} \cdot |\mathbf{u}|$$

$$\lambda = 2 g n_M^2 / H^{4/3}$$

Кoeffициент
гидравлического
сопротивления

$$n_M = n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6$$

Шероховатость по
Маннингу

$$n_M \sim 0.02 \div 0.1$$

[Ссылка]

[Gioia, Bombardelli, 2002]

Здесь учитывается гидравлическое сопротивление:

- прямого равномерного русла;
- нерегулярной структуры дна;
- извилистости русла;
- различных препятствий;
- растительности;
- турбулентности;
- иных физических факторов.

Модель динамики поверхностных вод

Основные силы

Сила внутреннего вязкого трения:

$\hat{\mathbf{T}}$ - тензор вязких напряжений в модели мелкой воды

$$\mathbf{f}^{visc} = \frac{1}{H} \nabla \hat{\mathbf{T}}$$

$$T_{xx} = 2\nu_t H \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad T_{yy} = 2\nu_t H \frac{\partial u_y}{\partial y},$$

$$T_{xy} = \nu_t H \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)$$

$$\nu_t = Ch^2 \sqrt{\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2}$$

коэффициент
турбулентной вязкости

$C \approx 0.04$ – эмпирическая постоянная

h^2 – площадь расчетной ячейки

[Ссылки]

Модель динамики поверхностных вод

Основные силы

Влияние ветра:

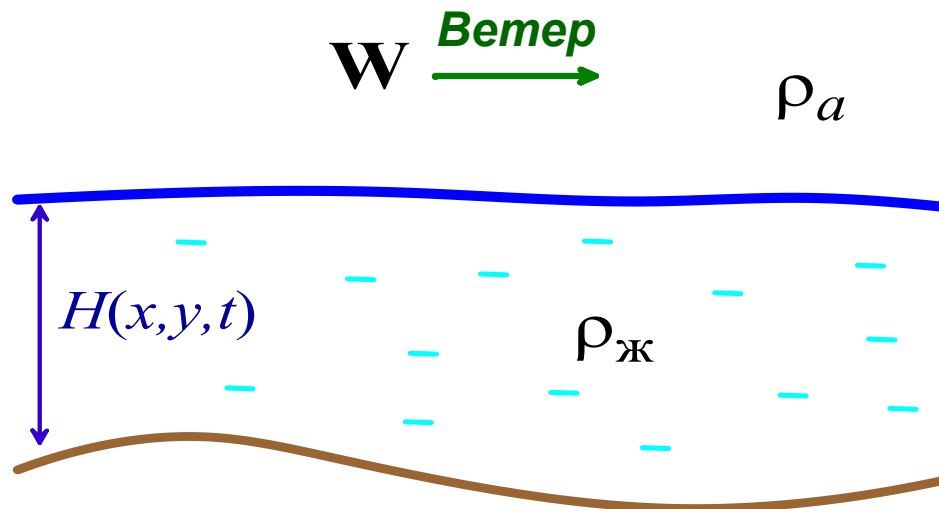
Аэродинамическое сопротивление
водной поверхности

$$\mathbf{f}^{wind} = \frac{C_a \rho_a}{H \rho_w} (\mathbf{w} - \mathbf{u}) \cdot |\mathbf{w} - \mathbf{u}|$$

Состояние водной поверхности

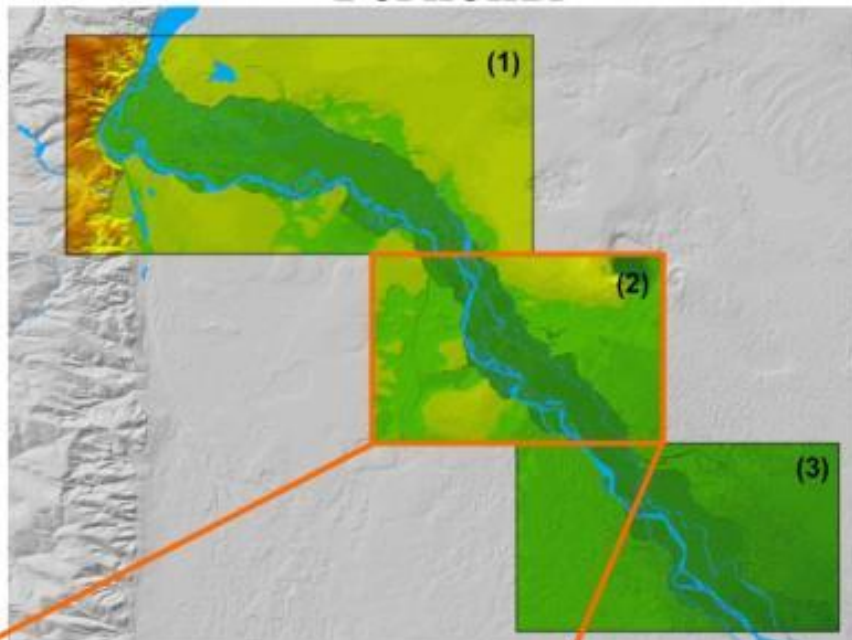
$$C_a \approx (0.5 + 0.1 |\mathbf{w}|) \cdot 10^{-3}$$

[Судольский, 1991]

