



Сравнение односкоростной и многоскоростной многофазных моделей для моделирования потоков на склонах

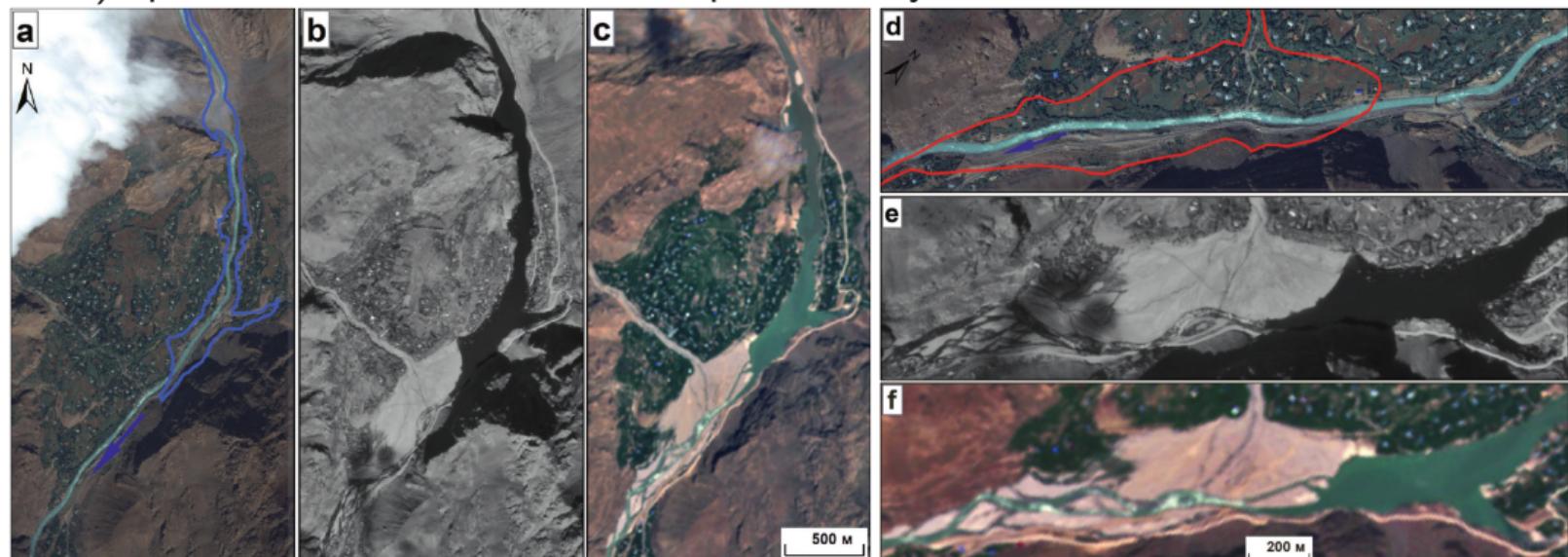
Дарья Романова

Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, Москва
Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

2020

Актуальность

Барсемская селевая катастрофа в июле 2015 года в Таджикистане (Докукин и др. 2019) привела к очень большим материальным убыткам.



Участок Барсемской селевой катастрофы на космических снимках: а, д — снимки со спутника WorldView-2 от 20.09.2012; б, е — снимки со спутника Канопус-В № 1 от 06.10.2015; в, ф — снимки со спутника Sentinel-2A от 07.08.2018 (Докукин и др. 2019)



Заградительные сооружения, Шамони.

Сложность изучения потоков на склонах гор обусловлена их сложными физическими свойствами:

- ▶ материал потока представляет собой неньютоновскую среду, наилучшим образом описываемую реологическими соотношениями Хершеля-Балкли;
- ▶ потоки на склонах гор (снежные лавины, грязекаменные сели и др.) являются турбулентными потоками, для описания течения которых требуется калибровка существующих моделей турбулентности, таких, как $k - \varepsilon$ или $k - \omega SST$;
- ▶ важным свойством потоков на склонах является их способность разрушать подстилающий материал (склон) и вовлекать в движение дополнительную массу, увеличение массы потока в следствии этого процесса может достигать сотни процентов.

