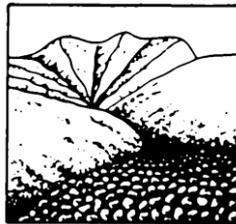


# **DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection**

---

Proceedings  
of the 5<sup>th</sup> International Conference

Tbilisi, Georgia, 1-5 October 2018



Editors  
S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili

---

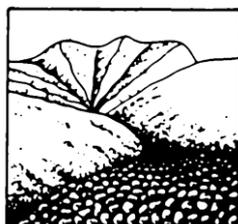
Publishing House “Universal”  
Tbilisi 2018

# **СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита**

---

Труды  
5-й Международной конференции

Тбилиси, Грузия, 1-5 октября 2018 г.



Ответственные редакторы  
С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили

---

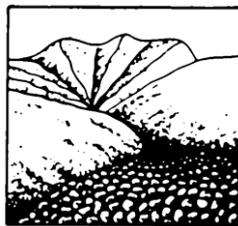
Издательство Универсал  
Тбилиси 2018

# ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა

---

მე-5 საერთაშორისო კონფერენციის  
მასალები

თბილისი, საქართველო, 1-5 ოქტომბერი, 2018



რედაქტორები  
ს.ს. ჩერნომორეც, გ.ვ. გავარდაშვილი

---

გამომცემლობა "უნივერსალი"  
თბილისი 2018

УДК 551.311.8  
ББК 26.823

**Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита.** Труды 5-й Международной конференции. Тбилиси, Грузия, 1-5 октября 2018 г. – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили. – Тбилиси: Универсал, 2018, 671 с.

**Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection.** Proceedings of the 5th International Conference. Tbilisi, Georgia, 1-5 October 2018. – Ed. by S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili. – Tbilisi: Publishing House “Universal”, 2018, 671 p.

**ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა.** მე-5 საერთაშორისო კონფერენციის მასალები. თბილისი, საქართველო, 1–5 ოქტომბერი, 2018. გამომცემლობა "უნივერსალი", თბილისი 2018, 671 გვ. პასუხისმგებელი რედაქტორები ს.ს. ჩერნომორეც, გ.ვ. გავარდაშვილი.

Ответственные редакторы С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили  
Edited by S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili

Верстка: С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева, Е.А. Савернюк  
Page-proofs: S.S. Chernomorets, K.S. Viskhadzhieva, E.A. Savernyuk

При создании логотипа конференции использован рисунок из книги С.М. Флейшмана «Селевые потоки» (Москва: Географгиз, 1951, с. 51).  
Conference logo is based on a figure from S.M. Fleishman’s book on Debris Flows (Moscow: Geografiz, 1951, p. 51).

ISBN 978-9941-26-283-8

© Селевая ассоциация  
© Институт водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава  
Грузинского технического университета

© Debris Flow Association  
© Ts. Mirtskhulava Water Management Institute  
of Georgian Technical University

© ღვარცოფების ასოციაცია  
© საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის  
ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა  
მეურნეობის ინსტიტუტი



## Движение твердой фазы в турбулентном селевом потоке

**К.В. Верховов<sup>1</sup>, С.В. Рыбальченко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ОАУ СТК «Горный воздух», Южно-Сахалинск, Россия,  
*konstantin\_verhovov@mail.ru*

<sup>2</sup>Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Сахалинский филиал,  
лаборатория лавинных и селевых процессов, Южно-Сахалинск, Россия,  
*rybalchenko\_sv@mail.ru*

Селевая масса, вне зависимости от вещественного состава и структурно-реологического типа селя, является гетерогенной грубодисперсной двухфазной системой с твердой фазой в виде минеральных частиц и жидкой дисперсионной средой, представленной селевой суспензией. Поскольку селевая масса одновременно может содержать минеральные частицы различной плотности и крупности по своему агрегатному состоянию она является полиминеральной полидисперсной суспензией. В движущемся селевом потоке присутствует сложная система взаимодействия различных фаз. Авторами рассмотрено движение твердой фазы в турбулентном селевом потоке: седиментация минеральных частиц, взаимодействие движущегося потока и минеральной частицы (в том числе эффект Магнуса), а также взаимодействие минеральных частиц в потоке, на основе которого описаны псевдопластичные свойства турбулентного селевого потока.