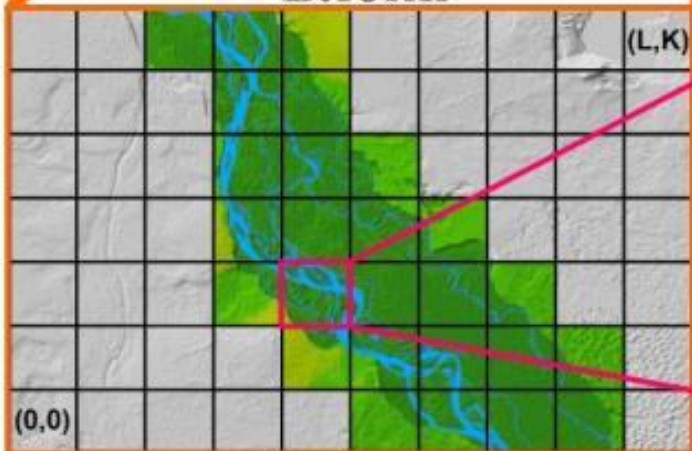


Компьютерное моделирование

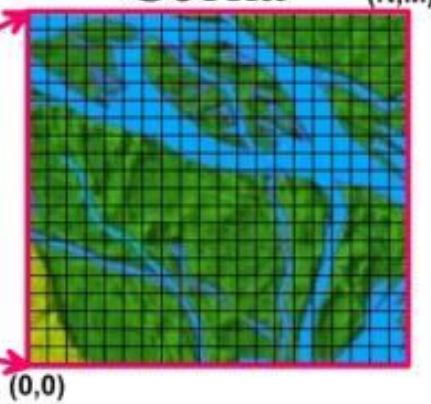
Регионы



Блоки



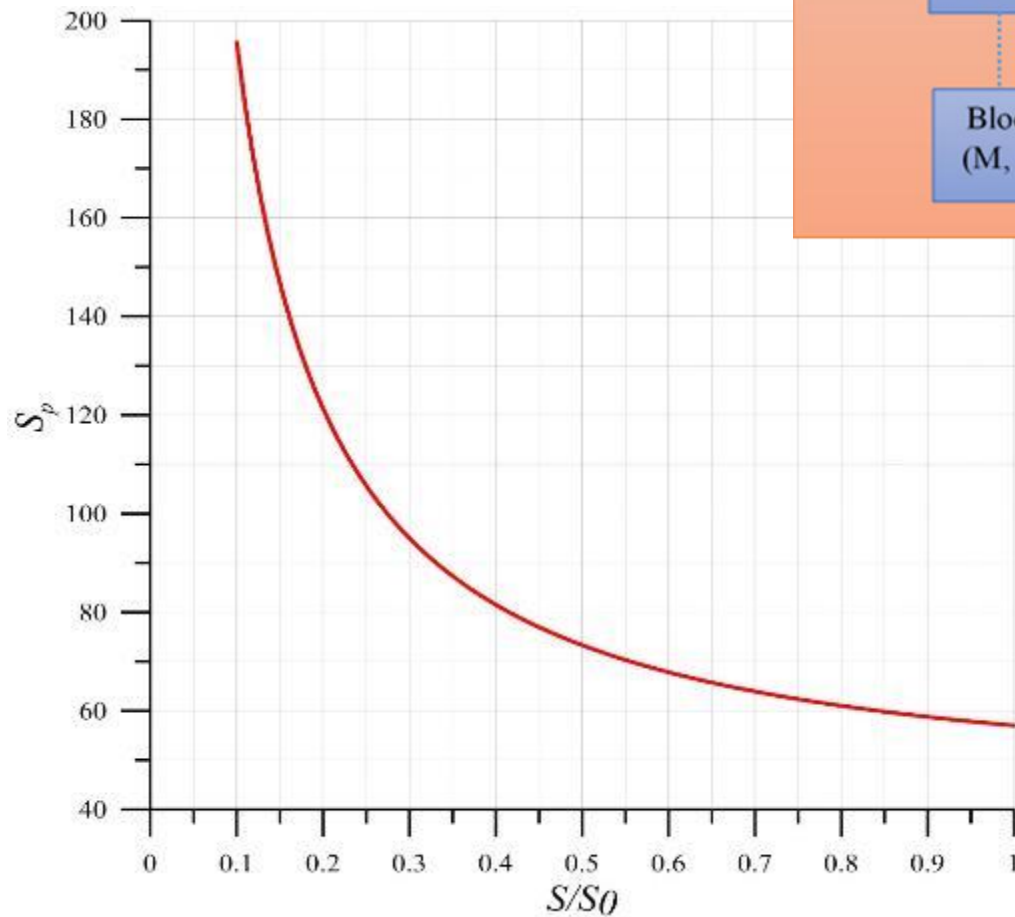
Сетка



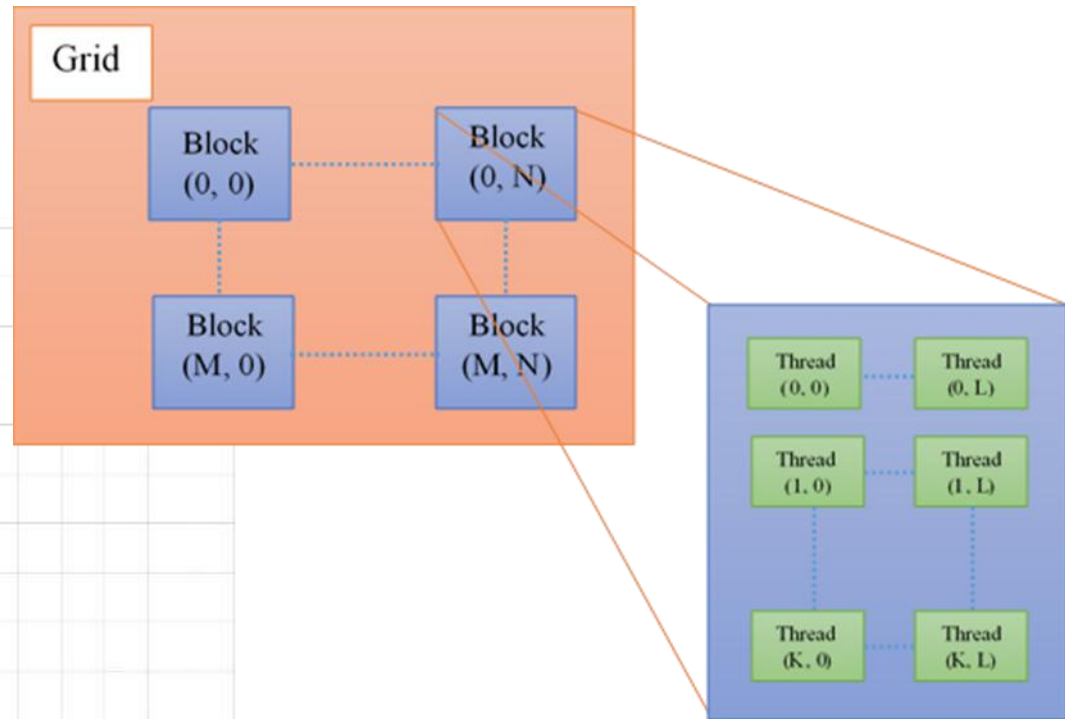
Новый эффективный численный алгоритм расчета (сSPH-TVD метод), позволяющий моделировать динамику поверхностных вод на произвольном рельефе местности.

