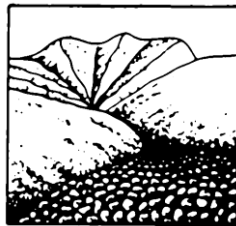


# **DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection**

---

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

Tbilisi, Georgia, 1-5 October 2018



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

---

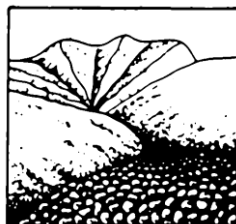
Publishing House “Universal”  
Tbilisi 2018

# **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

---

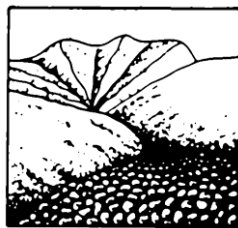
Издательство Универсал  
Тбилиси 2018

# 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



## Отличие склоновых селей от других склоновых экзогенных процессов

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

<sup>1</sup>*Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Сахалинский филиал, лаборатория лавинных и селевых процессов, Южно-Сахалинск, Россия, rybalchenko\_sv@mail.ru*

<sup>2</sup>*ОАУ СТК «Горный воздух», Южно-Сахалинск, Россия, konstantin\_verhovov@mail.ru*

Склоновые сели зачастую образуются путем развития сдвигового и эрозионно-сдвигового селевого процесса и не всегда однозначно могут быть отнесены к процессам флювиального характера. Наиболее генетически близкими склоновыми экзогенными процессами являются оползни вязкопластического течения. Однако, стоит отметить, что склоновые сели отличаются рядом признаков: высокими скоростями, разрушенной структурой материала в потоке, динамическим воздействием на препятствие, отсутствием генетической связи подстилающей поверхности с движущимся потоком. Движущей средой в селевом потоке является селевая суспензия, даже при значительном содержании твердого материала в потоке (до 70%). Наличие жидкого агента переноса минеральных частиц обуславливает ряд особенностей динамики селевого потока: наличие динамической вязкости, (уменьшающейся с увеличением скорости потока), плавучесть отдельных конгломератов, многократную переупаковку твердых частиц, которая может приводить к значительной бурности потока и т.д. Агрегатное состояние селевой массы обуславливает отличие селевых потоков от генетически близких склоновых экзогенных процессов.

*селевой поток, оползень, эрозия, селевая суспензия*

## The difference of slope debris flows from other exogenous processes

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

<sup>1</sup>*Far East Geological Institute of Far East Branch of Russian Academy of Science, Sakhalin Department, laboratory of Avalanche and Debris-flow Processes, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, rybalchenko\_sv@mail.ru*

<sup>2</sup>*Sports and tourist complex "Mountain Air", Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, konstantin\_verhovov@mail.ru*

Slope debris flows are often formed by the development of shear and erosion-shear debris flow process and not always unambiguously can be attributed to the process of fluvial character. The most genetically similar sloping exogenous processes are landslides of the viscoplastic flow. However, it is worth noting that the slope debris flows is characterized by a number of features: high speeds, the destroyed structure of the material in the flow, the dynamic impact on the obstacle, the lack of genetic connection of the underlying surface with the moving flow. The driving medium in the debris flow is the mud slurry, even with a significant content of solid material in the flow (up to 70%). The presence of a liquid transfer agent of mineral particles causes a number of features of the dynamics of the debris flow: the presence of dynamic viscosity (decreasing with increasing flow rate),



the buoyancy of individual conglomerates, multiple repackaging of solid particles, which can lead to significant flow turbulence, etc. the Aggregate state of the mud mass causes the difference of debris flows from genetically close slope exogenous processes.

*debris flow, landslide, erosion, mud slurry*

## Введение

Склоновые сели встречаются повсеместно, где существуют условия для развития склоновых экзогенных процессов: литологический состав горных пород, высокая энергия рельефа, большое количество и интенсивность атмосферных осадков. География их распространения простирается от экваториального пояса вплоть до субарктических широт. Склоновые селевые потоки регистрируются не только в горной местности, но и в условиях низкогорья, а также на равнинах: низких склонах и террасах, в том числе на урбанизированных территориях, антропогенно измененных и техногенных склонах выемок и насыпей (котлованах, отвалах и терриконах). Стоит отметить, что интерпретация склоновых селей как геодинамических процессов присущих определенным типам рельефа местности или географическим областям совершенно не верна.

Несмотря на повсеместное распространение, склоновые сели представляют собой одну из малоизученных форм гравитационного движения материала, и долгое время не рассматривались как отдельный тип склоновых экзогенных процессов, а большинство случаев селеформирования интерпретировались, как генетически близкие склоновым селям геодинамические процессы: оползни, оползни-потоки, осыпи и др. [Рыбальченко, Верховов, 2017].