Различные подходы

В настоящее время наиболее популярным подходом для моделирования потоков на склонах гор в инженерной отрасли является подход с использованием осреднённых по глубине уравнений механики сплошной среды (уравнений типа мелкой воды). Так же есть различные работы с использованием трёхмерного многофазного подхода, основанного на полных, не осреднённых по глубине, уравнениях механики сплошной среды. Будем рассматривать следующие подходы:

- ▶ рассматривая подход с использованием осреднённых по глубине уравнений механики сплошной среды (уравнений типа мелкой воды), взята реализация в свободно распространяемом пакете с открытым исходным кодом **OpenFOAM — faSavageHutterFoam**,
- ▶ для изучения односкоростного многофазного подхода использовался решатель **interFoam** из пакета OpenFOAM,
- ▶ для изучения многоскоростного многофазного подхода использовался решатель **multiphaseEulerFoam**, который далее был доработан до **nonNewtonianMultiphaseEulerFoam**.

Осреднённый по глубине	Односкоростной многофазный	Многоскоростной многофазный
<p>Преимущества:</p> <ul style="list-style-type: none">▶ вычислительно простой <p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none">▶ даёт осреднённые по глубине параметры потока▶ содержит большое количество эмпирических соотношений и констант, калибровка которых затруднена	<p>Преимущества:</p> <ul style="list-style-type: none">▶ неньютоновская реология▶ турбулентный режим течения <p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none">▶ нет разрушения и захвата материала склона потоком, и для реализации потребуется сетка сверхбольшого размера	<p>Преимущества:</p> <ul style="list-style-type: none">▶ работает на сетках меньшего размера <p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none">▶ нет неньютоновской реологии▶ нет турбулентного режима▶ требуется разработка модели для описания разрушения и захвата материала склона потоком

Математическая модель

Односкоростная многофазная модель

Поток рассматривается как многофазное течение, одна из фаз — воздух, другая — материал потока (снег или грязе-каменная смесь), каждая из фаз считается несжимаемой и обе фазы имеют единую скорость.

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \\ \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \alpha) = 0, \\ \frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{f}. \end{cases}$$

Здесь \mathbf{u} — скорость смеси; α — объёмная доля выбранной фазы; $\boldsymbol{\tau} = 2\mu \mathbf{s}$ — тензор вязких напряжений; $\mathbf{s} = 0.5 [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T]$ — тензор скоростей деформации; ρ — плотность смеси; p — давление; \mathbf{f} — плотность массовых сил.

Математическая модель

Односкоростная многофазная модель

Две несжимаемые и несмешиваемые фазы представлены в вычислительной области некоторой смесью с физическими характеристиками, посчитанными по принципу весового среднего. Используются следующие замыкающие соотношения:

$$\rho = \rho_1 \alpha + \rho_0 (1 - \alpha), \quad \rho_0 = \text{const}, \quad \rho_1 = \text{const},$$

$$\mu = \nu \rho, \quad \nu = \nu_1 \alpha + \nu_0 (1 - \alpha),$$

$$\nu_0 = \text{const}, \quad \nu_1 = \nu_1(\dot{\gamma}) = \min\left(\nu_{ref}, \frac{\tau_{ref}}{\dot{\gamma}} + K \dot{\gamma}^{n-1}\right), \quad \dot{\gamma} = \sqrt{2\mathbf{s} \cdot \mathbf{s}}.$$

Математическая модель

Многоскоростная многофазная модель

Поток рассматривается как многофазное течение, одна из фаз — воздух, другая — материал потока (снег или грязе-каменная смесь), каждая из фаз считается несжимаемой и имеет собственную скорость.

