

Численное моделирование склоновых потоков в пакете OpenFOAM на примере Хибинских гор.

Дарья Игоревна Романова

Московский государственный университет
Механико-математический факультет

МГУ, 2016.

Склоновые потоки

Склоновые потоки это:

- снежные лавины
- сели
- оползни
- грязевые потоки
- камнепады



снежная лавина



сель



оползень



камнепад

Снежные лавины

Для возникновения снежной лавины достаточно:

- угла падения склона больше 15°
- снежного покрова глубиной 30 - 40 см и выше



Фотографии принудительного спуска лавины вблизи города Кировск в Хибинских горах в 22:00 18 февраля 2016 года. Лавина приобрела катастрофический характер и унесла жизни трёх людей, в том числе одного из сотрудников лавинной службы. Были засыпаны железная и автомобильная дороги, выбиты окна в трёх близлежащих домах.

Программное обеспечение



OpenFOAM (Open Source Field Operation And Manipulation CFD ToolBox) - открытая интегрируемая платформа для численного моделирования задач механики сплошной среды. Используется решатель InterFoam, предназначенный для расчета нестационарного течения двух сред, разделённых границей раздела или свободной поверхностью.

Исходные данные о лавине №129 в очаге №22

АО "Апатит" предоставило паспорт лавины №129. Он включает в себя описание лавины.

Параметры взятые из паспорта лавины:

- максимальная толщина уступа лавины - 1.5 м
- средняя толщина уступа лавины - 0.8 м
- максимальная плотность лавинных отложений - 320 кг/м³
- средняя плотность лавинных отложений - 290 кг/м³
- минимальная плотность лавинных отложений - 260 кг/м³
- состояние снега - сухой
- максимальная толщина лавинных отложений - 4 м
- средняя толщина лавинных отложений - 0.72 м

Сотрудники НИЛ Снежных лавин и селей предоставили цифровую растровую карту формата ASCII GRID 22-го лавинного очага, включая зону зарождения и зону отложения 129-ой лавины.

Географические карты

Схема лавинных очагов в районе г. Кировска

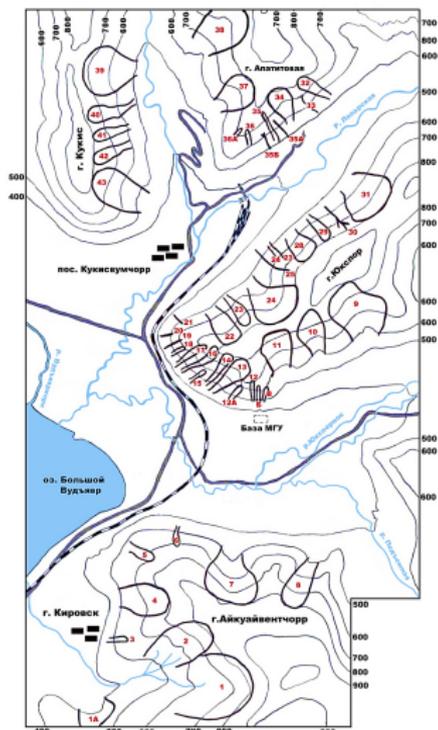
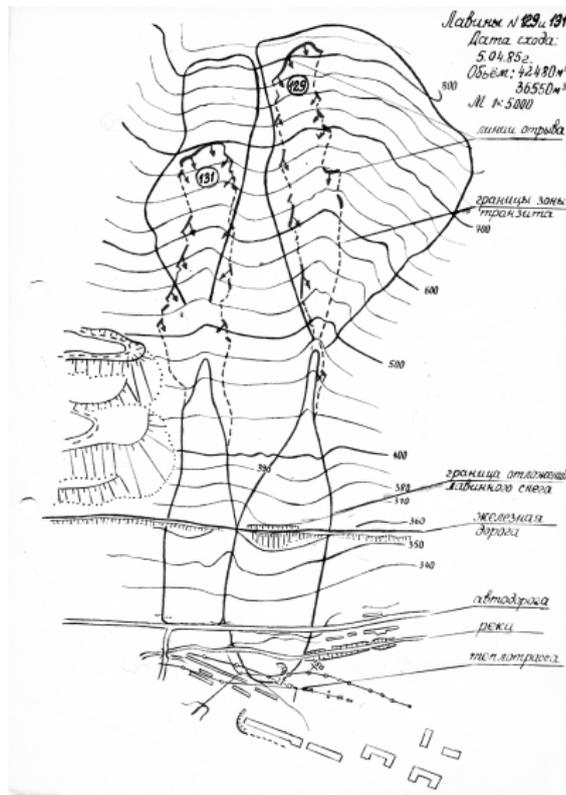