*селевой поток, селевая суспензия*

## The motion of the solid phase in a turbulent debris flow

**K.V. Verkhovov<sup>1</sup>, S.V. Rybalchenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Sports and tourist complex "Mountain Air", Yuzhno-Sakhalinsk, Russia  
*konstantin\_verhovov@mail.ru*

<sup>2</sup>Far East Geological Institute of Far Eastern Branch Russian Academy of Science,  
Sakhalin Department, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, *rybalchenko\_sv@mail.ru*

The mud mass, regardless of the material composition and structural-rheological type of the gel, is a heterogeneous coarse-grained two-phase system with a solid phase in the form of mineral particles and a liquid dispersion medium represented by a mud suspension. Since the mudflow mass can simultaneously contain mineral particles of different density and size in its aggregate state, it is a polymineral polydisperse suspension. In the moving debris flow there is a complex system of interaction of different phases. The authors consider the motion of the solid phase in the turbulent debris flow: sedimentation of mineral particles, the interaction of the moving flow and the mineral particle (including the Magnus effect), as well as the interaction of mineral particles in the flow, on the basis of which the pseudo-plastic properties of the turbulent debris flow are described

*debris flow, mud slurry*



## Введение

Диапазон селевых потоков по их консистенции весьма значителен в связи с этим транспортирующей средой для переноса твердой фракции селевой массы может являться вода, водно-грунтовая суспензия или высоконаполненная вязкая глинистая паста [1], этим обуславливается различие в подходах к созданию модели движения селевого потока: с позиции реологии, гидродинамики и т.д. Вне зависимости от типизации селевая масса является гетерогенной (неоднородной) грубодисперсной двухфазной системой с твердой дисперсной фазой (минеральные частицы) и жидкой дисперсионной средой (селевая суспензия).

Во многих случаях для решения прикладных инженерных задач, в том числе в вопросах инженерной защиты, движение селе рассматривается как квазиоднородное течение двухфазного потока, то есть движение твердой фазы и жидкой дисперсионной среды происходит совместно. Стоит отметить, что в модели квазиоднородного течения взаимодействия различных фаз внутри потока не рассматриваются [2]. При использовании данной модели течения селевого потока для расчетов физико-механических и динамических характеристик применяются осредненные по живому сечению величины: скорость, плотность, расход потока и т. д., что позволяет в большинстве случаев получить адекватные результаты расчетов.

Однако при решении специфических задач, особенно относительно селевых потоков движущихся в турбулентном режиме, модель квазиоднородного течения не всегда позволяет получить удовлетворительные результаты. Так, например противоселевые сооружения сквозных селеуловителей в виде стержневых решетчатых или сетчатых конструкций, оказывающих осветляющее действие на селевой поток, могут быть повреждены или разрушены вследствие неупругих деформаций, вызванных динамическими нагрузками при контакте конструкции с твердой фазой селевого потока. В данных случаях возникает необходимость рассмотреть селевой поток с позиции раздельного (расслоенного) движения двух фаз.

Селевые потоки могут иметь различный структурно-реологический тип (связные и несвязные), а также широкий диапазон плотности селевой массы (от 1,1 т/м<sup>3</sup> до 2,5 т/м<sup>3</sup>), обусловленные вещественным составом селеформирующих горных пород. Единовременно селевая масса может содержать минералы различной плотности: от 1,2 т/м<sup>3</sup> для осадочных и свыше 3,1 т/м<sup>3</sup> для магматических и метаморфических горных пород; а также минеральные частицы различных фракций: от 0,005 мм для глинистых минералов до крупных валунов и каменных глыб размером несколько метров в поперечнике. Таким образом, по своему агрегатному состоянию и вещественному составу селевая масса представляет собой полиминеральную полидисперсную суспензию.