Иерархическая система пространственных сеток разных масштабов, позволяющая эффективно использовать вычислительные ресурсы и ускоряющая расчеты.

CUDA



Сравнение последовательной
программы с CUDA-версией



Иерархия нитей на GPU



Число нитей $N_{th} = N_x \times N_y$

...

...

...

...

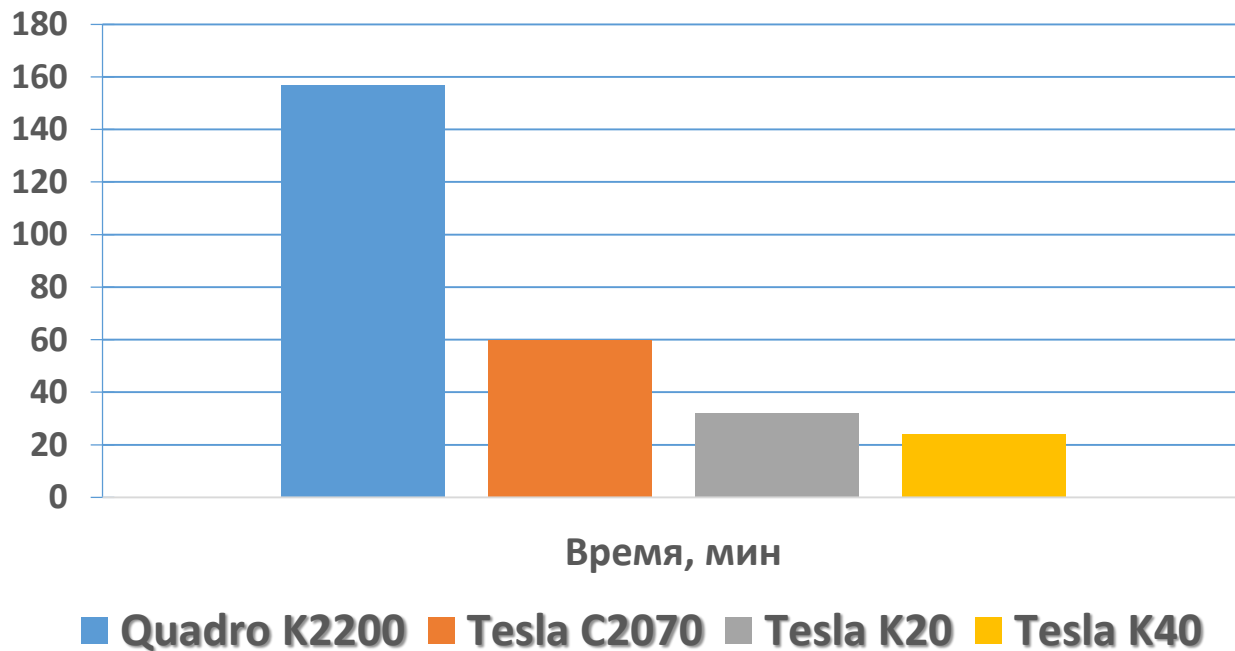
...