Схема лавинных очагов
в районе г. Кировска



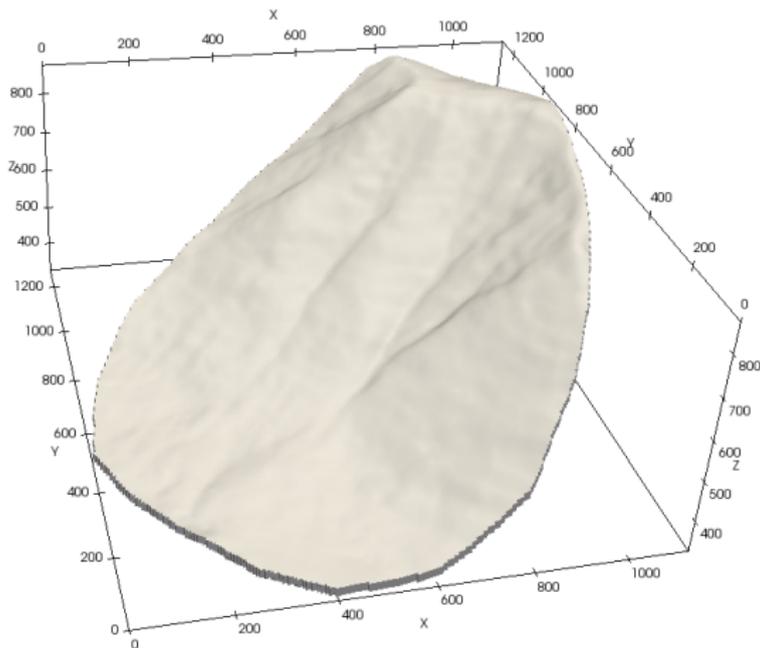
Лавины № 129, № 131

Склон



Фотография лавинного очага №22, сделанная сотрудником НИЛ Снежных лавин и селей Селиверстовым Юрием Германовичем.

Расчётная область



Расчётная область в форме призмы, основанием которой служит поверхность склона, а высота её по вертикали 20 метров. На рисунке показано верхнее основание

Модель движущейся среды

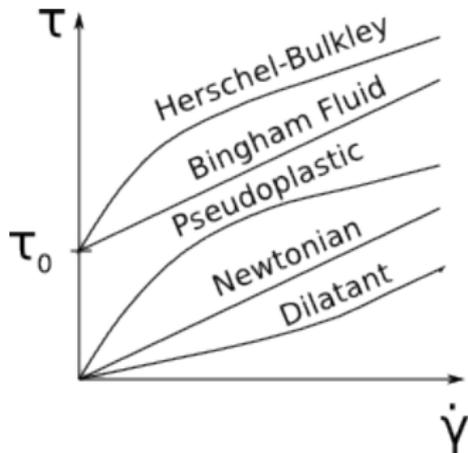
Лавина представлена как турбулентный двухфазный поток — снег и воздух. Для снега взяты реологические соотношения Хершеля-Балкли, воздух представлен как ньютоновская среда.

Ньютоновская модель:

$$\tau = \nu \dot{\gamma}$$

Модель Хершеля-Балкли:

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n$$



Зависимость сдвигового напряжения τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ в простом сдвиговом потоке для разных моделей среды.

Параметры среды

В расчетах взяты следующие свойства для воздуха

$$\rho = 1 \text{ кг/м}^3$$

$$\nu = 1.48 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сек}$$

Параметры для снега такие, как ρ , k , n , τ_0 , ν_0 , были подобраны при калибровке модели в соответствии с натурными данными.

В качестве модели турбулентности берётся $k - \varepsilon$ модель.

Уравнения движения и уравнение неразрывности

В вычислениях используются уравнения осреднённые по Рейнольдсу. Уравнение неразрывности имеет вид:

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

Уравнение движения записывается следующим образом:

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho\bar{u}_i\bar{u}_j + \overline{\rho u'_i u'_j} \right) = \rho g_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2)$$

где $\bar{\tau}_{ij}$ - компоненты среднего тензора вязких напряжений,
 $\overline{\rho u'_i u'_j}$ - напряжения Рейнольдса.

Реологические соотношения

$$\bar{\tau}_{ij} = 2\mu(|\dot{\bar{\gamma}}|)\bar{e}_{ij},$$

$$|\dot{\bar{\gamma}}| = \sqrt{2I_2(\dot{\bar{e}})},$$

где μ вычисляется по формуле

$$\mu = \rho\nu,$$

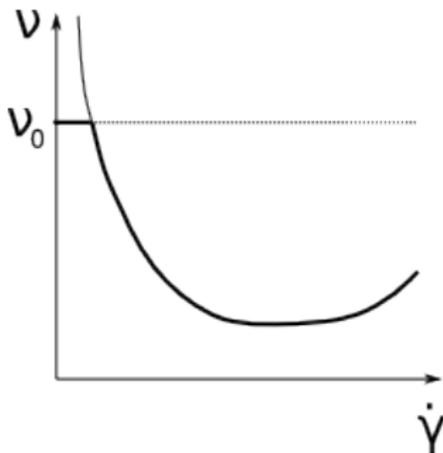
$$\nu = (1 - \alpha)\nu_{air} + \alpha\nu_{snow},$$

$$\rho = (1 - \alpha)\rho_{air} + \alpha\rho_{snow}.$$

$$\nu_{air} = const,$$

$$\nu_{snow} = \min\left(\nu_{snow0}, \frac{\tau_0 + k|\dot{\bar{\gamma}}|^n}{|\dot{\bar{\gamma}}|}\right),$$

$$\rho_{air} = const, \quad \rho_{snow} = const.$$



Зависимость эффективной вязкости для снега.

Уравнение для турбулентной кинетической энергии и уравнение для диссипации

Уравнение для турбулентной кинетической энергии K :

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j K)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial K}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial K}{\partial x_j} \right) + P_K - \rho \varepsilon, \quad (3)$$

Уравнение для диссипации ε :

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} P_K \frac{\varepsilon}{K} - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{K} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right). \quad (4)$$

Турбулентная вязкость выражается в виде

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon}. \quad (5)$$

Приведённая модель турбулентности содержит пять констант, которые задаются следующим образом:

$$C_\mu = 0.09; C_{\varepsilon 1} = 1.44; C_{\varepsilon 2} = 1.92; \sigma_K = 1.0; \sigma_\varepsilon = 1.3.$$

Уравнение объёмной доли фазы

Уравнение объёмной доли фазы α :

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^r \alpha(1 - \alpha)}{\partial x_j} = 0. \quad (6)$$

Объёмная доля фазы задаётся следующим образом:

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{снег} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{в переходном слое} \\ 0 & \text{воздух} \end{cases}$$

\vec{u}_r — дополнительное поле скорости, необходимое для сжатия переходного слоя.