Вопрос отличия склоновых селей от других склоновых экзогенных процессов является краеугольным камнем в понимании природы данного явления.

### Склоновые сели и генетически близкие склоновые экзогенные процессы

Тесная взаимосвязь склоновых селей с другими склоновыми экзогенными процессами обусловлена несколькими обстоятельствами:

- парагенетическим характером течения склоновых экзогенных процессов;
- различными генетическими типами отложений, одновременно являющимися очагами твердого питания различных склоновых экзогенных процессов;
- взаимной трансформацией различных склоновых экзогенных процессов при самоорганизации диссипативных структур.

Как правило, склоновые селевые бассейны представлены мелкими эрозионными и денудационными формами рельефа (промоинами, денудационными воронками, оврагами, врезами и др.) и имеют углы продольного уклона равные или превышающие угол внутреннего трения вмещающих горных пород. Это обуславливает развитие в пределах селевого бассейна одновременно различных склоновых экзогенных процессов (оползней, осыпей, селей и др.) и парагенетическим характером их течения. При активном развитии склоновых процессов в пределах одного бассейна на конусе выноса может прослеживаться переслаивание различных генетических типов отложений: коллювиальных, делювиальных, а также нескольких пачек селевых (пролювиальных) отложений (рис. 1), что свидетельствуют о парагенетическом характере течения склоновых экзогенных процессов [Перов, 2012].

Различные генетические типы отложений (элювиальные, делювиальные, коллювиальные и пролювиальные) могут отмечаться не только на конусе выноса склонового селевого бассейна, но и в зоне транзита и зарождения. Таким образом, различные генетические типы отложений в пределах одного склонового селевого

бассейна могут являться очагами твердого питания различных склоновых экзогенных процессов (селей, оползней, курумов, осыпей и т.д.).

Стоит отметить, что в склоновых селевых бассейнах на фоне превышения продольных уклонов над углом внутреннего трения горных пород, слагающих потенциальный селевой массив, повсеместно развиты сдвиговый и эрозионно-сдвиговый селевые процессы. Таким образом, формирование склоновых селей зачастую происходит при трансформации других склоновых экзогенных процессов.

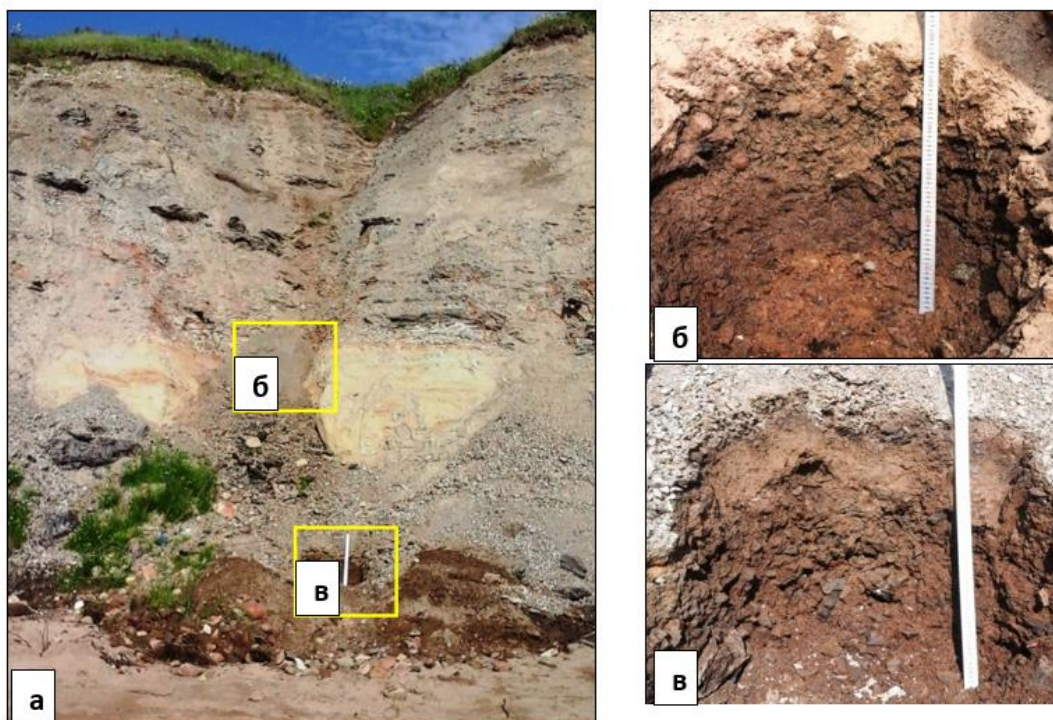


Рис. 1. а) Склоновый селевой бассейн на морской террасе с парагенетическим течением склоновых экзогенных процессов. б) Несортированные пролювиальные отложения в вершине конуса выноса. в) Частично сортированные слоистые пролювиальные отложения в нижней части конуса выноса, перекрытые тонким слоем коллювия. Фото С. В. Рыбальченко.