Физика, в том числе динамика подобных консистентных сред не всегда может быть описана в рамках физики сплошных сред, поскольку в селевом потоке на границе контакта двух фаз (твердой и жидкой) физические величины (плотность, скорость и т.д.) существенно и скачкообразно меняются, а также присутствует сложная система взаимодействий твердой фазы и жидкой дисперсионной среды:

- оседание (седиментация) минеральных частиц,
- взаимодействие минеральных частиц и движущегося потока,
- взаимодействие частиц в движущемся потоке.

### Оседание минеральных частиц в селевом потоке

Дисперсионная среда, являясь жидкой фазой селевой массы, оказывает гидростатическое воздействие на минеральные частицы твердой фазы. В результате суперпозиции гидростатических сил (силы тяжести  $F_g$  и силы Архимеда  $F_a$ ) происходит оседание (седиментация) минеральных частиц в селевом потоке. Стоит отметить, что данное условие характерно лишь для селевых потоков не высокой плотности, в том числе селевых паводков. В целом рассматривая седиментацию минеральных частиц в селевом

потоке стоит отметить значительное влияние динамической вязкости на процесс оседания.

При увеличении концентрации твердой фазы в селевом потоке растет число и прочность межчастичных контактов. При определенной концентрации твердой фазы (критическая концентрация структурообразования) коагуляционная структура формируется по всему объему селевого потока, селевой поток приобретает связный структурно-реологический тип, который характеризуется ламинарным течением.

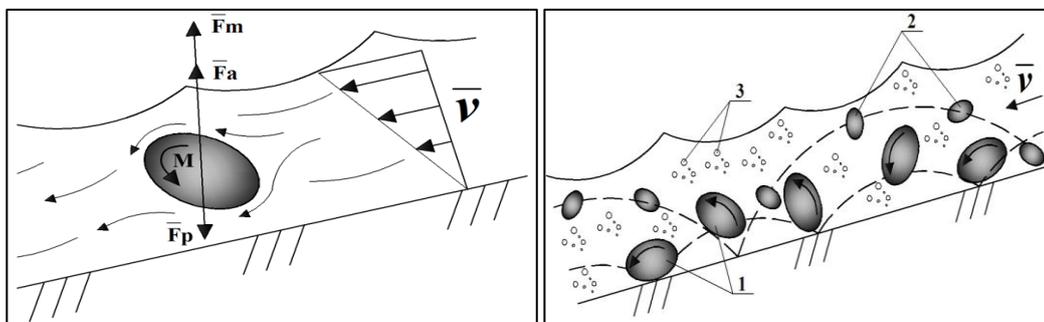
Оседание минеральных частиц (седиментация) в структурированном (связном) селевом потоке протекает в стесненных условиях, в данном случае нарушается закон Стокса.

### Взаимодействие минеральных частиц и движущегося потока

Помимо гидростатического воздействия на минеральные частицы, вызывающего их седиментацию, жидкая дисперсионная среда, движущаяся в селевом потоке, оказывает гидродинамическое воздействие на твердую фазу селевой массы.

Селевой поток, обладая значительной вязкостью, имеет градиент осредненных скоростей по глубине потока  $v$ . На неподвижную частицу рыхлообломочного материала, расположенного на склоне, набегающий поток оказывает давление. Точка приложения данной силы, а также ее направление определяется распределением скорости потока по глубине. Сила  $\mathbf{P}$  в сочетании с силой трения  $\mathbf{F}_{тр}$ , образуют момент сил  $\mathbf{M}$ , вызывающий вращательное движение частицы в направлении потока (рис 3.12).