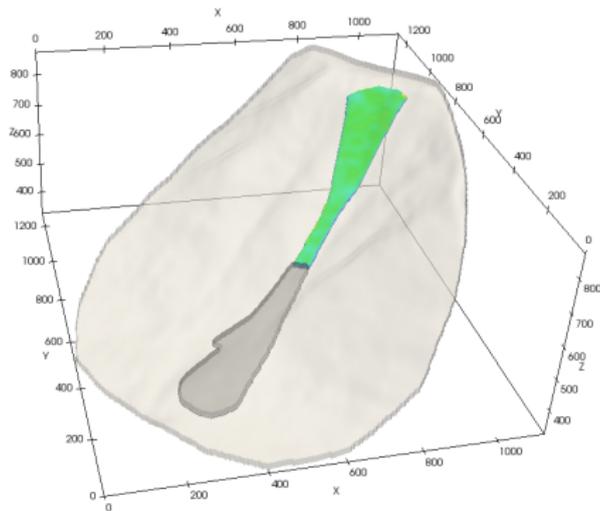
Граничные условия

При расчёте были заданы следующие граничные условия:

- Нижняя граница расчётной области задана как поверхность, на которой установлено условие прилипания и непротекания.
- Боковые и верхние границы расчётной области заданы как стандартные участки границы с условием протекания, на которых действует атмосферное давление.

Начальные условия

Начальное условие задачи состоит из покоящегося ($\vec{U} = 0$ всюду) слоя снега, лежащего в зоне зарождения лавины. Глубина снега во всех точках не превышает 1.5 м. А также при $t = 0$ $\varepsilon = 0$, $K = 0$, $\mu_t = 0$



Зона зарождения снега на склоне (зелёный цвет), зона натуральных отложений лавины (тёмно-серый цвет)

Решение СЛАУ

Уравнение для объёмной доли фазы α , турбулентной кинетической энергии K , диссипации ε и уравнение движения решаются одним из релаксационных методов - симметричным методом Гаусса-Зейделя.

Уравнение неразрывности решается методом сопряжённых градиентов с предобуславливателем. В качестве предобуславливателя используется неполное разложение Холецкого.

Расчётная сетка

Калибровка модели производилась на крупной сетке (линейный размер расчётной ячейки составляет 5м), состоящей из:

- 206 630 точек
- 532 887 граней
- 447 345 внутренних граней
- 163 372 ячеек

Сетка состоит из параллелепипедов. На такой сетке было рассчитано 119 задач (приблизительное время расчёта 9 часов) с различными значениями параметров.

После того, как были подобраны подходящие значения параметров, задача была рассчитана на более мелкой сетке (линейный размер расчётной ячейки 2.5 м), состоящей из:

- 1 479 033 точек
- 4 092 012 граней
- 3 749 844 внутренних граней
- 1 306 976 ячеек

Аппаратные характеристики

Расчёты производились на высокопроизводительном вычислительном сервере НИИ СИ РАН, состоящем из:

- 2 x Xeon E5-2670v1 (Sandy Bridge) 8 cores 2.6 GHz (16 threads)
4xchannel DDR3 memory controller
- MEM 256 GB DDR3-1333 ECC
- OS Ubuntu 15.10 64-bit

Результаты

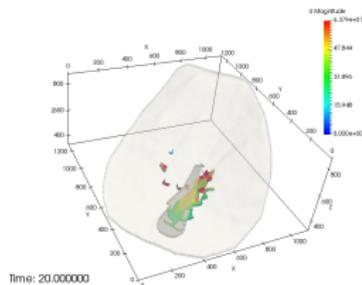
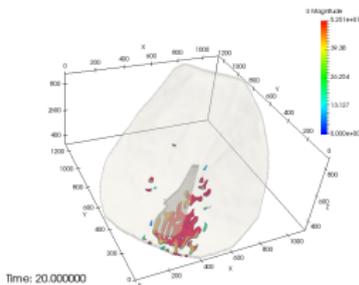
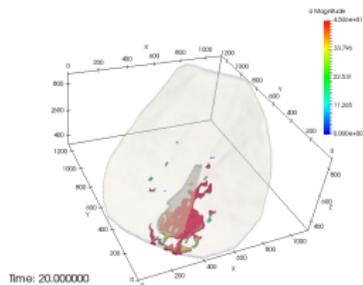
В процессе вычислений были получены значения $u_i(x, y, z, t)$, $\alpha(x, y, z, t)$, $p(x, y, z, t)$, а также граница лавинного потока, которая была определена из условия $\alpha = 0.1$.

