

Первая компьютерная модель циркуляции воды в межгорных котловинах при сбросах ледниково-подпрудных озер (на примере Курайского озера)

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

Томский государственный университет

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



Altai

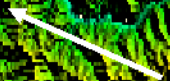
3,000 m

2,500 m

2,000 m

1,500 m

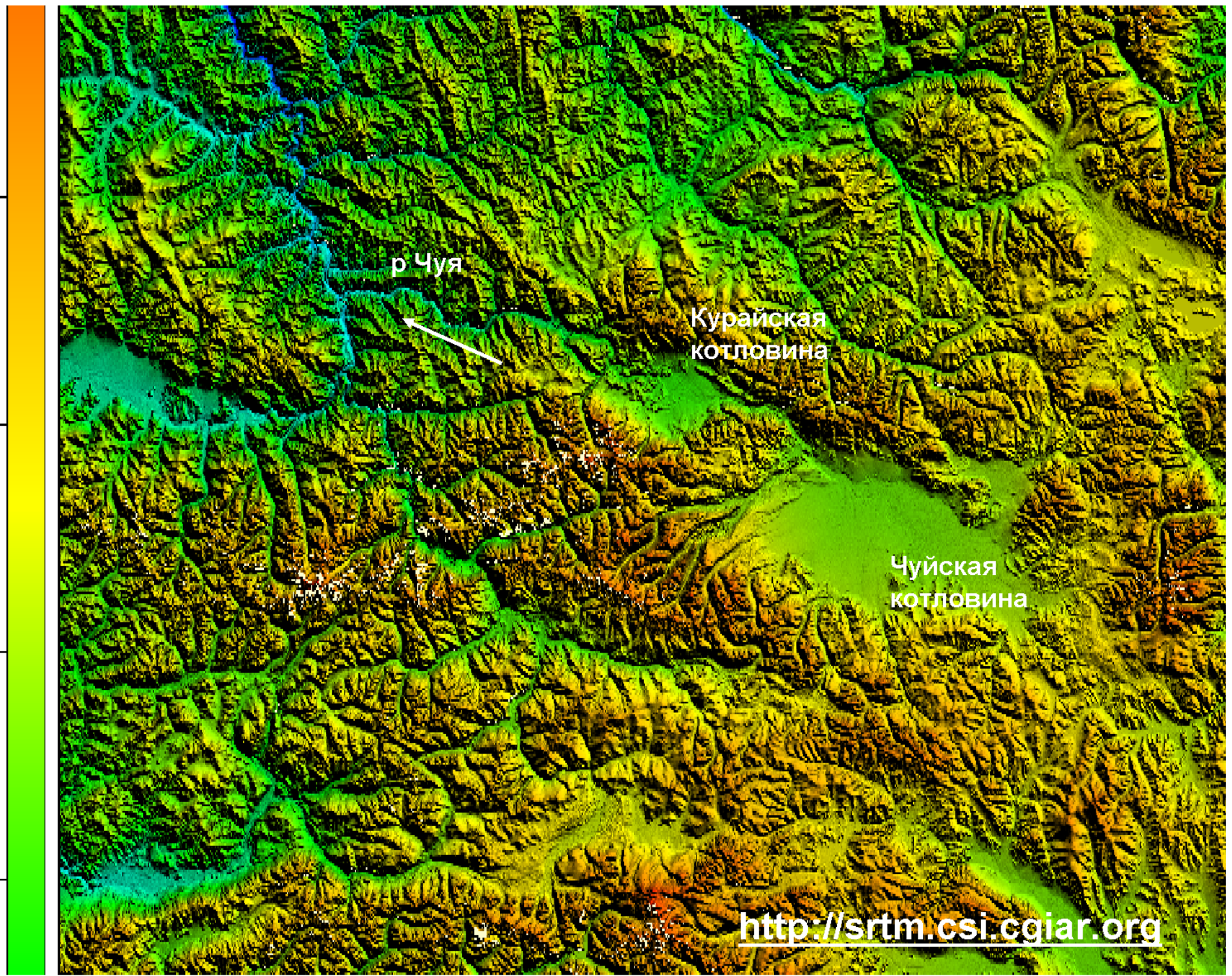
р Чуя



Курайская
котловина

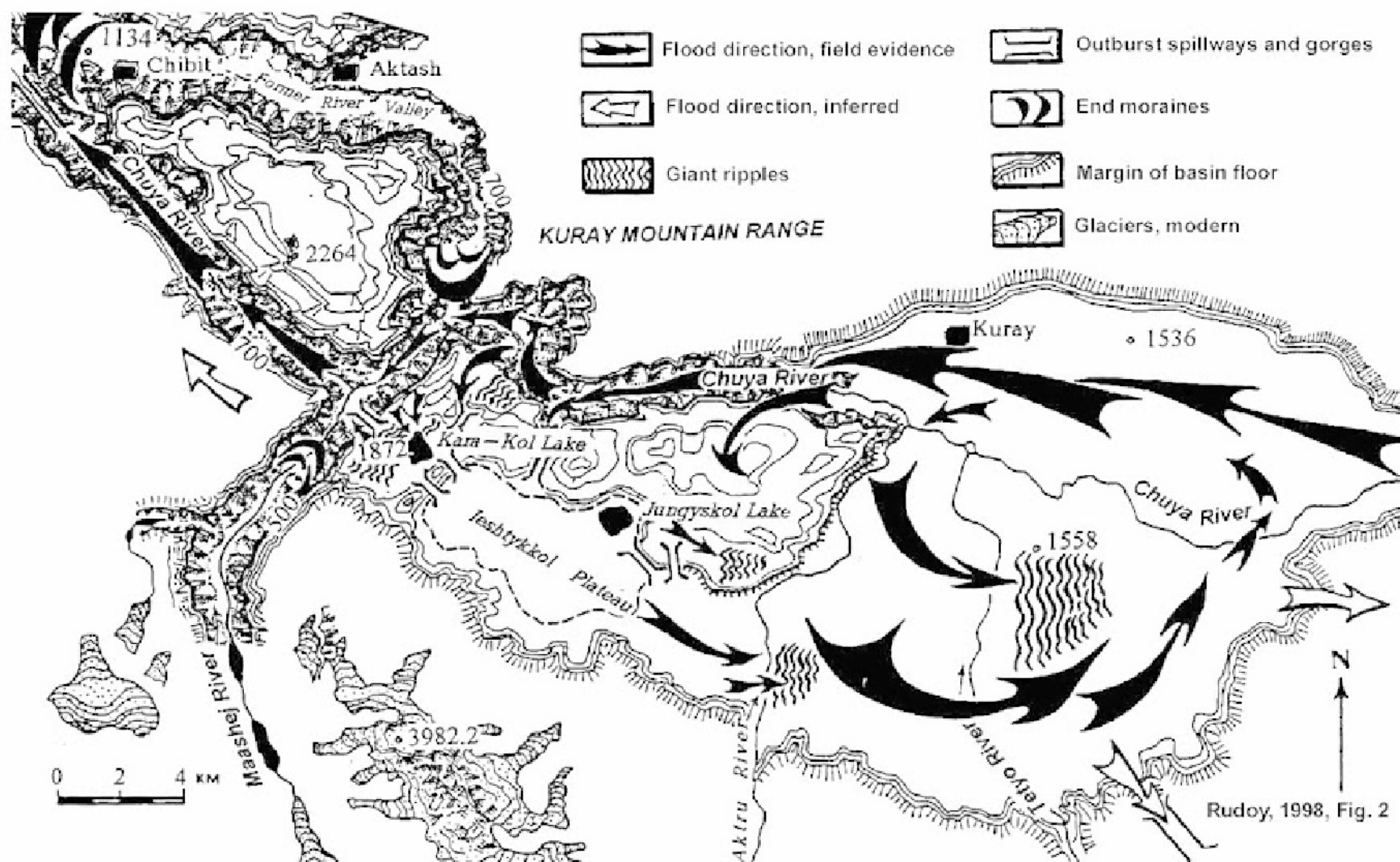
Чуйская
котловина

<http://srtm.csi.cgiar.org>

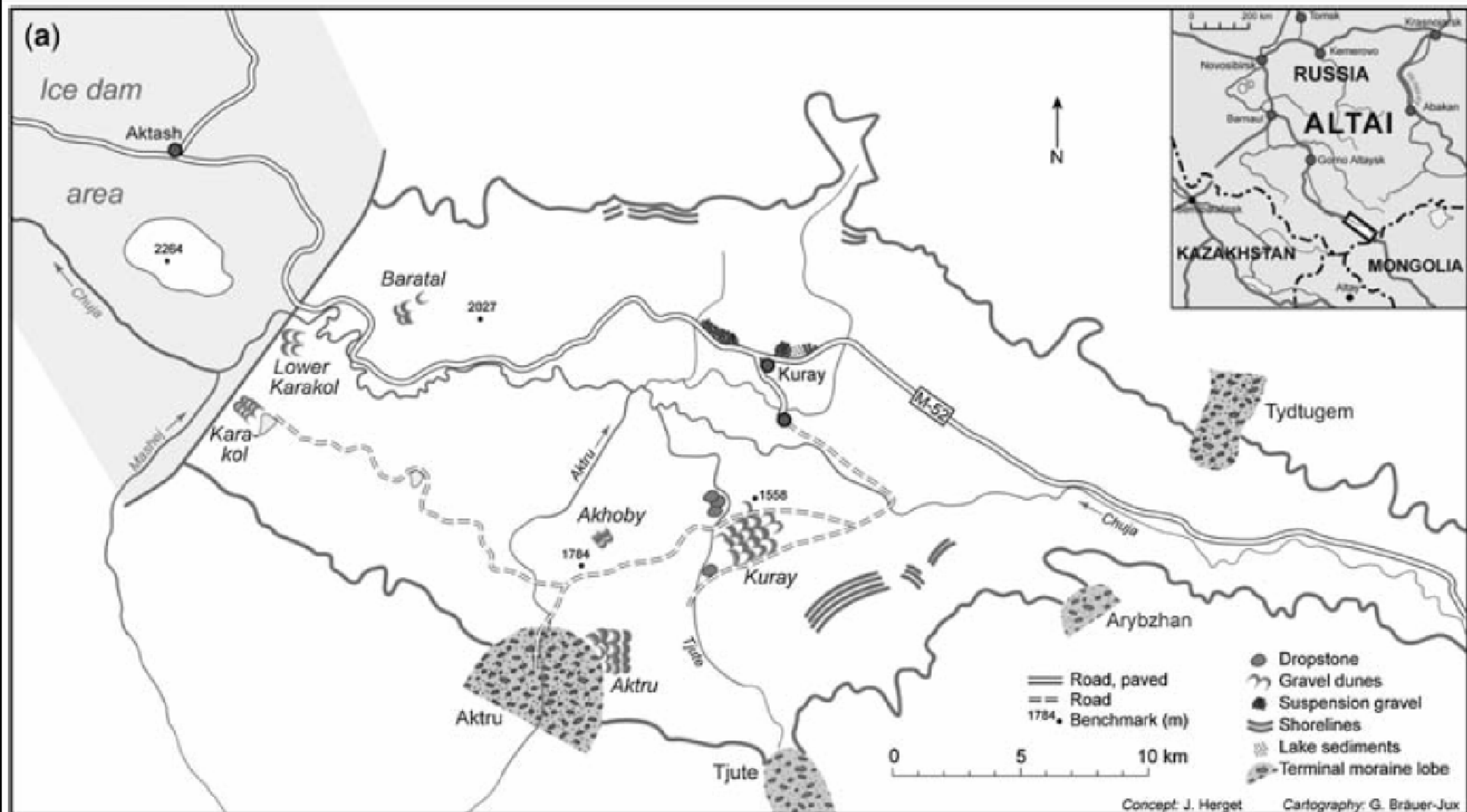


Циркуляционные течения в Курайской котловине (по Rudoy, 1998)