Сравнение графических процессоров

Загрузка GPU

Quadro K2200	Tesla C2070	Tesla K20	Tesla K40
96,7%	96,1%	93,1%	87,2%

Время работы программы



Сравнение графических процессоров

Выполнение функций на GPU Tesla C2070

	Function Name	Grid Dimensions	Block Dimensions	Start Time (μs)	Duration (μs)	Occupancy	Registers per Thread	Static Shared Memory per Block (bytes)
1	kernel_Index_block	{156, 134, 1}	{8, 8, 1}	775,411.890	957.344	33.33 %	28	512
2	kernel_Surface	{70, 1, 1}	{128, 1, 1}	1,105,588.946	75.616	66.67 %	13	512
3	kernel_forces_predictor	{156, 134, 1}	{8, 8, 1}	1,582,490.450	1,132.832	33.33 %	47	2112
4	kernel_dt	{70, 1, 1}	{128, 1, 1}	2,027,227.634	79.328	66.67 %	16	1024
5	kernel_SPH_predictor	{156, 134, 1}	{8, 8, 1}	2,487,112.690	597.920	33.33 %	31	0
6	kernel_forces_corrector	{156, 134, 1}	{8, 8, 1}	2,992,570.514	2,052.960	33.33 %	63	3200
7	kernel_SPH_corrector	{156, 134, 1}	{8, 8, 1}	3,457,780.434	632.160	33.33 %	34	0
8	kernel_TVD_flux	{156, 134, 1}	{8, 8, 1}	4,163,938.770	8,480.448	29.17 %	63	6912
9	kernel_Final	{156, 134, 1}	{8, 8, 1}	4,636,184.722	742.368	33.33 %	22	0

Сравнение графических процессоров

Выполнение функций на GPU Tesla K20

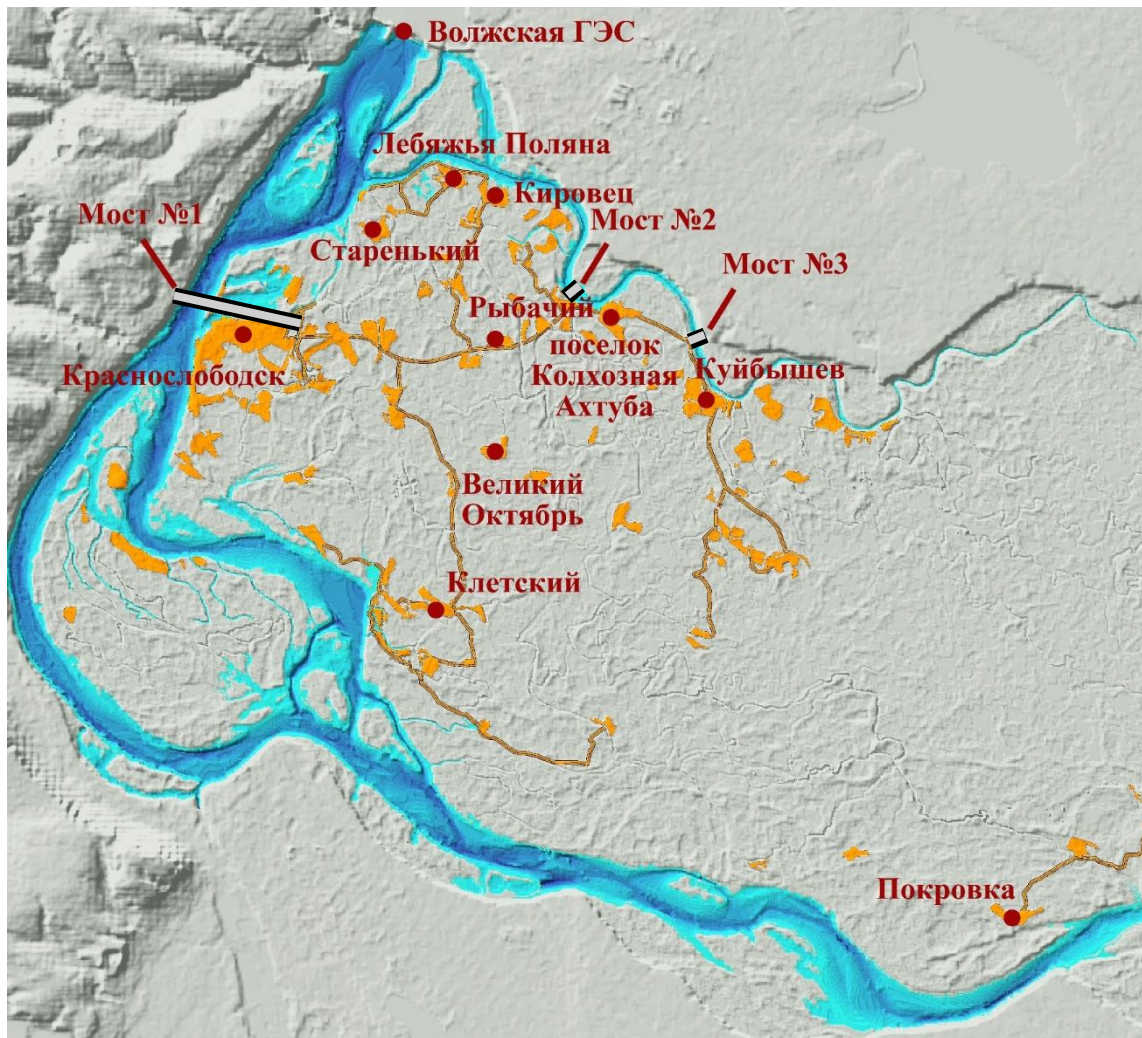
	Function Name	Grid Dimensions	Block Dimensions	Start Time (μs)	Duration (μs)	Occupancy	Registers per Thread	Static Shared Memory per Block (bytes)
1	kernel_Index_block	{156, 134, 1}	{8, 8, 1}	579,977.397	531.040	50.00 %	32	512
2	kernel_Surface	{70, 1, 1}	{128, 1, 1}	648,338.741	63.136	100.00 %	15	512
3	kernel_forces_predictor	{156, 134, 1}	{8, 8, 1}	723,276.053	611.168	50.00 %	45	2112
4	kernel_dt	{70, 1, 1}	{128, 1, 1}	793,847.413	62.752	100.00 %	18	1024
5	kernel_SPH_predictor	{156, 134, 1}	{8, 8, 1}	866,093.397	328.576	50.00 %	36	0
6	kernel_forces_corrector	{156, 134, 1}	{8, 8, 1}	948,091.317	1,274.304	43.75 %	61	3200
7	kernel_SPH_corrector	{156, 134, 1}	{8, 8, 1}	1,021,366.997	367.232	50.00 %	43	0
8	kernel_TVD_flux	{156, 134, 1}	{8, 8, 1}	1,142,339.701	5,172.288	21.88 %	63	6912
9	kernel_Final	{156, 134, 1}	{8, 8, 1}	1,220,299.893	407.520	50.00 %	27	0