Был произведен вариационный расчёт, где менялись параметры ρ , ν_0 , τ_0 , k , n для снега в следующих диапазонах:

ρ [кг/м ³]	ν_0 [м ² /с]	τ_0 [м ² /с ²]	k [м ² /с]	n
200	1e2	1	1e-5	2
300	1e5	1e-1	1e-4	5e-1
	1e-2	1e1	1e-6	

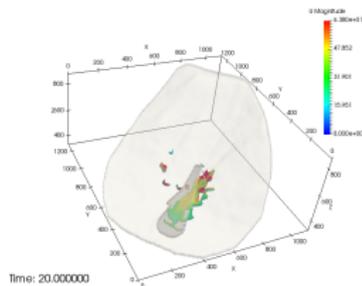
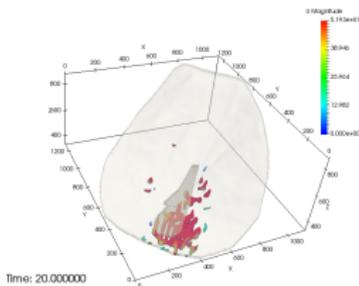
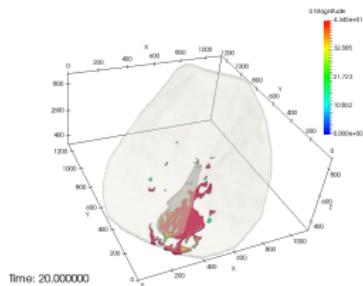
Таким образом было посчитано 108 случаев. Были сделаны следующие выводы, что такие параметры как τ_0 и ν_0 влияют на динамику потока и при наилучшей их конфигурации поток начинает замедляться на склоне.

Калибровка



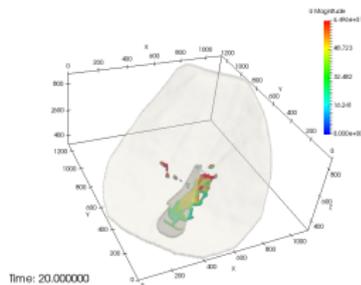
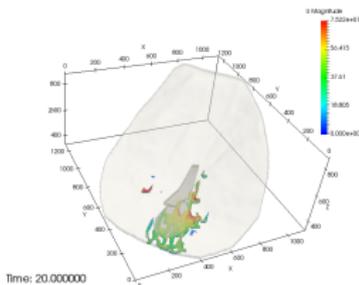
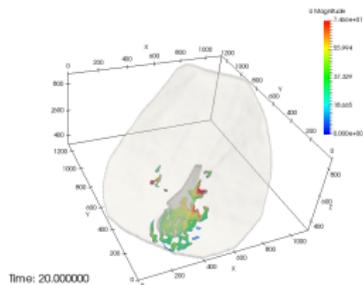
Параметр $\tau_0 = 1, 1e - 1, 1e1 \text{ м}^2/\text{с}^2$ варьируется, $\rho = 200\text{кг}/\text{м}^3$,
 $\nu_0 = 1e2\text{м}^2/\text{с}$, $k = 1e - 4\text{м}^2/\text{с}$, $n = 2$

Калибровка



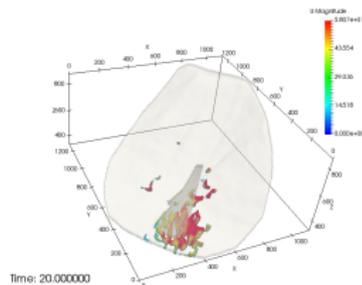
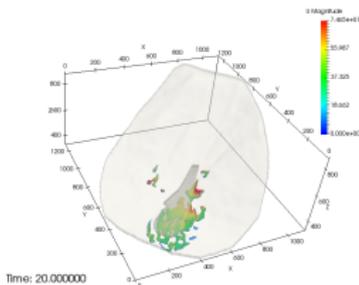
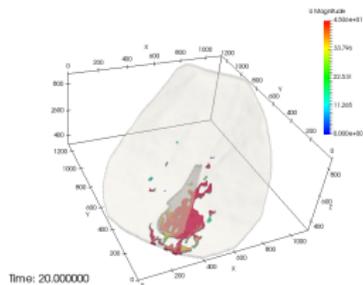
Параметр $\tau_0 = 1$, $1e - 1$, $1e1 \text{ м}^2/\text{с}^2$ варьируется, $\rho = 200\text{кг}/\text{м}^3$,
 $\nu_0 = 1e2\text{м}^2/\text{с}$, $k = 1e - 4\text{м}^2/\text{с}$, $n = 5e - 1$

Калибровка



Параметр $\tau_0 = 1, 1e - 1, 1e1 \text{ м}^2/\text{с}^2$ варьируется, $\rho = 200\text{кг}/\text{м}^3$,
 $\nu_0 = 1e5\text{м}^2/\text{с}$, $k = 1e - 4\text{м}^2/\text{с}$, $n = 5e - 1$