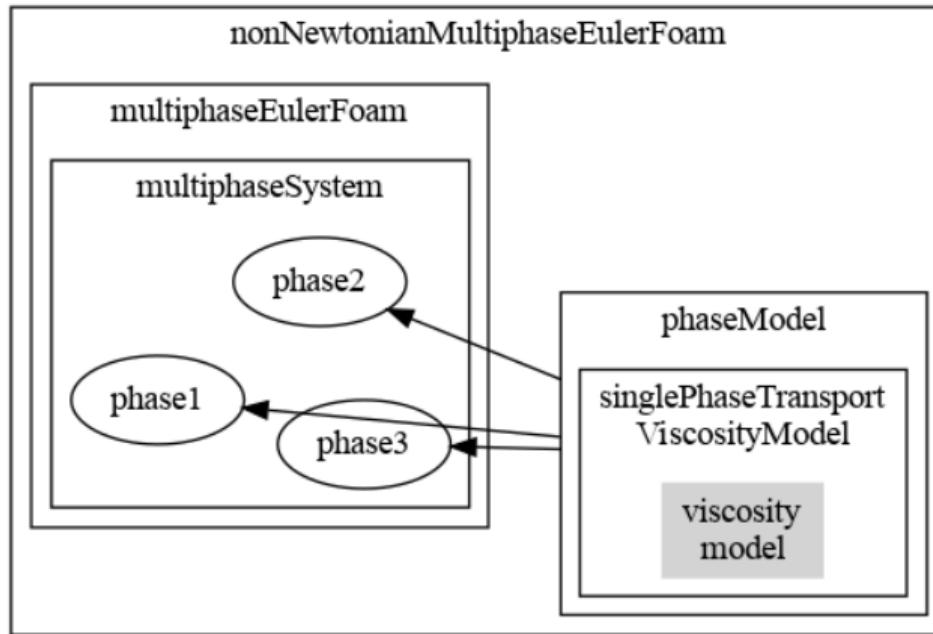
$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{u}_k = 0, \\ \frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}_k \alpha_k) = 0, \\ \frac{\partial(\rho_k \alpha_k \mathbf{u}_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k \alpha_k \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k) = -\alpha_k \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_k \boldsymbol{\tau}_k) + \rho_k \alpha_k \mathbf{f}, \end{cases}$$

Здесь \mathbf{u}_k — скорость k -ой компоненты смеси; α_k — объёмная доля k -ой фазы; $\boldsymbol{\tau}_k = 2\mu_k \mathbf{s}_k$ — тензор вязких напряжений k -ой фазы; $\mathbf{s}_k = 0.5 [\nabla \mathbf{u}_k + (\nabla \mathbf{u}_k)^T]$ — тензор скоростей деформации k -ой фазы; ρ_k — плотность k -ой компоненты смеси; p — давление; \mathbf{f} — плотность массовых сил.

Математическая модель

Многоскоростная многофазная модель

Был разработан решатель **nonNewtonianMultiphaseEulerFoam**, на базе решателя **multiphaseEulerFoam**, позволяющий рассчитывать потоки неьютоновских сред.



Была доработана библиотека **phaseModel**, в неё была включена модель **singlePhaseTransportViscosityModel**, позволяющая использовать различные реологические модели.

В работе для фазы снега используется реологическая модель Хершеля Балкли:

$$\nu = \min(\nu_{ref}, \frac{\tau_{ref}}{\dot{\gamma}} + K\dot{\gamma}^{n-1}).$$

Используется свободно распространяемое программное обеспечение с открытым исходным кодом OpenFOAM, обладающее следующим рядом преимуществ:

- ▶ возможность имплементации новых моделей,
- ▶ хорошая задокументированность,
- ▶ модульное устройство кода,
- ▶ широкое распространение, многочисленность разработчиков и пользователей.