Сравнение графических процессоров

Выполнение функций на GPU Tesla K40

	Function Name 	Grid Dimensions 	Block Dimensions 	Start Time (μs) 	Duration (μs) 	Occupancy 	Registers per Thread 	Static Shared Memory per Block (bytes) 
1	kernel_Index_block	{156, 134, 1}	{8, 8, 1}	967,273.479	427.872	50.00 %	34	512
2	kernel_Surface	{70, 1, 1}	{128, 1, 1}	1,032,156.359	51.456	100.00 %	15	512
3	kernel_forces_predictor	{156, 134, 1}	{8, 8, 1}	1,110,519.335	465.408	50.00 %	45	2112
4	kernel_dt	{70, 1, 1}	{128, 1, 1}	1,181,863.111	53.952	100.00 %	18	1024
5	kernel_SPH_predictor	{156, 134, 1}	{8, 8, 1}	1,257,068.519	243.648	50.00 %	36	0
6	kernel_forces_corrector	{156, 134, 1}	{8, 8, 1}	1,334,252.359	843.744	43.75 %	69	3200
7	kernel_SPH_corrector	{156, 134, 1}	{8, 8, 1}	1,409,206.919	272.192	50.00 %	43	0
8	kernel_TVD_flux	{156, 134, 1}	{8, 8, 1}	1,515,716.039	3,405.344	21.88 %	75	6912
9	kernel_Final	{156, 134, 1}	{8, 8, 1}	1,593,244.743	312.448	50.00 %	27	0