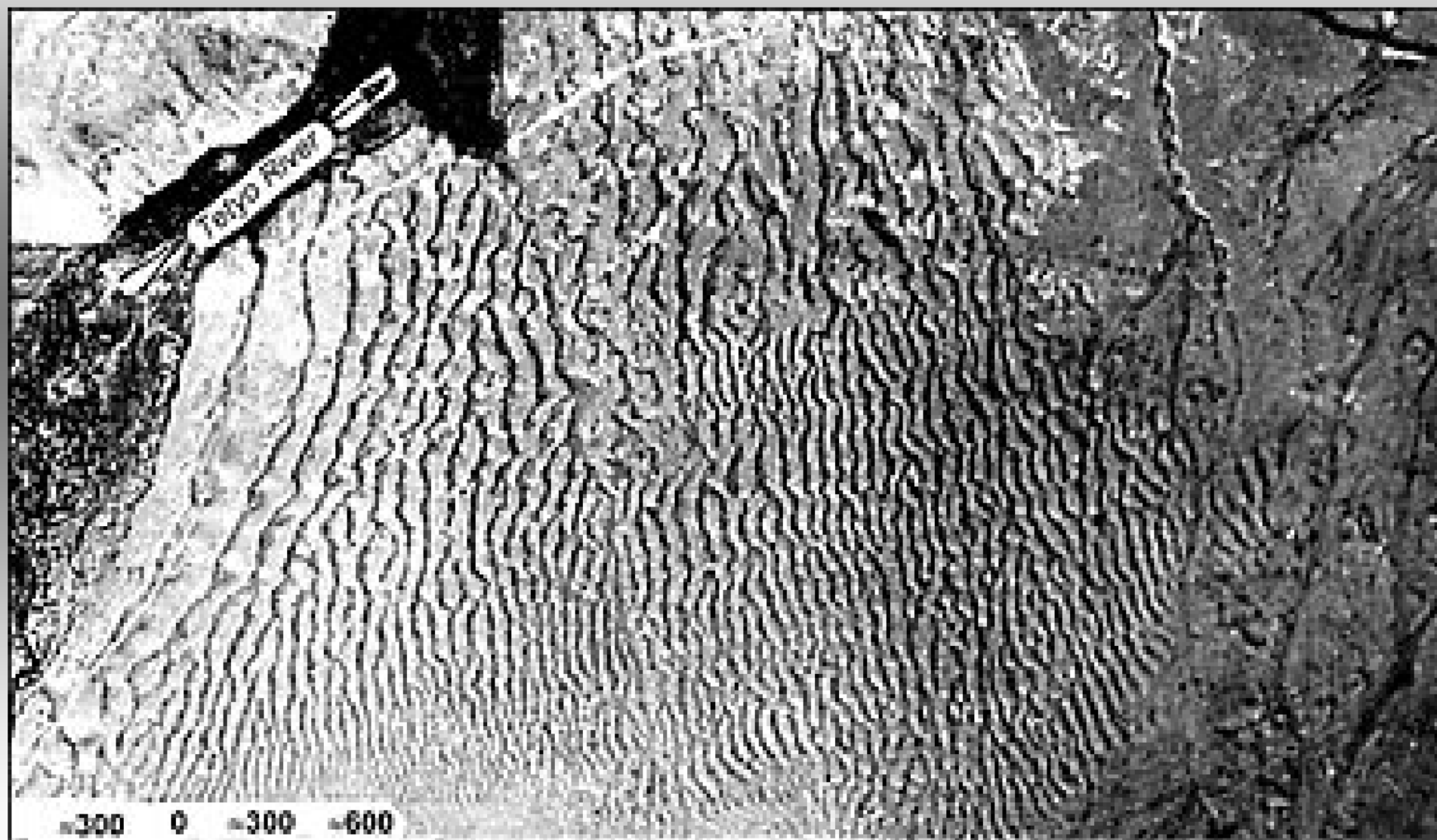
KURAY BASIN, ALTAI MOUNTAINS - 11.5 Ka



Расположение полей гравийных гряд в Курайской котловине (по Carling et al, 2011)



Курайское поле гравийных гряд



Курайское поле гравийных гряд



- предлагается двумерная компьютерная модель движения вод, включая циркуляционные течения, непосредственно в Курайском озере в процессе его опорожнения при разных расходах воды в транзитном потоке. Для создания модели использована программа RMA2 в моделирующей системе SMS 9.2.
- При моделировании принято допущение, что расходы воды на входе в озеро и выходе из него одинаковы. Это с определенной степенью приближения соответствует условиям транзитного, осложняемого внутриводоемной циркуляцией, режима движения воды в Курайском озере. Подобные условия, например, могли сложиться при почти одновременном прорыве верхней плотины между Курайским и Чуйским озерами и нижней ледниковой плотины на выходе из всей озерной системы.

- Исходные материалы представлены цифровой моделью рельефа, полученной по данным космического зондирования земной поверхности (SRTM-матрицы).
- Расходы воды на входе в Курайское озеро принимались фиксированными – последовательно в диапазоне от 10 до 0,3 млн. м³/с с шагом 1 млн. м³/с. При этом уровни воды в нижнем створе (в районе современного пос. Чибит) задавались, исходя из необходимости получения устойчивых решений.
- уровни воды в нижнем створе (в районе современного пос. Чибит) задавались, исходя из необходимости получения устойчивых решений.
- Коэффициент шероховатости Маннинга принят для всего диапазона моделируемых условий равным 0,03. Коэффициент турбулентной вязкости задавался в зависимости от значения числа Пекле (Peclet), определяемого критическими размерами ячеек расчетной сетки.

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;

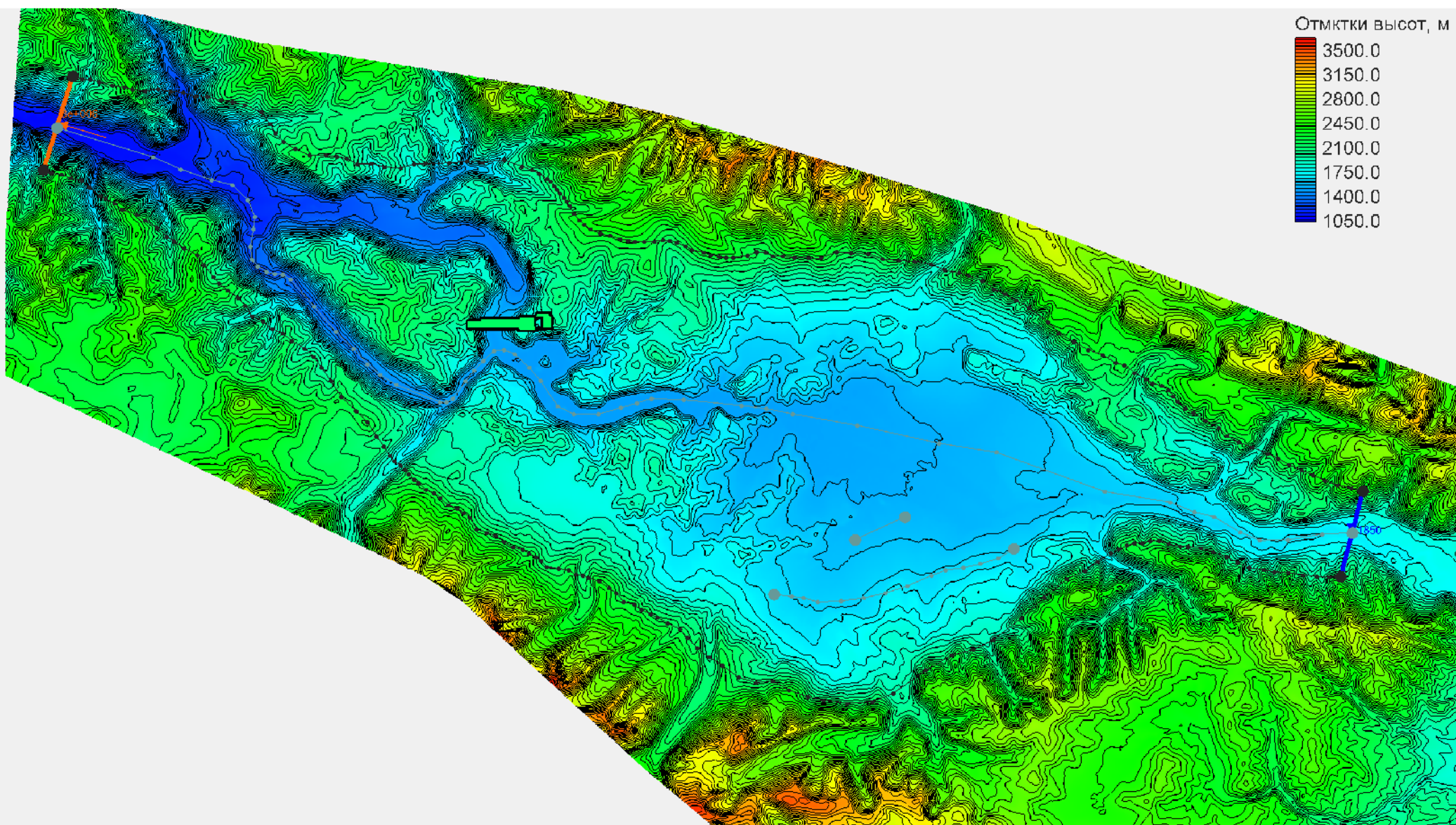
ζVa – скорость ветра;