Open△FOAM

Односкоростной многофазный
подход

решатель **interFoam**

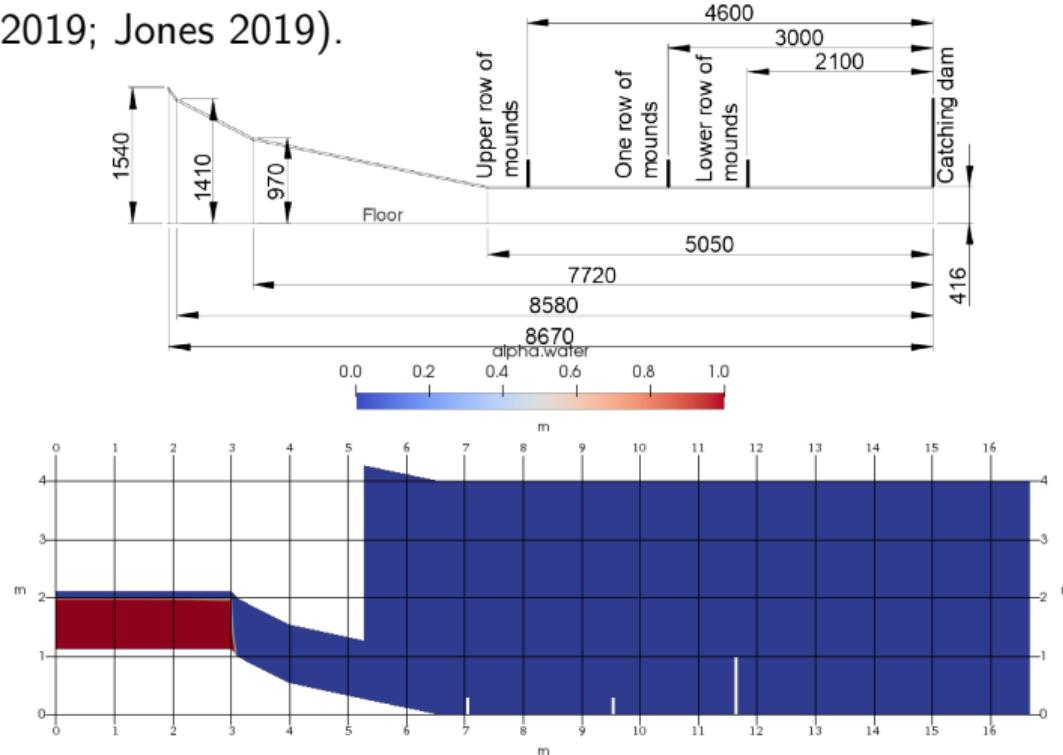
Многоскоростной многофазный подход

решатель **nonNewtonianMultiphaseEulerFoam**

Объект исследования

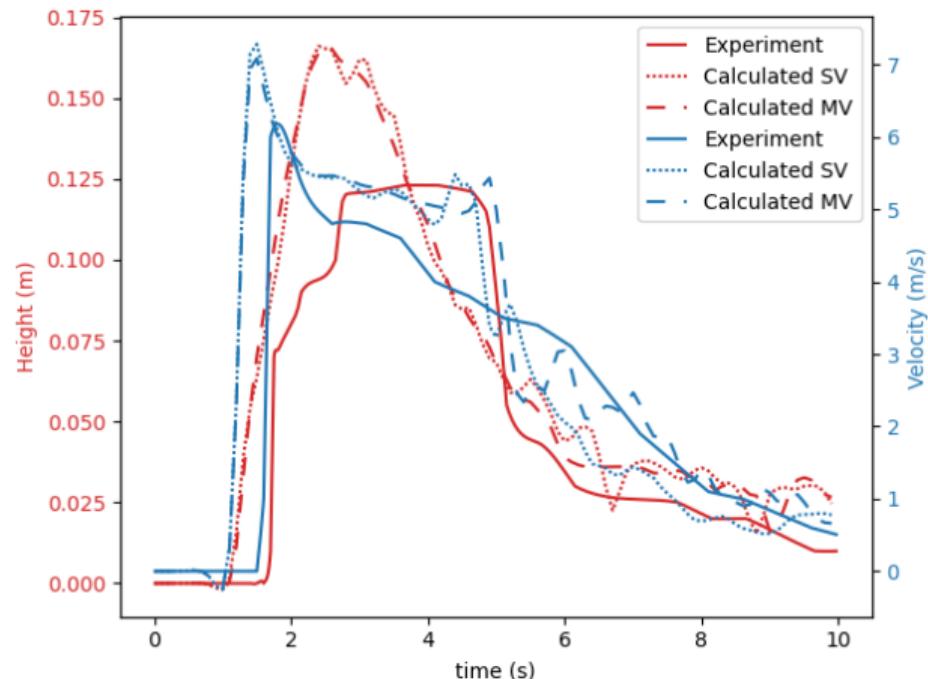
Верификационный эксперимент

Моделируется эксперимент поставленный в Университете Исландии
(Agustsdottir 2019; Jones 2019).