При сдвиговом селевом процессе происходит потеря устойчивости на склоне потенциального селевого массива рыхлообломочных горных пород, его дальнейшее движение, разрушение структуры, обводнение и вовлечение в селевой процесс. Начальная стадия сдвигового селевого процесса характеризуется гравитационным (оползевым) движением потенциального селевого массива.

При эрозионно-сдвиговом селевом процессе в результате достижения водным потоком размывающих скоростей происходит размыв потенциального селевого массива рыхлообломочных горных пород и дальнейшее его вовлечение в селевой процесс. Начальная стадия эрозионно-сдвигового селевого процесса характеризуется активной линейной водной эрозией.

Также отмечены множественные случаи формирования склоновых селевых потоков при движении вязкопластичных оползней-потоков. При увеличении скорости движения оползня-потока происходит разрушение его структуры, уменьшение общей вязкости и снижение генетической связи с поверхностью скольжения, далее вовлечение оползневого тела в селевой процесс. Начальная стадия селевого процесса в данном случае характеризуется вязкопластичным реологическим движением потенциального селевого массива.

Несмотря на различные механизмы зарождения склоновых селей, путем трансформации других склоновых экзогенных процессов, формирующиеся склоновые сели обладают всеми характерными чертами движения селевых потоков: высокой



транспортирующей способностью, относительно низкой динамической вязкостью, волновым характером движения и т.д.

Стоит отметить, что механизм и причины трансформации склоновых селей из других склоновых экзогенных процессов до сих пор не изучен, и представляет огромный эвристический интерес. Существует значительное количество характеристик и физических величин (характер движения, плотность, скорость и т.д.) позволяющих идентифицировать начальную фазу формирования склонового селя (оползень, эрозию или оползень-поток) и активную фазу, собственно селевой поток, но точки их бифуркации (фазового перехода) до сих пор не определены. Так движение оползней-потоков происходит при скоростях не более 1-2 м/с, при скоростях свыше 4 м/с происходит качественный скачкообразный переход к селевому характеру движения.

Отдельные исследования относительно точек бифуркации селевого потока определяют их наличие в связи со свойством селевого потока к самоорганизации [Казakov, 2000]. Исходя из данной точки зрения, селевые потоки можно отнести к диссипативным самоорганизующимся структурам.

Диссипативные структуры отличаются от равновесных тем, что для своего существования они требуют постоянного притока энергии извне, так как по определению, их самоорганизация связана с обменом энергией и веществом с окружающей средой. Данное предположение позволяет определить причины фазового перехода внутри селевого потока, в частности возникновение его из других склоновых экзогенных процессов.

#### **Отличие склоновых селей от генетических близких склоновых экзогенных процессов**

В отличие от селей обвалы, осыпи и подвижные курумы представляют собой движение продуктов разрушения горных пород по склону без участия водной составляющей. Движение это происходит не в виде течения, а в виде смещения твердых (сыпучих) тел. Оползни, оплывины и увлажненные осыпи характеризуются движением в виде течения, но происходит оно путем сползания с малыми скоростями порядка нескольких миллиметров или сантиметров в секунду, час, сутки), в то время как движение селевых масс происходит со скоростями порядка нескольких метров в секунду [Флейшман, 1978].

Наиболее генетически близкими геодинамическими процессами к склоновым селям, являются оползни вязкопластического течения. Однако, несмотря на преимущественно оползневой механизм зарождения склоновых селей, характер движения селевой массы и её гораздо более высокая скорость значительно отличается от движения оползневого тела. Движущей средой в селевом потоке является вода, а точнее селевая суспензия, даже при значительном содержании твердого материала в потоке (до 70%). Наличие жидкого агента переноса минеральных частиц обуславливает ряд особенностей динамики селевого потока: наличие динамической вязкости, (уменьшающейся с увеличением скорости потока), плавучесть отдельных конгломератов, многократную переупаковку твердых частиц, которая может приводить к значительной бурности потока и т.д.