$\zeta \psi$ – направление ветра;

$\zeta \omega$ – угловая скорость вращения Земли;

$\zeta \phi$ – широта местности.

Рельеф дна Курайской котловины с границами расчетного участка

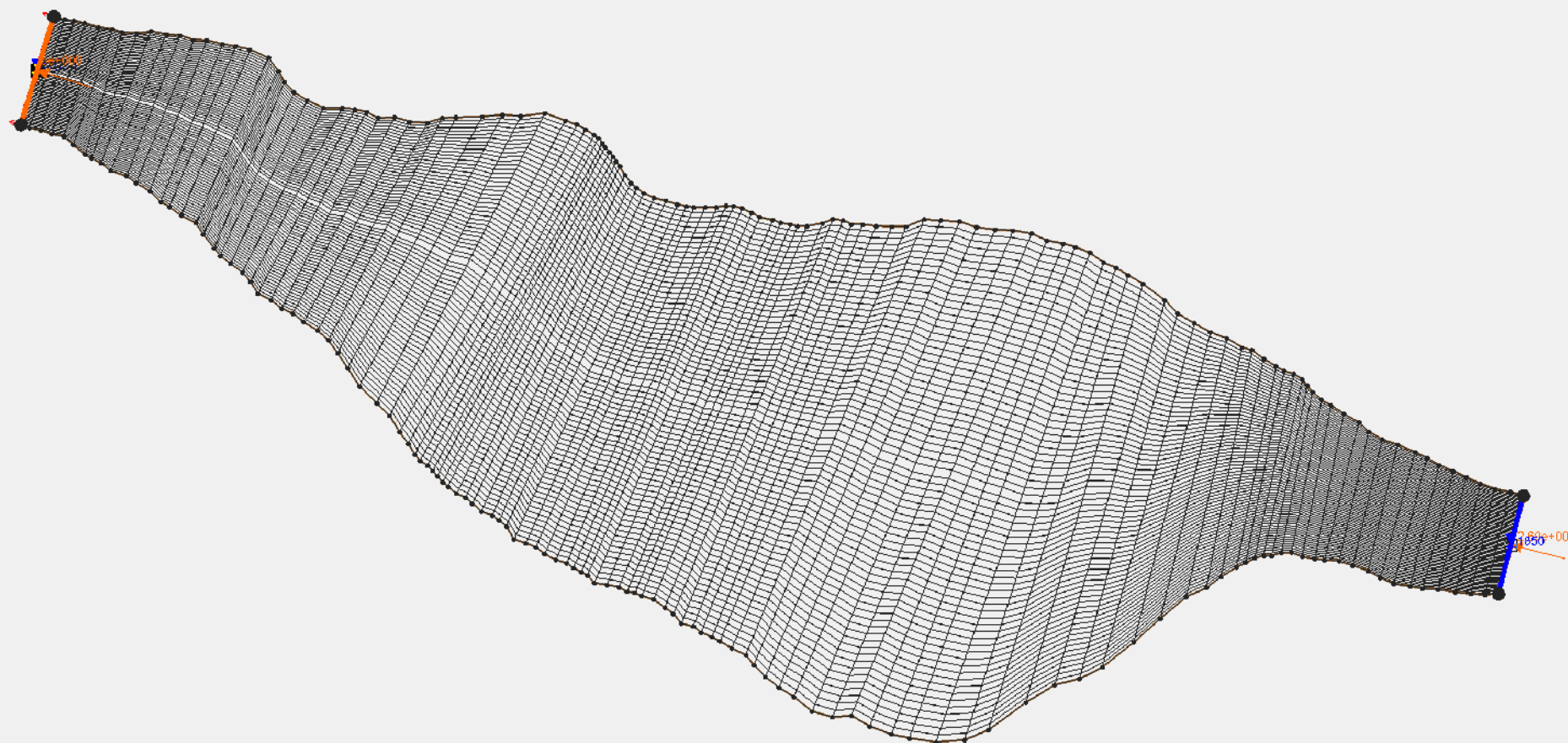


Расчетная сетка:

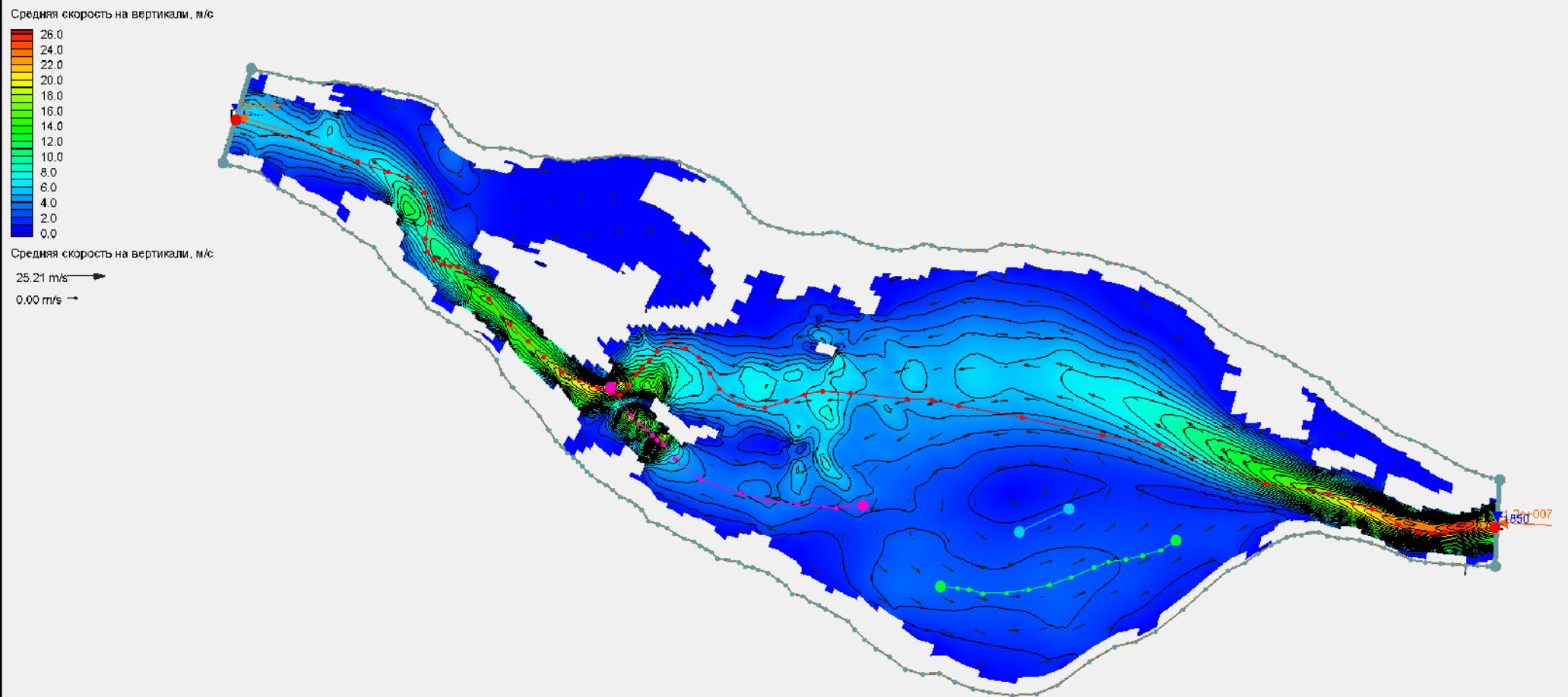
8330 элементов,

25369 точек

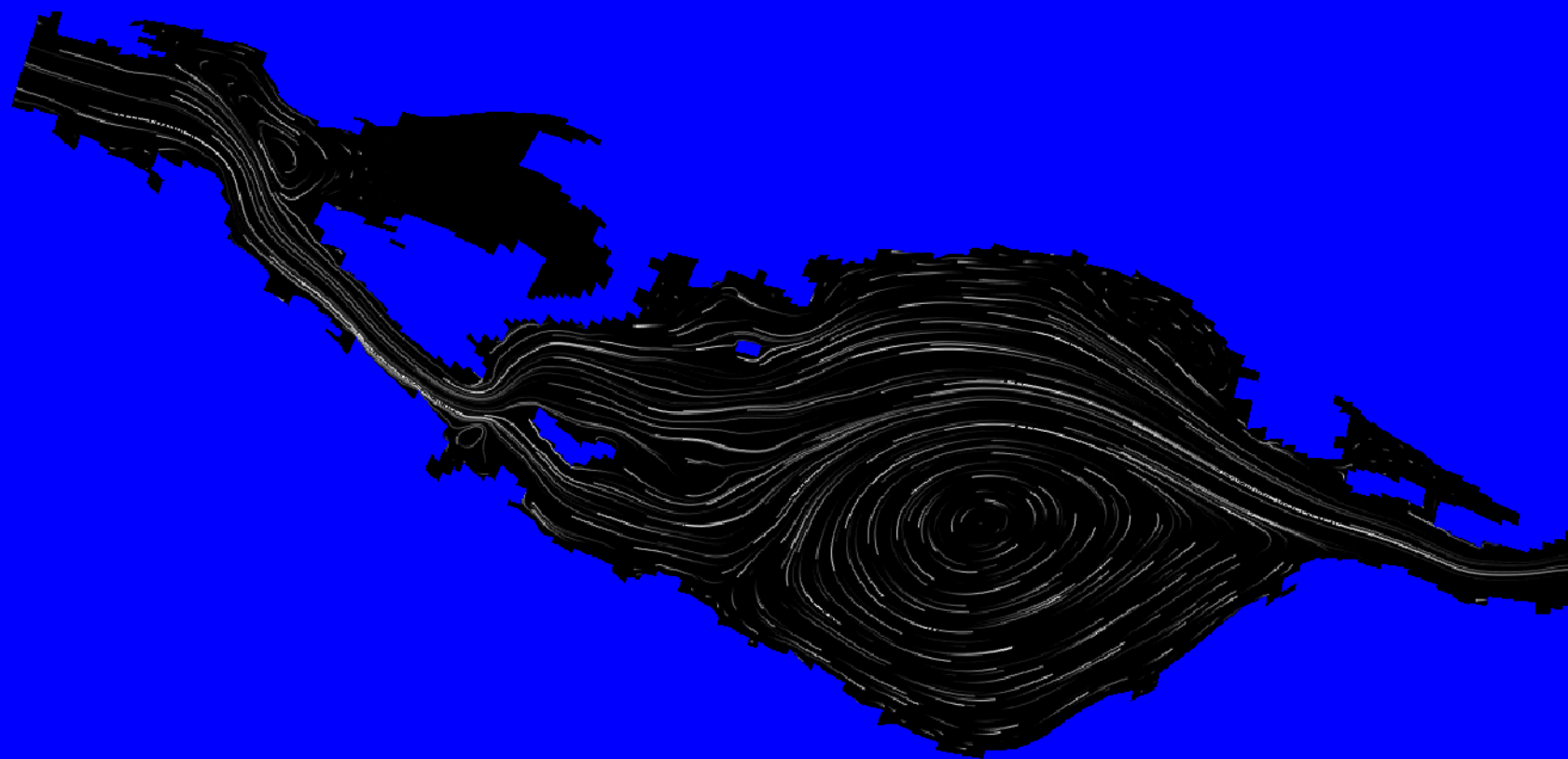
Диапазон отметок местности 1072-2315 м



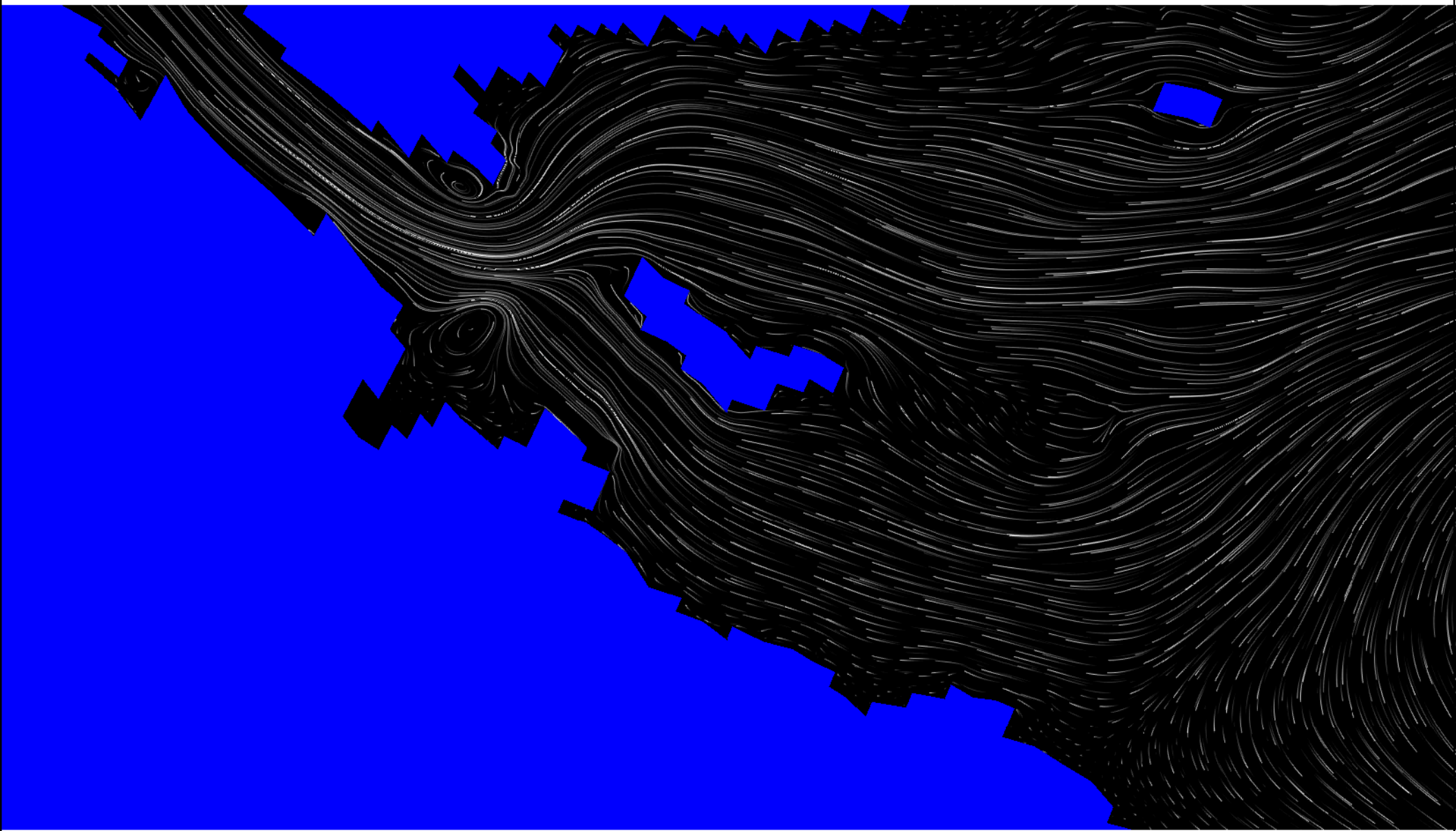