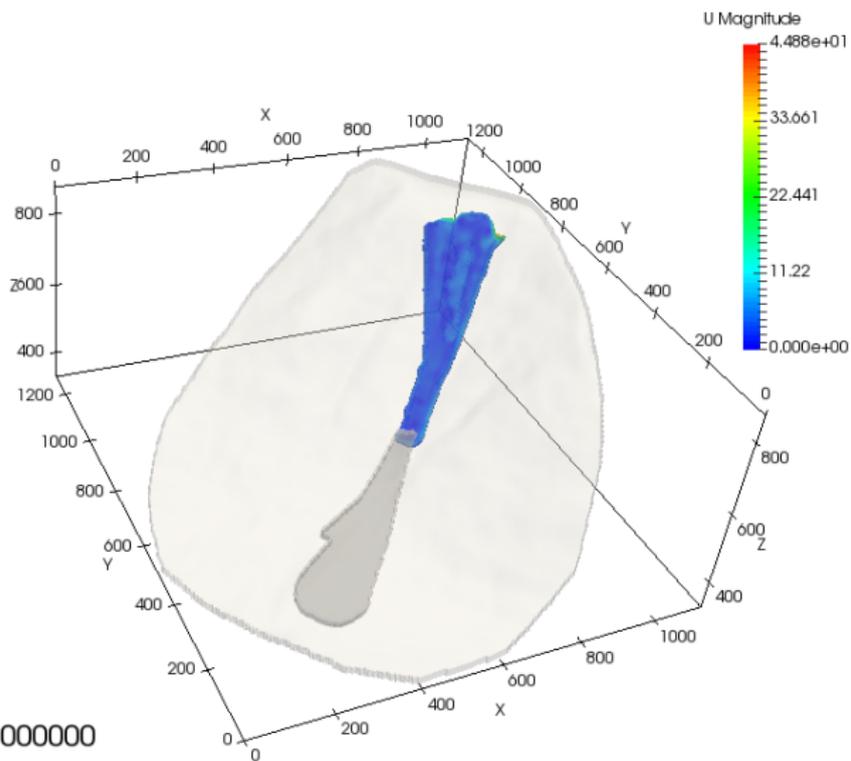
Калибровка



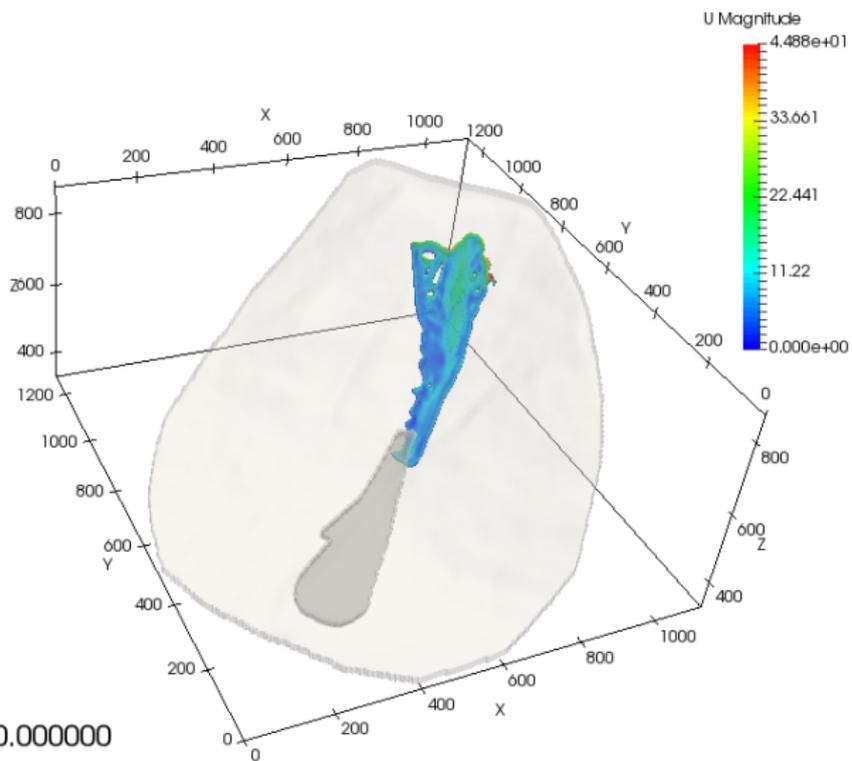
Параметр $\nu_0 = 1e2, 1e5, 1e - 2 \text{ м}^2/\text{с}$ варьируется, $\rho = 200\text{кг}/\text{м}^3$,
 $\tau_0 = 1\text{м}^2/\text{с}^2$, $k = 1e - 4\text{М}^2/\text{с}$, $n = 2$