Вращение частицы в потоке создает вихревое движение, что приводит к появлению эффекта Магнуса. С одной стороны вращающейся частицы направление вихря совпадает с направлением обтекающего потока и, соответственно, скорость движения среды с этой стороны увеличивается. С другой стороны частицы направление вихря противоположно направлению движения потока, и скорость движения среды уменьшается. Ввиду этой разности скоростей возникает разность давлений, порождающая поперечную подъемную силу  $\mathbf{F}_m$ , которая в сочетании с силой Архимеда  $\mathbf{F}_a$  заставляет частицу всплывать в движущемся потоке (рис. 1а).



а)

б)

Рис. 1. а) Суперпозиция сил действующих на минеральную частицу, взвешенную в селевом потоке ( $v$  – градиент скоростей,  $M$  – момент силы трения и градиента скоростей потока,  $F_a$  – сила Архимеда,  $F_m$  – подъемная сила Магнуса). б) Движение минеральных частиц в селевом потоке (1 – крупная фракция; 2 – мелкая фракция; 3 – взвешенные глинистые и пылеватые частицы)

Как только частица оказывается во взвешенном состоянии, сила  $\mathbf{F}_{тр}$  перестает воздействовать на частицу движущиеся в потоке, сила вращательного момента  $\mathbf{M}$  снижается, а вместе с ней и подъемная сила от эффекта Магнуса  $\mathbf{F}_m$ . Частица под действием силы тяжести снова опускается на дно потока. Таким образом, частицы внутри селевого потока двигаются скачкообразно. Длина и траектория их движения зависит от размера, формы и плотности частиц (рис. 1б).

### Взаимодействие частиц в движущемся потоке

Согласно существующей теории контактных взаимодействий реология консистентных сред, в том числе высоконаполненных суспензий с содержанием твердой фазы до 75-80% к которым также можно отнести селевые потоки, рассматривается как результат контактного взаимодействия частиц твердой фазы и образованных ими конгломератных структур и агрегатов.

Дисперсионная среда (жидкая составляющая) селевого потока при движении имеющая градиент скоростей по глубине потока приводит частицы твердой фазы во вращение посредством возникающего момента сил. В свою очередь минеральные частицы, вращаясь, за счет образования контактного слоя и эффекта присоединенной массы - явлений подробно описанных в рамках гидро- и аэродинамики, образуют агрегаты, состоящие из минеральных частиц и «связанной» ими жидкой составляющей в виде поверхностных слоев и надповерхностных вихрей. Количество «свободной» не заключенной в агрегаты дисперсионной среды, а также ее вязкость определяет вязкость всего потока (рис. 2а).

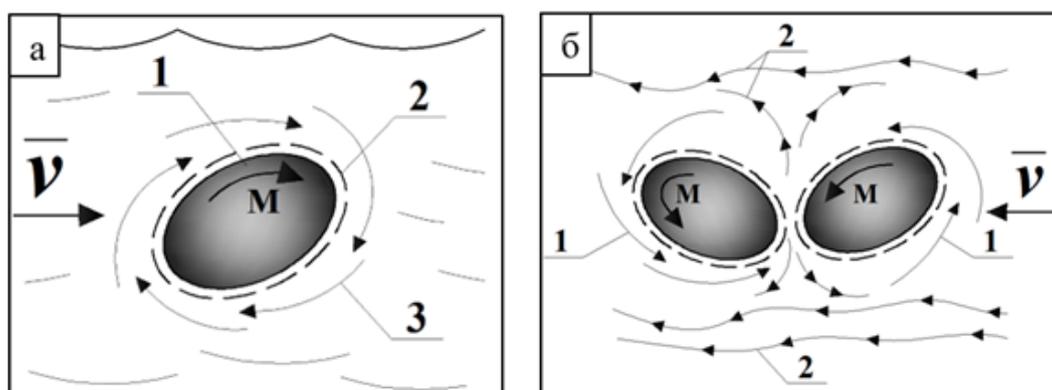


Рис. 2. а) Строение агрегата в потоке ( $v$  – движение потока,  $M$  – момент вращения минеральной частицы; 1 – минеральная частица; 2 – контактный слой; 3- присоединенная масса жидкой фазы). б) Разрушение агрегатов при контактных взаимодействиях минеральных частиц в потоке (1 – жидкая фаза, связанная в агрегатах; 2 – жидкая фаза в свободной форме).