Поле скоростей при транзитном расходе воды $8,9 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$



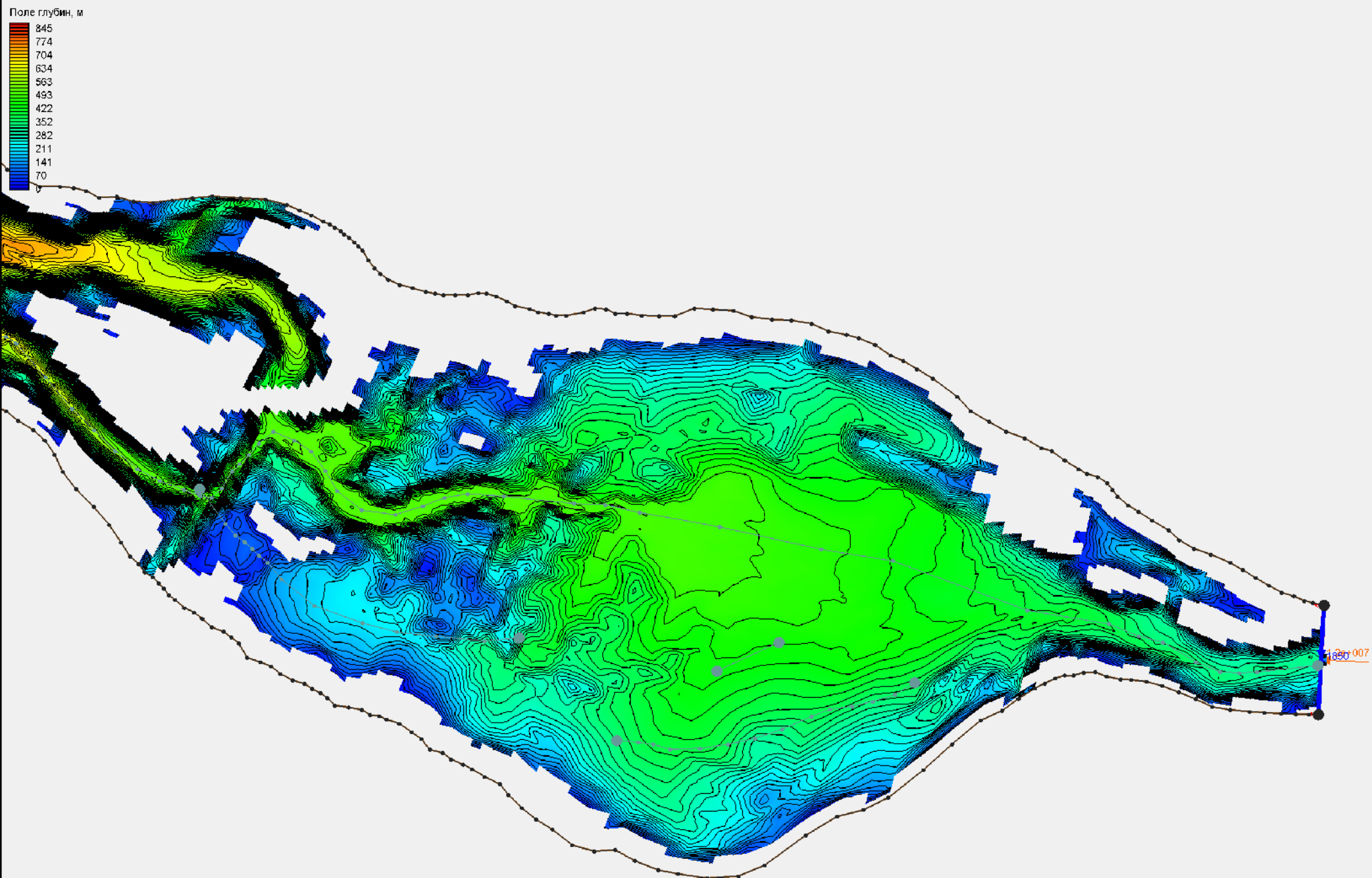
План течений при транзитном расходе воды $8,9 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$