Результаты

Верификационный эксперимент без заграждений



Графики скорости и глубины потока, замеренные на расстоянии 11.1 метра от начала установки для натурного эксперимента (Experiment), вычисленные с помощью решателя interFoam (Calculated SV) и вычисленные с помощью решателя nonNewtonianMultiphaseEulerFoam (Calculated MV).

Результаты

Верификационный эксперимент с тремя дамбами

Сравнение измеренных и рассчитанных параметров потока.

Сравниваемые варианты	Эксперимент	Односкоростная модель	Многоскоростная модель
Высота первоначального всплеска на основной дамбе	1.3 м	2.28 м	0.9 м
Высота потока, переливающегося через дамбу	0.5 м	1.61 м	0.48 м
Средняя высота потока перед основной дамбой до движения волны вверх по потоку	0.4 м	0.41 м	0.34 м
Время взаимодействия потока с основной дамбой	1.25 с	1.5 с	1.9 с
Объём потока, удержаный дамбой из 2.7 м^3	2.684 м^3	2.416 м^3	2.601 м^3

Объект исследования

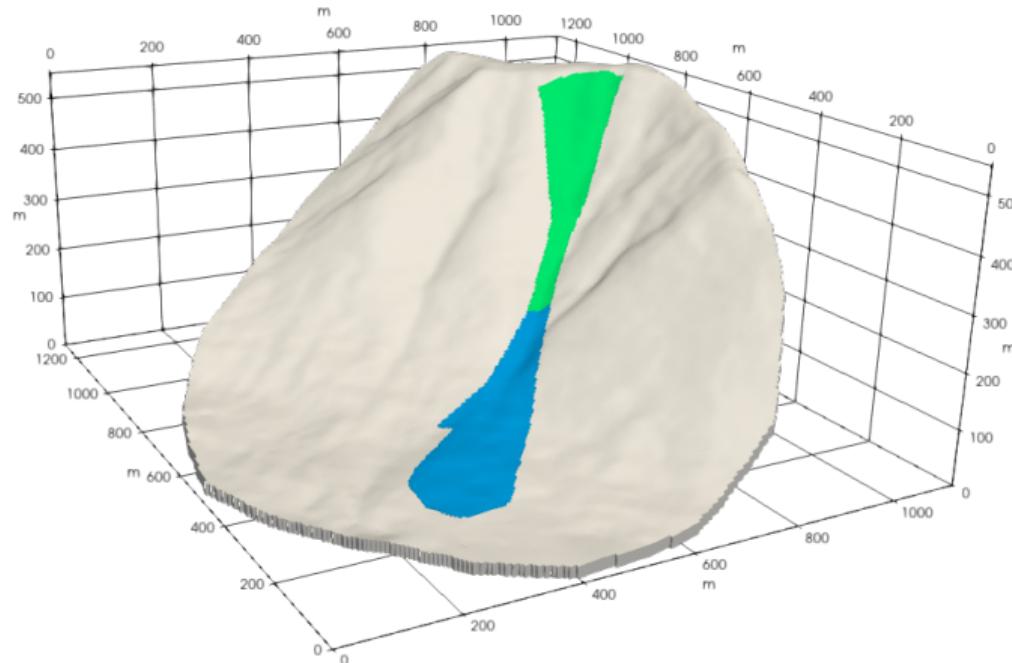
22 лавинный очаг горы Юкспор, Хибины

18 февраля 2016 года искусственно спущенная в данном очаге лавина приобрела катастрофический характер и унесла жизни троих людей, были засыпаны железная и автомобильная дороги, выбиты стёкла в трёх близлежащих домах.