Минеральные частицы, движущиеся в селевом потоке, обладая различными плотностями и крупностью, имея в связи с этим различные скорости движения в потоке, активно вступают в контактные взаимодействия, чему также способствует их перемещение по глубине потока в связи с оседанием и эффектом Магнуса.

В процессе движения селевого потока постоянно происходят контактные взаимодействия, в результате которых разрушаются и образуются новых агрегаты. По этой причине количество «свободной» жидкой составляющей в селевом потоке величина переменная.

При контактном взаимодействии частицы, соударяясь, минеральные частицы высвобождают связанную в агрегатах жидкую составляющую, увеличивая ее общее количество в селевом потоке в свободной форме (рис. 2б).

Таким образом, согласно теории контактных взаимодействий увеличение объема твердой фазы в селевом потоке способствует снижению количества «свободной» жидкой составляющей и увеличивает вязкость потока. Увеличение числа контактных взаимодействий, которое может быть вызвано ростом скорости потока или увеличением градиента скоростей, напротив приводит к образованию большого количества «свободной» жидкой составляющей и снижению вязкости потока.

Данные зависимости, высказанные с позиции теории контактных взаимодействий, укладываются в общую картину динамики селевого потока, который при определенных режимах течения проявляет свойства псевдопластичности, то есть вязкость его значительно зависит от скорости движения.



Стоит отметить, что некоторые особенности физики высоконаполненных суспензий, к которым также можно отнести селевые потоки на основе их агрегатного состояния, не могут быть описаны в рамках теории контактных взаимодействий. Так широко известен феномен снижения вязкости суспензий бимодального фракционного состава твердой фазы. В результате лабораторных опытов выявлено, что при определенном соотношении крупной и мелкой фракции вязкость суспензии может значительно снижаться по сравнению с суспензией аналогичной по объемному содержанию твердой фазы, но обладающей монофракционным составом. Аналогичный феномен наблюдается при лабораторных измерениях кинематической вязкости суспензий сходных по объемному содержанию твердой фазы, но различных по фракционному составу. Суспензия, имеющая более мелкую фракцию твердой фазы, обладает более низкой вязкостью, что противоречит теории контактных взаимодействий, поскольку снижение фракции твердой фазы при неизменной ее концентрации значительно увеличивает площадь активной поверхности и контактного слоя, а соответственно и объем связанной в агрегатах жидкой составляющей. Возможно, аналогичные феномены могут быть присущи и селевой массе, однако до настоящего времени эффективные измерения кинематической вязкости селевой массы в лабораторных условиях не проводились.

### Выводы

Стоит отметить, что до настоящего времени общей формулы, описывающей теорию контактных взаимодействий, не существует, не смотря на ее широкое применение для решения инженерных задач. В данном случае используется ряд эмпирических формул, полученных на основе опытных измерений для конкретных условий. Ни в одной работе не измерены непосредственно ни прочность контактов частиц в суспензии, ни их координационное число. Напротив, они вычислены для каждой обсуждаемой модели обратным подсчетом из измерений реологических параметров суспензий. Таким образом, соответствие экспериментальным измерениям всех построенных на контактных взаимодействиях теоретических моделей реологии суспензий фактически постулировано. Обратная задача - построение теоретической модели на основе реально измеренных или вычисленных сил взаимодействия частиц, в частности измеренной непосредственно прочности коагуляционных и другого рода контактов частиц, до сего времени не решена.

### Список литературы

- Флейшман С.М. (1978). Сели. Л., Гидрометеиздат, 312 с.  
Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И. (2007). Основы динамики селей. Академия наук Грузии. Институт водного хозяйства.  
Перов В.Ф. (2012). Селеведение. Учебное пособие. М., Географический факультет МГУ, 271 с.  
Ходаков Г.С. (2003). Реология суспензий. Теория фазового течения и ее экспериментальное обоснование. Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), XLVII(2) 33–44.