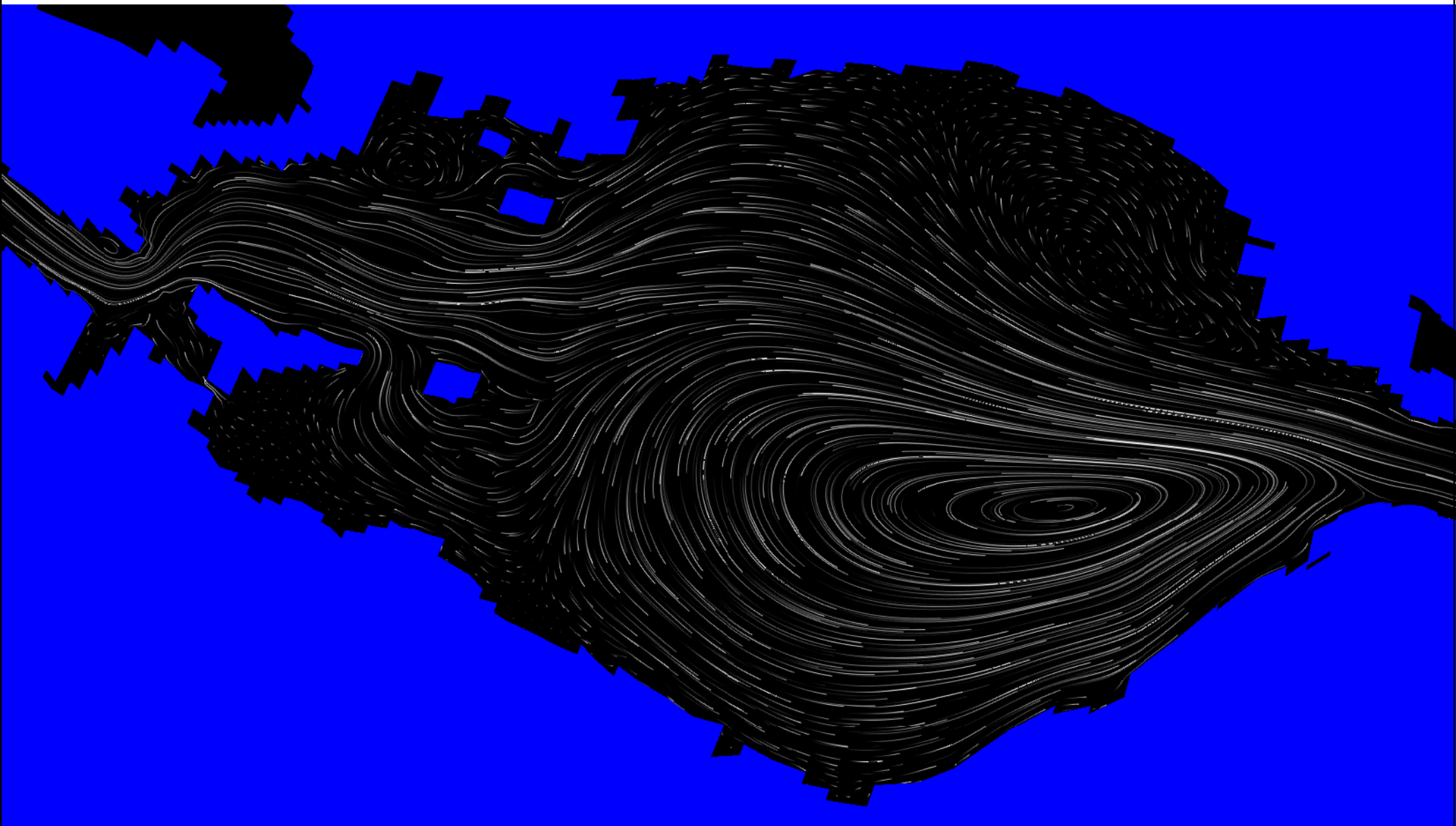
План течений при транзитном расходе воды $8,9 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$
Увеличенный фрагмент в районе дюнного поля у оз.Караколь



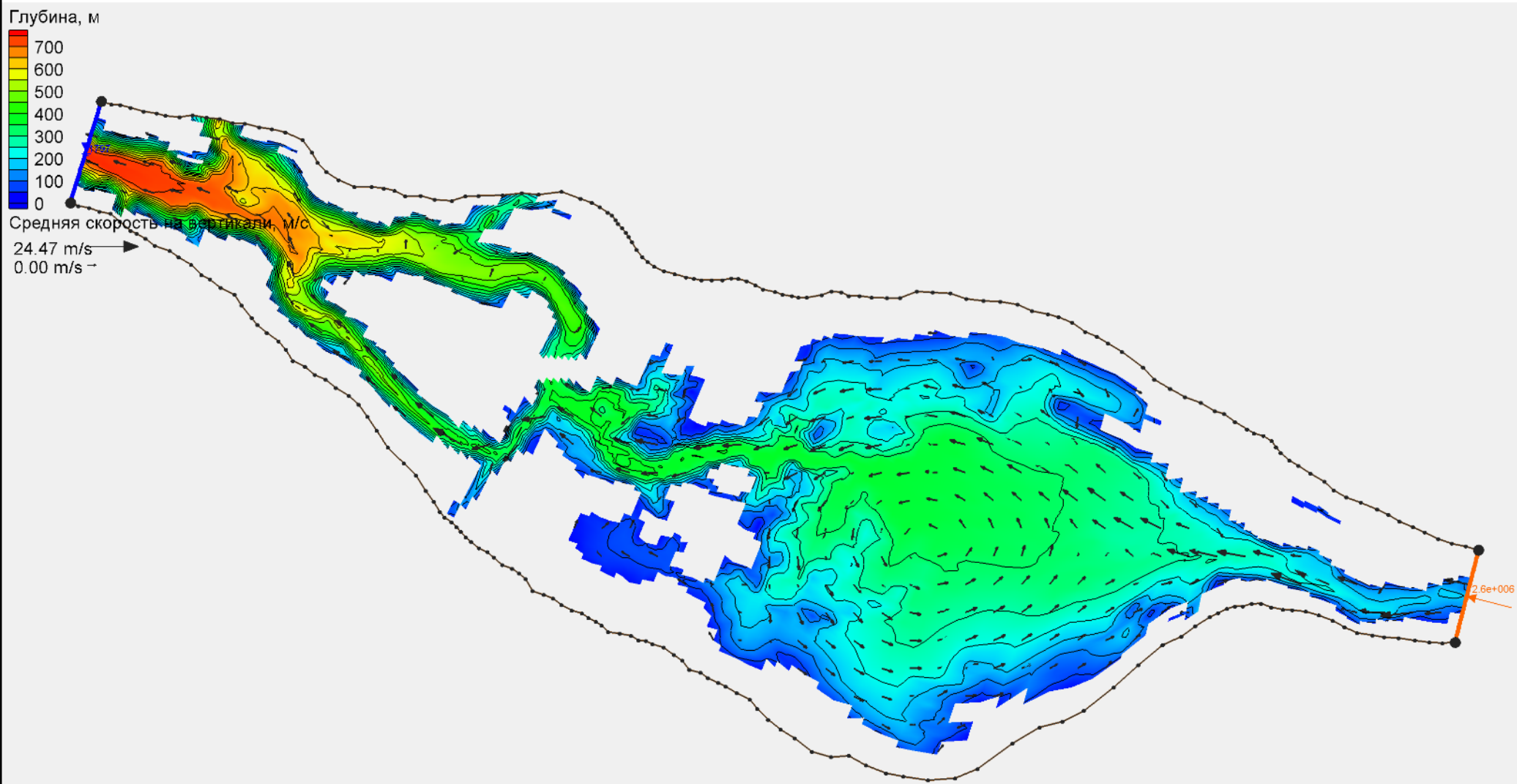
Поле глубин при транзитном расходе воды $8,9 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$