Объект исследования

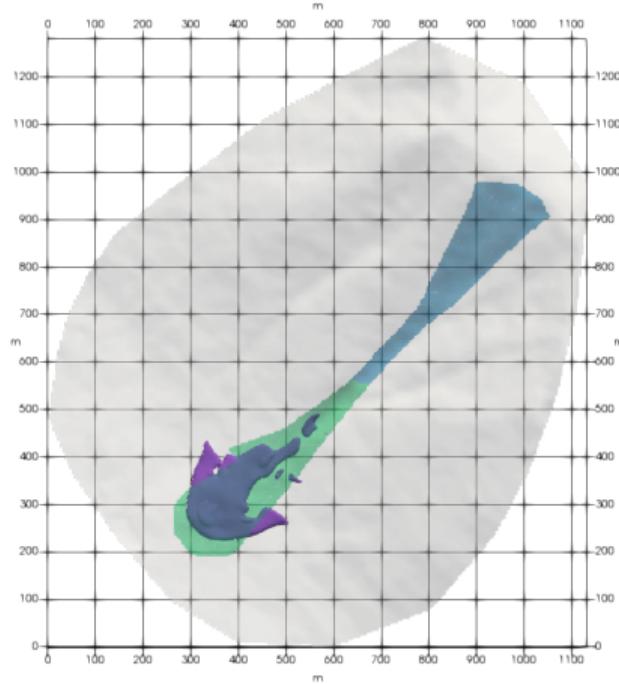
22 лавинный очаг горы Юкспор, Хибины



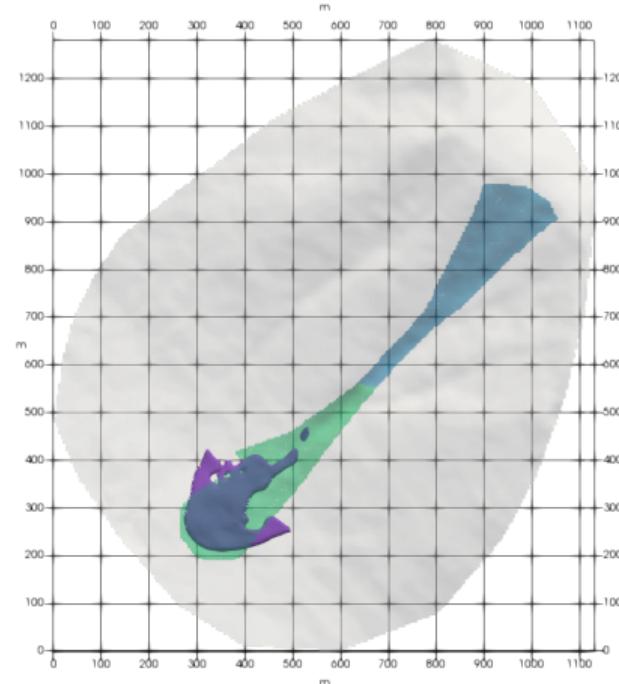
Цифровая модель рельефа 22 лавинного очага с точками замера параметров потока и зонами зарождения лавины (голубой) и лавинных отложений (зелёный).

Результаты

22 лавинный очаг горы Юкспор, Хибины



Расчёт односкоростным
многофазным методом



Расчёт многоскоростным
многофазным методом

- ▶ Проведено моделирование эксперимента со спуском потока в лотке при наличии комплекса заградительных сооружений;
- ▶ Данные вычисления позволяют оценить область применимости каждой из вышеперечисленных моделей;
- ▶ Решения, полученные с использованием решателей *interFoam* и *nonNewtonianMultiphaseEulerFoam*, позволяют рассчитать такие параметры, как скорость потока, плотность, глубина, вязкость, сдвиговое напряжение на дне, все эти параметры важны для расчёта эффективных заградительных сооружений и позволяют заменить более дорогостоящие и трудоёмкие натурные эксперименты численными.

-  Agustsdottir, Katrin Helga (май 2019). "The design of slushflow barriers: Laboratory experiments". дис. док. Haskolaprent, Falkagata 2, 107 Reykjavik, Iceland: Faculty of Industrial Eng., Mechanical Eng., и Computer Science, University of Iceland.
-  Jones, Rebecca Anne (окт. 2019). "The Design of Slushflow Barriers:CFD Simulations". дис. док. Haskolaprent, Falkagata 2, 107 Reykjavik, Iceland: Faculty of Industrial Eng., Mechanical Eng., и Computer Science, University of Iceland.
-  Докукин, Михаил Дмитриевич и др. (2019). "Барсемская селевая катастрофа на Памире в 2015 году и ее аналоги на Центральном Кавказе". в: Геориск 13.1, с. 26—36. ISSN: 1997-8669.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!