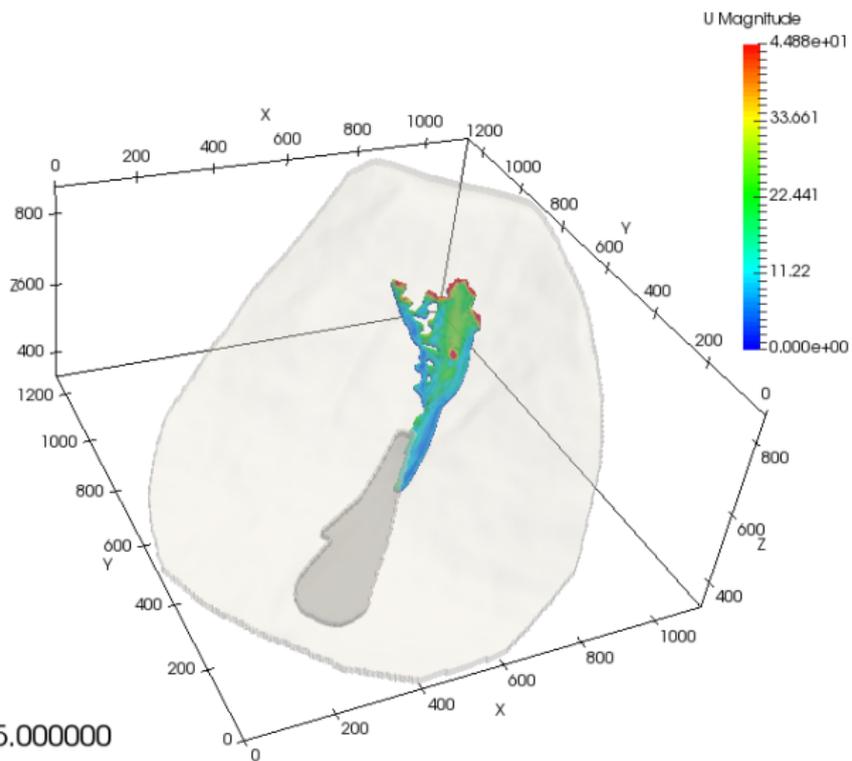
Результат калибровки

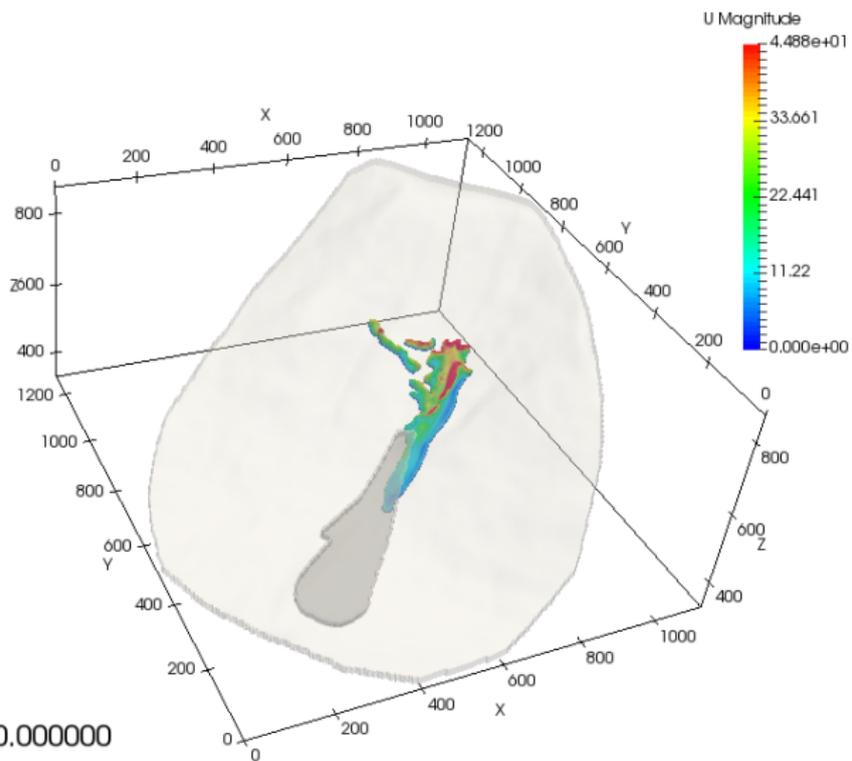
Так как скорости потока в данных калибровочных расчётах составляют в среднем 60 м/с, что много для данной лавины, а параметр вязкости k не влияет на динамику потока, было проведено дополнительное варьирование по параметру k с остальными зафиксированными лучшими параметрами взятыми из предыдущих расчётов. То есть $k = 1e1, 5e1, 1e2, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2 \text{ м}^2/\text{с}$, $\tau_0 = 1e1 \text{ м}^2/\text{с}^2$, $\nu_0 = 1e5 \text{ м}^2/\text{с}$, $\rho = 200 \text{ кг}/\text{м}^3$, $n = 5e - 1$. Расчёт с параметром $k = 5 \text{ м}^2/\text{с}$ наиболее точно описал натурные данные.