Моделирование динамики развития и последствий затопления Волго-Ахтубинской поймы

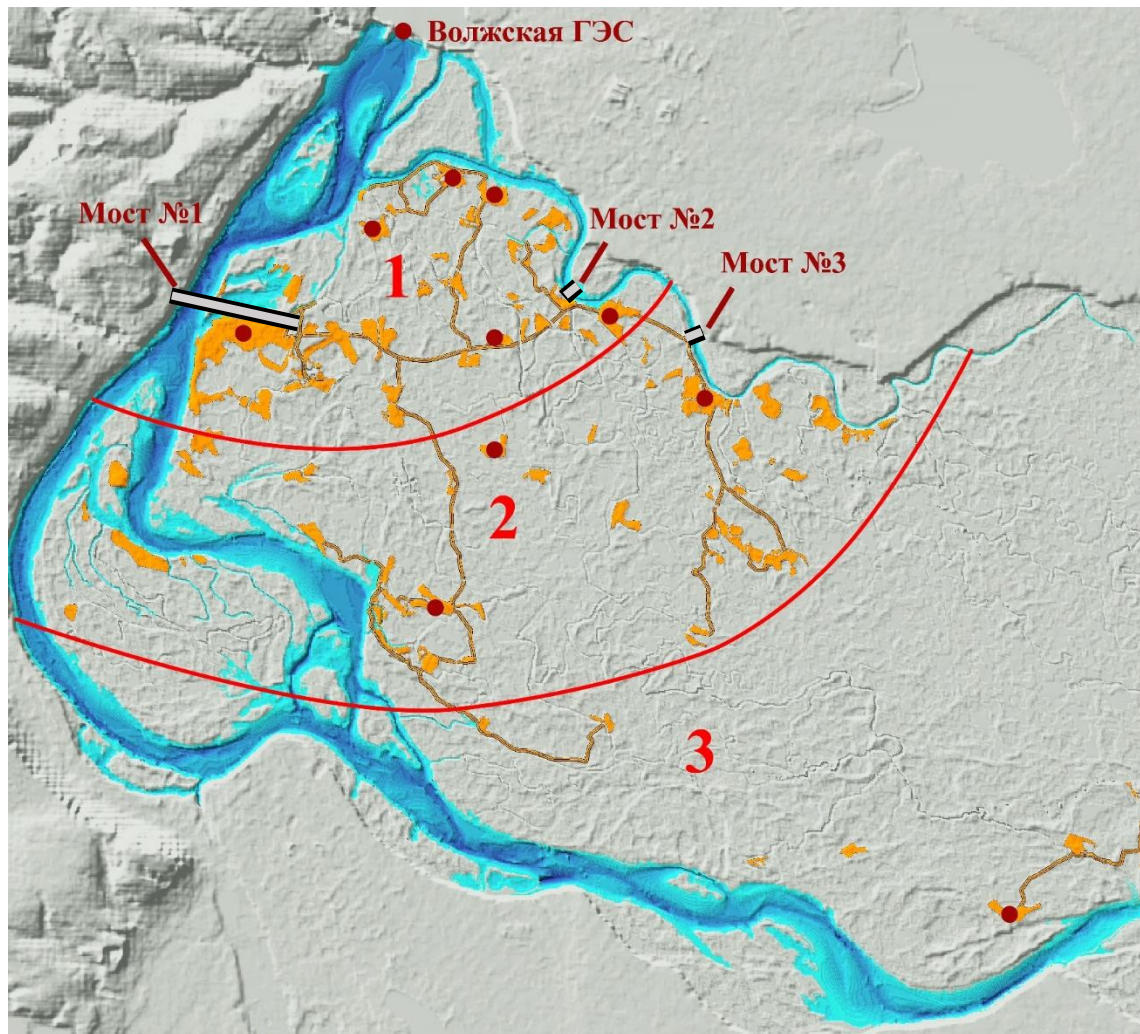


Северная часть ВАП
50 км × 50 км.

Стратегически важные объекты:

- плотина;
- населенные пункты;
- дорожная сеть и мосты.

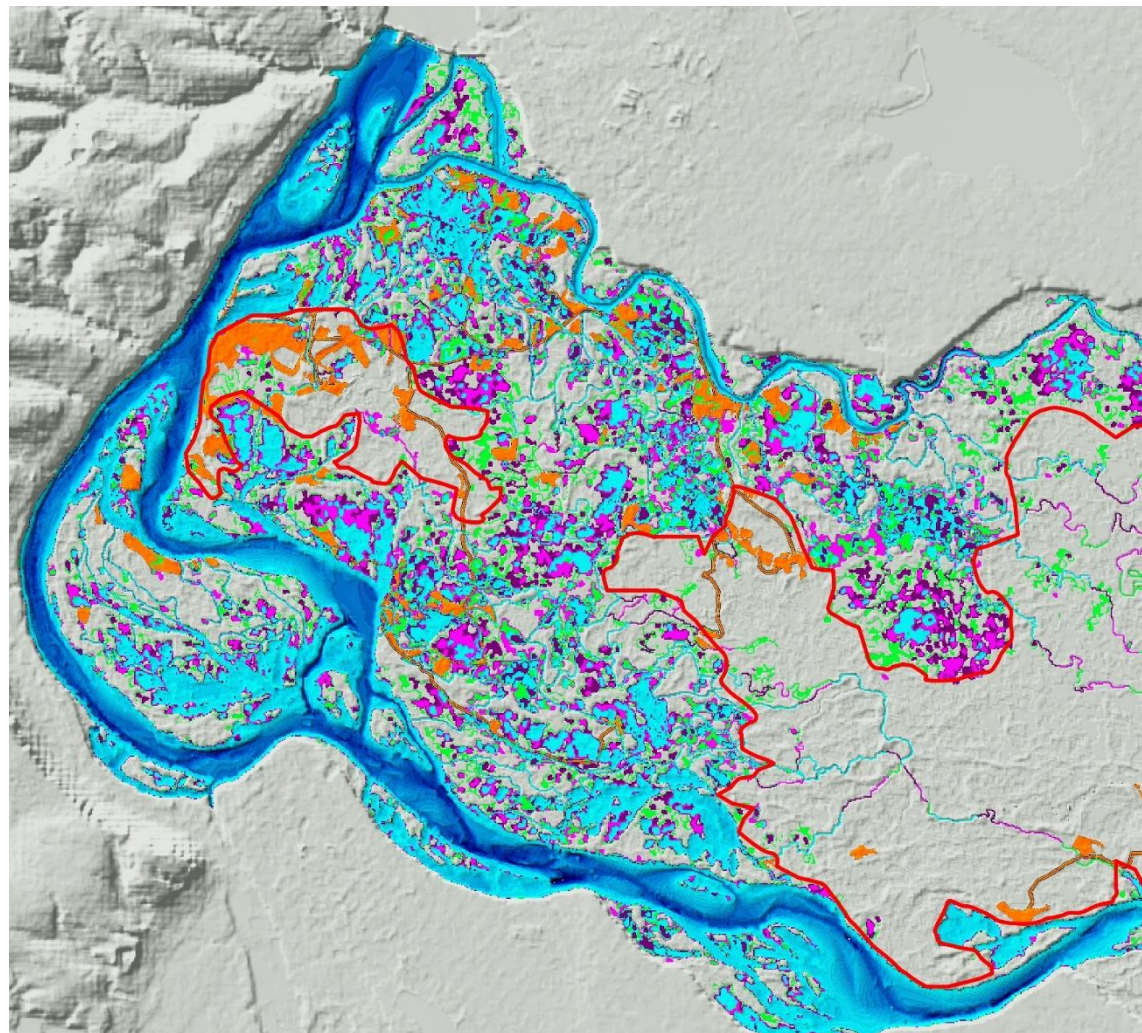
Моделирование динамики развития и последствий затопления Волго-Ахтубинской поймы



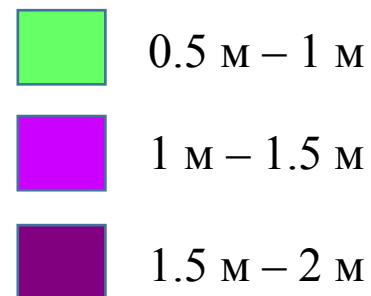
Северная часть ВАП
50 км × 50 км.