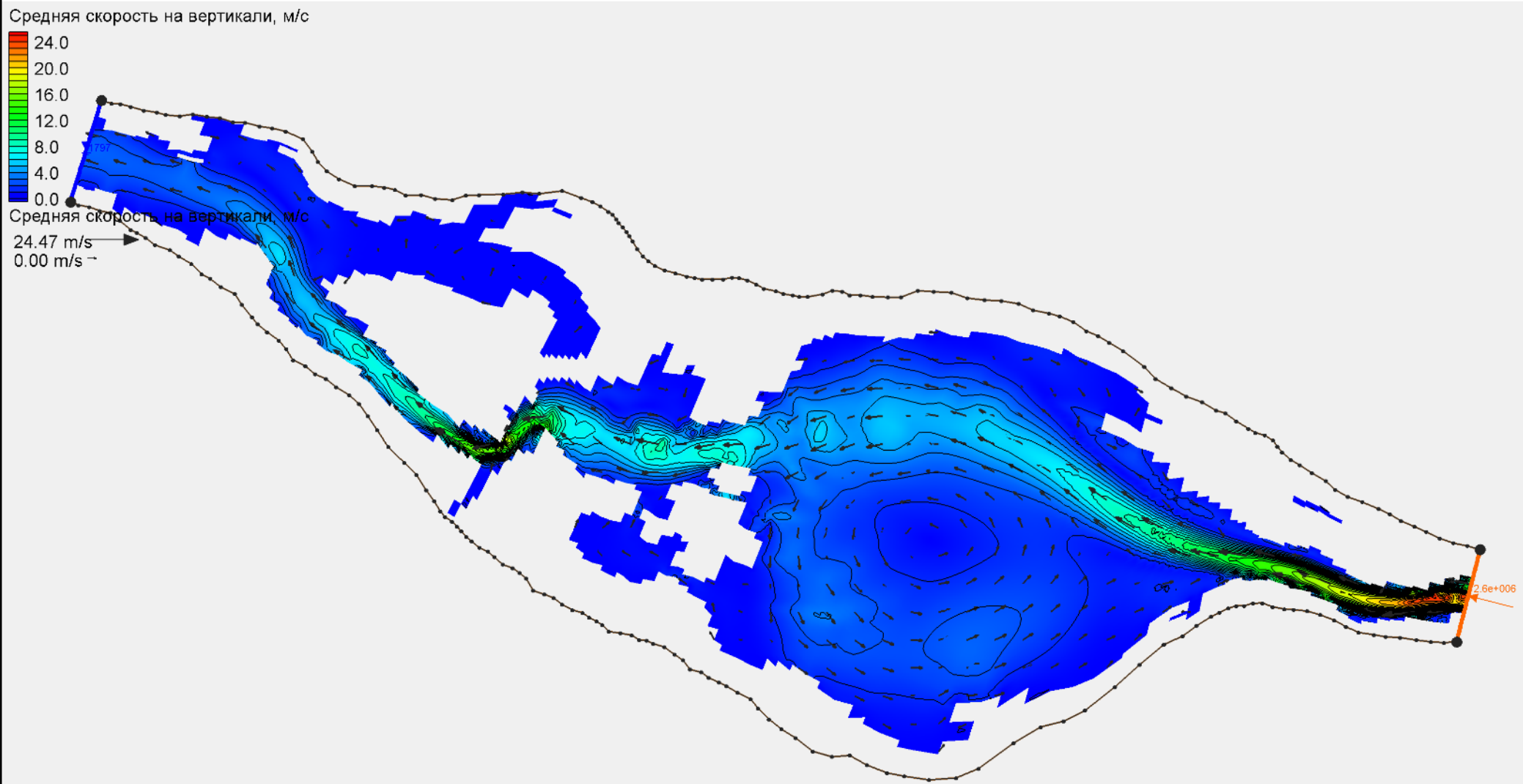
План течений при транзитном расходе воды $5,5 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$



Поле глубин при транзитном расходе воды $2,6 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$



Поле скоростей при транзитном расходе воды $2,6 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$



План течений при транзитном расходе воды $0,38 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$



Оценка длины и высоты гряд по материалам моделирования

По материалам предыдущих исследований [Карлинг, Хергет, Рудой, Парначов] высоты дюн в Курайской котловине составляют 1-16 метров. Крупность материала, слагающего тело дюны по исследованиям Хергета составляет 32 мм. Скорости течения и глубины потока над дюнным полем в Курайской котловине близ реки Тетё при расходе воды $2,8 \cdot 10^6$ м³/с получены по 2D модели. Скорости течения составляют от 1,29 до 1,54 м/с, глубины составляют от 277 до 293 м.

В результате расчетов по выше перечисленным формулам наиболее удовлетворительные результаты получены по формулам Железнякова-Дебольского и Пушкарева. По первой формуле высота дюн получается 17-18,5 м, что почти соответствует максимальным высотам дюн на рассматриваемом участке. По второй формуле высота дюн получается 13,6-14,4 м.