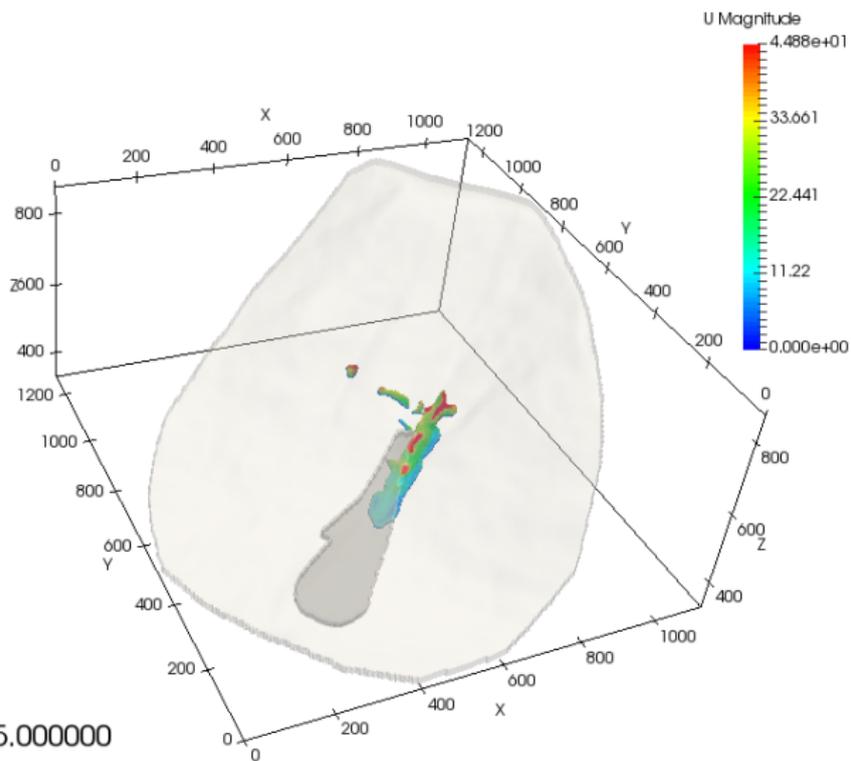


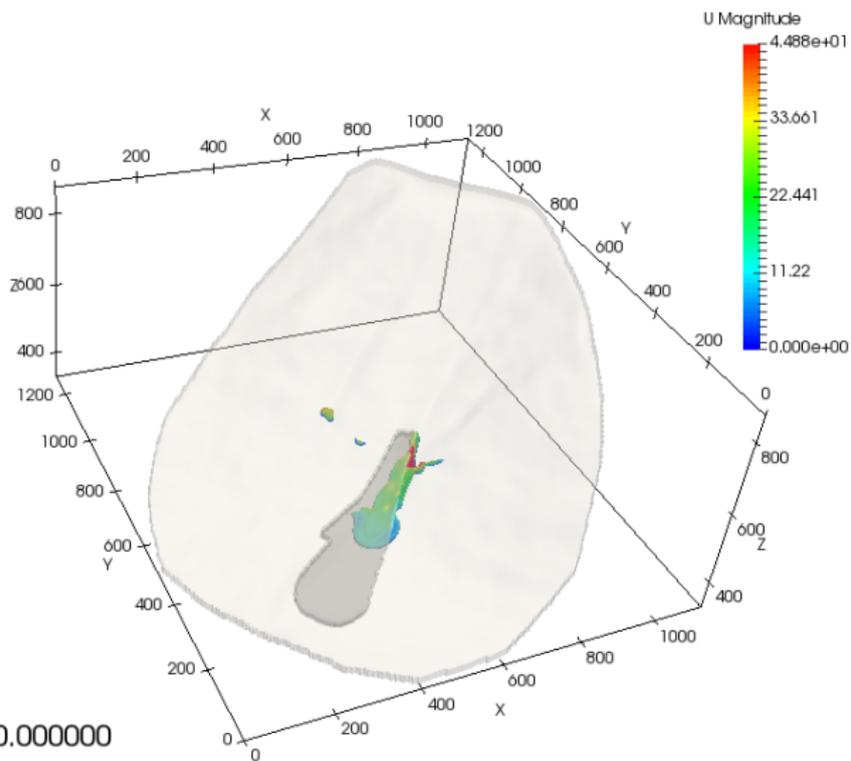
Time: 5.000000

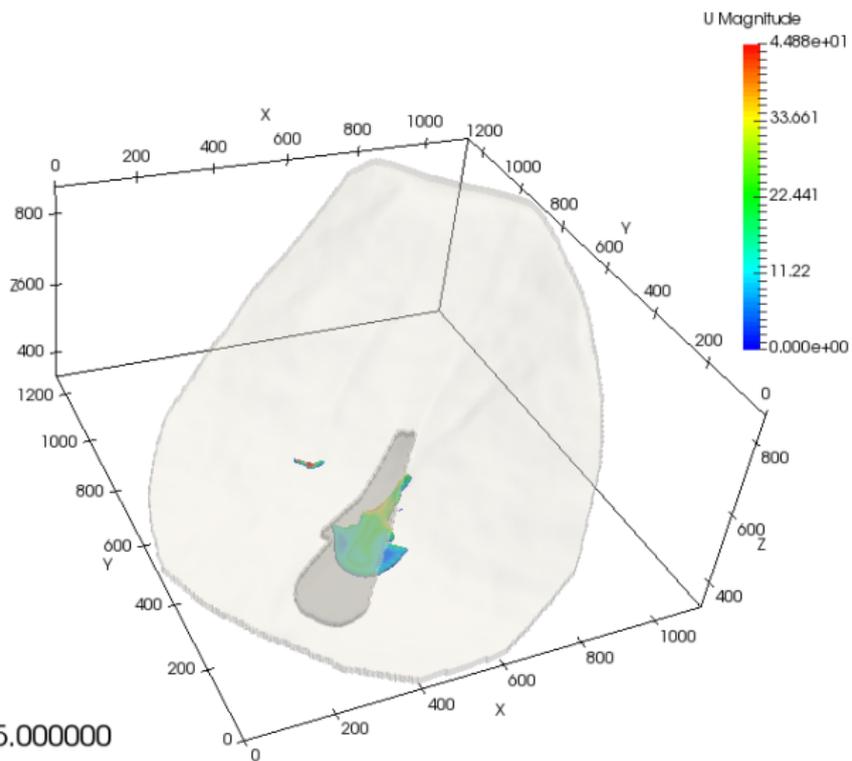


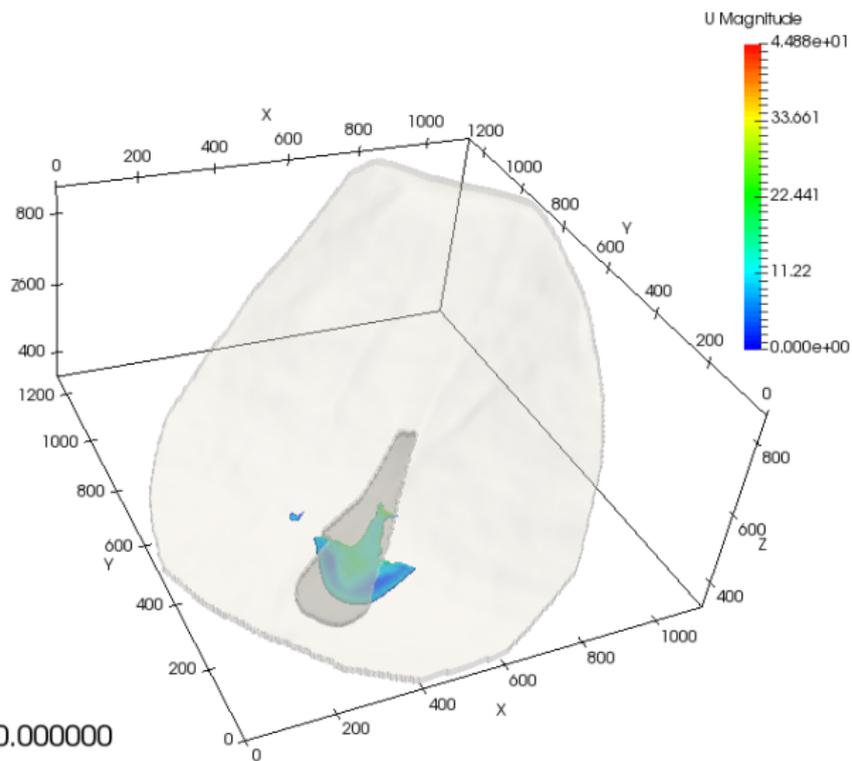


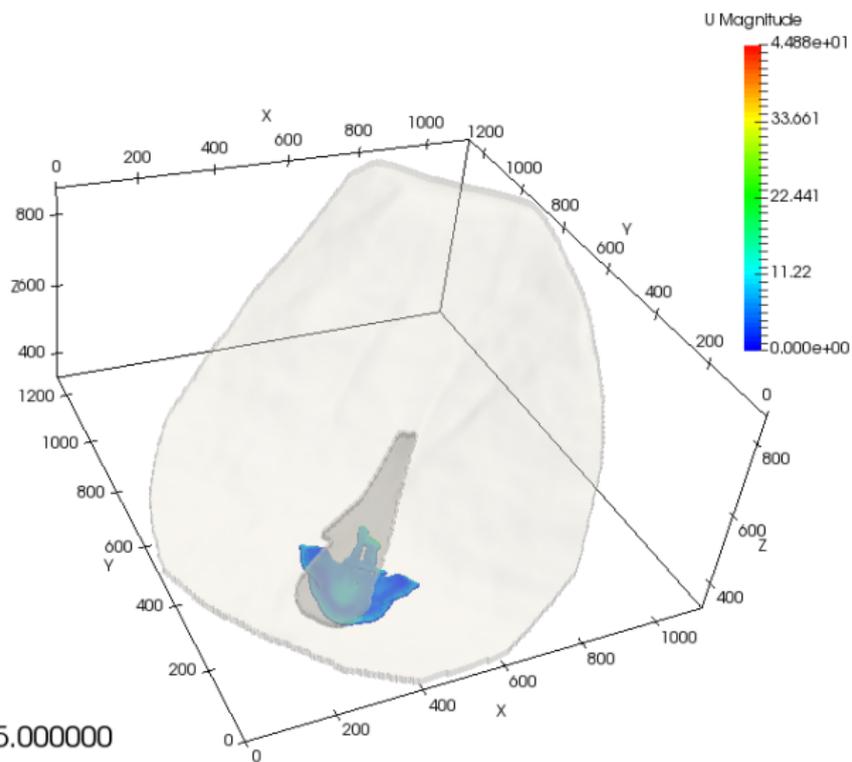




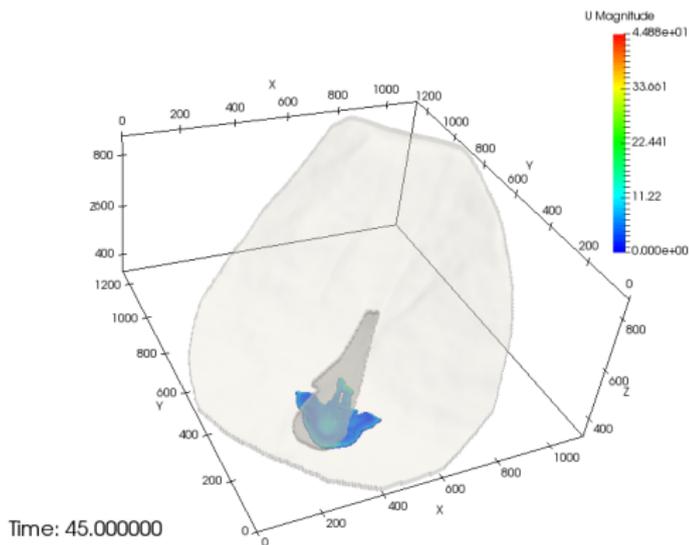








Можем видеть что в данном расчёте после остановки фронт лавины находится на одной линии с фронтом натурной лавины. Максимальная скорость потока составляет 44,8 м/с, средняя 22,4 м/с. Такие значения скорости совпадают с действительными скоростями движения лавин в данном очаге.



Литература

- Эглит М.Э. Лекции по основам механики сплошных сред. - М.:Издательство Московского университета, 2008 г. - 318 с.
- Седов Л.И. Механика сплошной среды том 1. - М., 1970 г., 492 стр. с илл.
- Седов Л.И. Механика сплошной среды том 2. - М., 1970 г., 568 стр. с илл.
- Зюзин Ю. Л. Хибинская лавинада - М.: Полиграф-Книга, 2009. 332 стр.
- Зюзин Ю.Л. Суровый лик Хибин – Мурманск: Реклм. Полиграфия, 2006. 236 с.
- Christopher J. Greenshields, CFD Direct Ltd. OpenFOAM. The Open Source CFD Toolbox. User Guide. - OpenFOAM Foundation Ltd., 2015 - 228 p.
- Henrik Rusche. Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fractions. - Imperial College of Science, Technology and Medicine, Department of Mechanical Engineering, 2002 - 343 p.
- Joel H. Ferziger, Milovan Peric. Computarional Methods for Fluid Dynamics, third, rev. edition. - Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2002 - 431 p.
- www.hibiny.com
- <http://www.openfoam.org/>
- <https://unihub.ru/>
- <http://www.cfd-online.com/>

Спасибо за внимание!