**Разбиение
рассматриваемой
территории на 3 зоны**

Моделирование динамики развития и последствий затопления Волго-Ахтубинской поймы

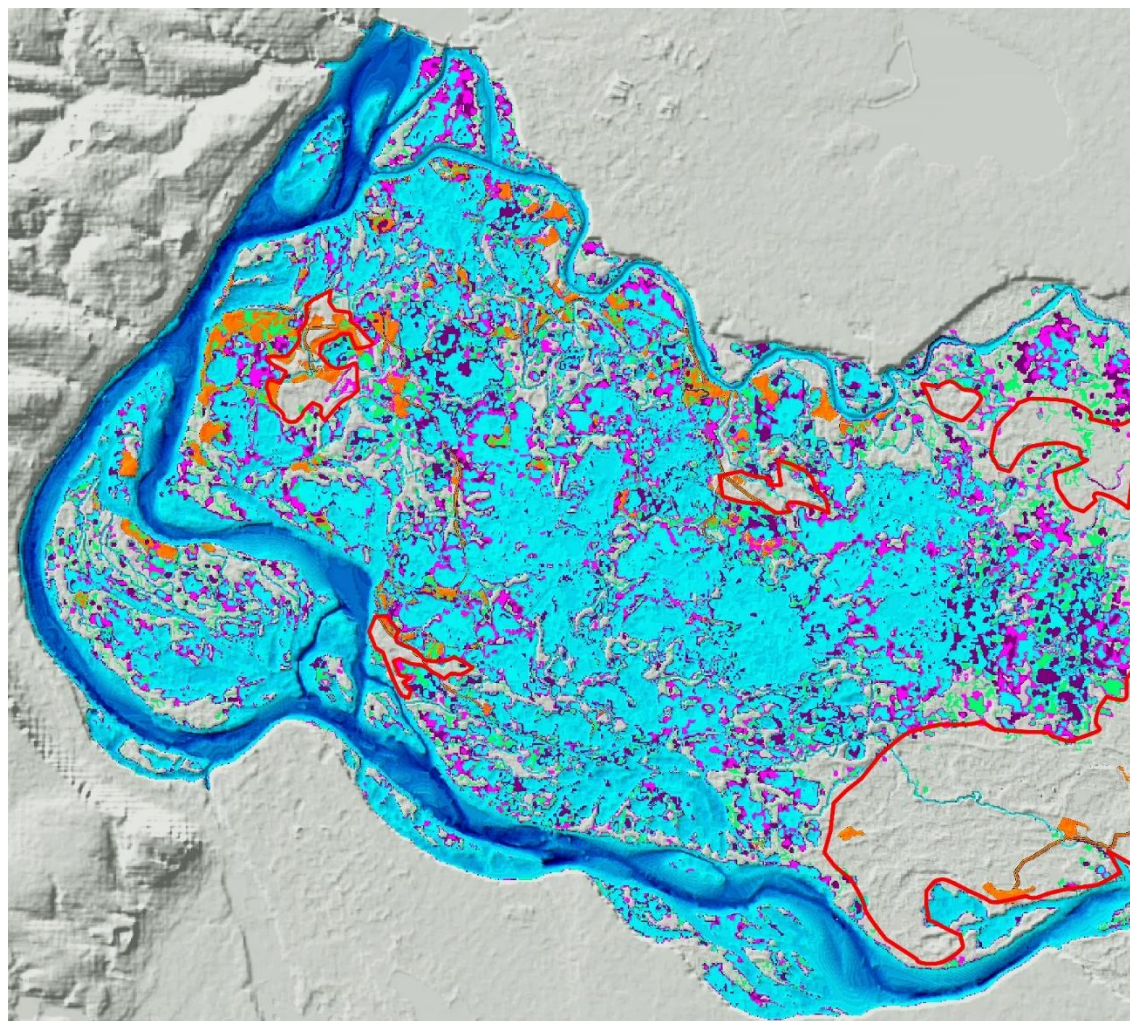


$$Q = 50\,000 \text{ м}^3/\text{с}$$
$$t = 24 \text{ ч}$$

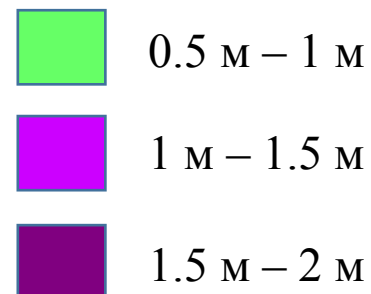


$$H_{min} = 0.5 \text{ м}$$
$$H_{max} = 26 \text{ м}$$

Моделирование динамики развития и последствий затопления Волго-Ахтубинской поймы

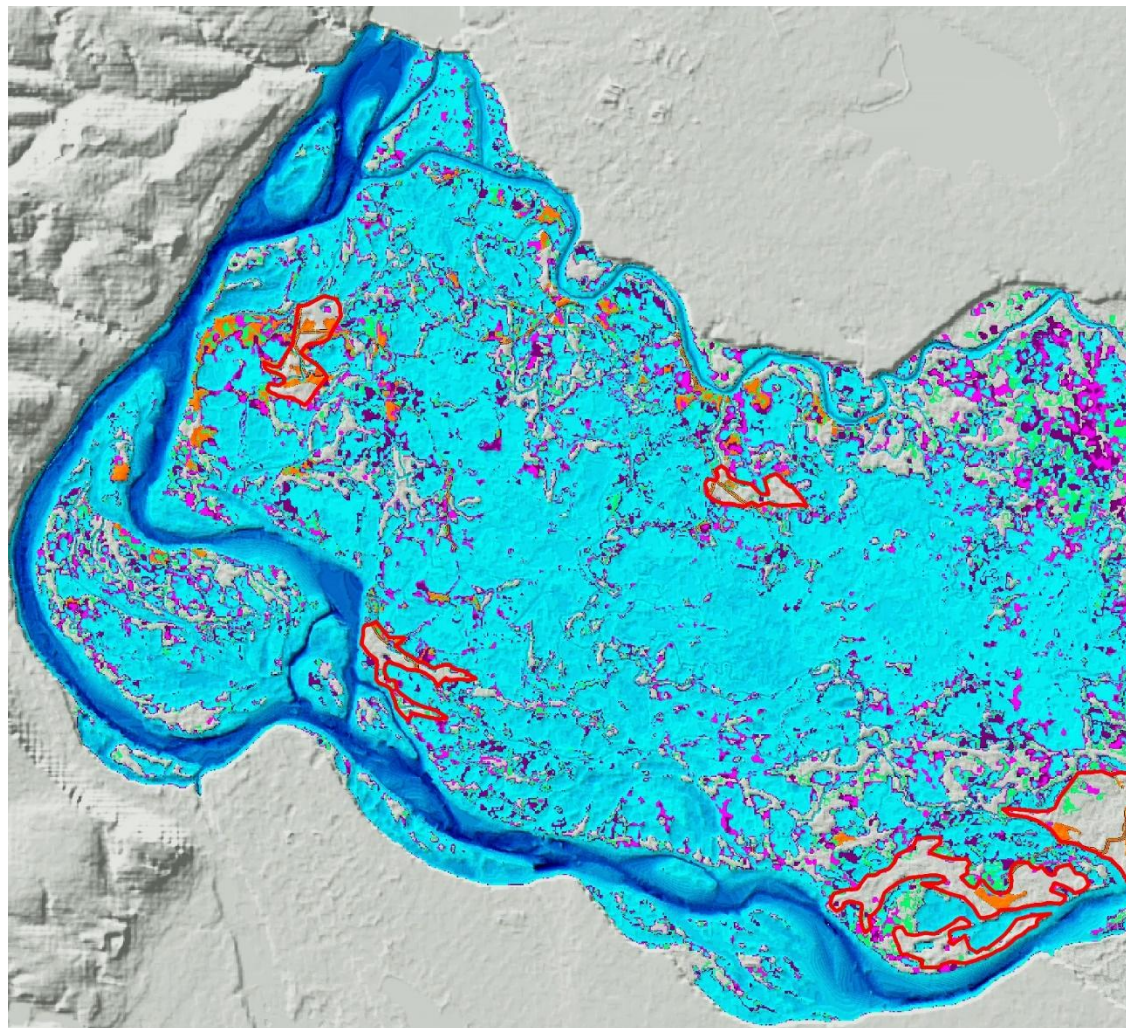


$$Q = 70\,000 \text{ м}^3/\text{с}$$
$$t = 24 \text{ ч}$$

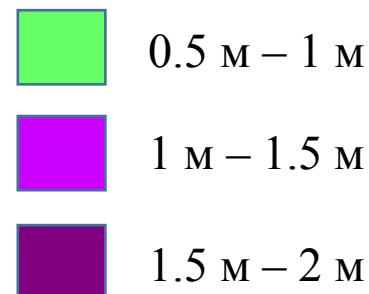


$$H_{min} = 0.5 \text{ м}$$
$$H_{max} = 26 \text{ м}$$

Моделирование динамики развития и последствий затопления Волго-Ахтубинской поймы



$$Q = 100\,000 \text{ м}^3/\text{с}$$
$$t = 24 \text{ ч}$$



$$H_{min} = 0.5 \text{ м}$$
$$H_{max} = 26 \text{ м}$$

Выводы

Компьютерная модель с использованием технологии CUDA позволяет:

- ✓ прогнозировать последствия и динамику развития чрезвычайных ситуаций для принятия оперативных решений;
- ✓ проектировать гидротехнические сооружения и дренажные коммуникации с целью повышения эффективности их функционирования и уровня безопасности природно-хозяйственных систем;
- ✓ проводить экспертизу существующих гидротехнических сооружений и дренажных коммуникаций в случае ЧС.

Спасибо за внимание!

Вычислительные ядра:

- **Kernel 1** – расчет гидродинамических сил в момент времени t_n и шага по времени dt ;
- **Kernel 2** – расчет интегральных характеристик и положения частиц в момент времени $t_{n+1/2}$;
- **Kernel 3** – расчет гидродинамических сил в момент времени $t_{n+1/2}$;
- **Kernel 4** – расчет интегральных характеристик и положения частиц в момент времени t_{n+1} ;
- **Kernel 5** – вычисление потоков.