По своему агрегатному состоянию селевая масса является полиминеральной полидисперсной суспензией, поскольку одновременно может содержать минеральные частицы различной плотности и крупности. Физика подобных консистентных сред значительно отличается от физики жидкостей, реологических и твердых тел, в том числе сыпучих. Агрегатное состояние селевой массы обуславливает отличие селевых потоков от генетически близких склоновых экзогенных процессов.

Селевая масса обладает псевдопластичностью – свойством, при котором вязкость уменьшается при увеличении напряжения сдвига (скорости движения). Это происходит при взаимодействии внутри потока твердых частиц покрытых водными оболочками, соударяясь и высвобождая связанную воду они, таким образом, увеличивают жидкую составляющую потока и снижают его вязкость. В оползневом реологическом теле



транспортирующая среда это конгломерат грязекаменной массы с содержанием воды 10-20%. Оползни течения обладают свойством дилатантности. При увеличении скорости движения, переупаковывающиеся твердые частицы образуют множество пор, которые не успевают заполнять жидкость, в результате чего трение между твердыми частицами увеличивается, и вязкость потока растет.

Еще одной отличительной чертой селевого потока является его волновой характер движения и наличие в переднем фронте крупной селевой волны (головы селея). Характер движения твердой фракции в селевом потоке, определяется суперпозицией сил, воздействующих на твердые частицы, длина и траектория их движения зависит от размера, формы и плотности частиц (рис. 2).

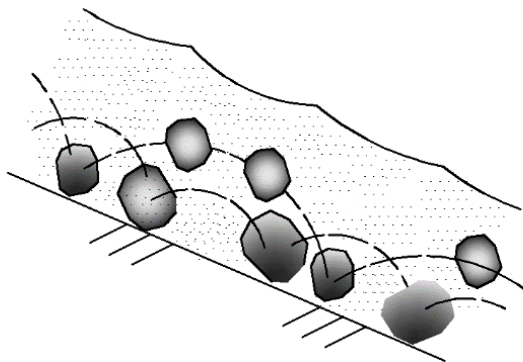


Рис. 2. Траектории движения в потоке частиц рыхлообломочного материала различной крупности и плотности.

В отличие от селевых потоков, оползни течения не имеют волнового характера движения, поверхность оползневого тела бугристая, а высота их переднего фронта не отличается от общей «глубины потока» (мощности оползневого тела).

Оползни-потоки, оплывины, увлажненные осыпи характеризуются движением в виде ламинарного течения с небольшими скоростями: порядка нескольких миллиметров или сантиметров в секунду, час, сутки, движение селевых потоков происходит при скоростях порядка нескольких метров или десятков метров в секунду [Флейшман, 1978].

Структура оползневого тела в процессе движения, как правило, не разрушается, и содержит множество крупных конгломератов даже при обвальном-оползневом движении. Движение оползневого тела происходит по генетически связанной поверхности скольжения.

В придонных частях оползней-потоков за счет силы трения о поверхность скольжения наблюдается значительное снижение скорости движения, что приводит к взаимному параллельному смещению отдельных слоев и конгломератов (рис. 3).

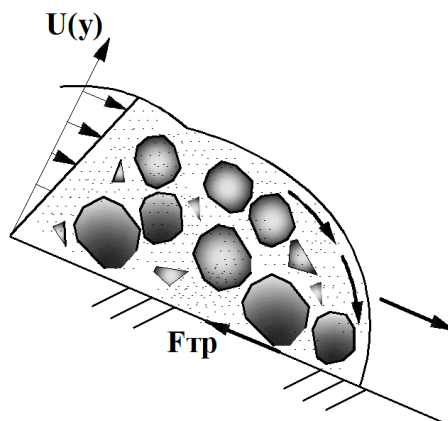


Рис. 3. Схема движения оползня течения.



Движение селевых потоков имеет значительно бурный характер и приводит к образованию предельно разрушенной структуры материала внутри потока. При турбулентных режимах движения внутри селевого потока происходит активное перемешивание твердых частиц. Генетическая связь с поверхностью скольжения при движении селевого потока практически отсутствует.

По-разному взаимодействуют селевые потоки и оползневые тела с подстилающей поверхностью скольжения. Селевой поток, обладая значительной эродирующей способностью, увеличивает глубину расчленения рельефа посредством глубинной и боковой эрозии. Оползневые тела, в особенности оползни течения, сглаживают и нивелируют рельеф.

Стоит отметить, что оползни действуют на преграды путем давления, селевые потоки - путем удара. Целесообразно считать блоковые оползни продуктом скольжения и пластического движения – ползучести, а селевые потоки – продуктом течения жидкости.

Селевой поток, обладая высокими скоростями и волновым характером движения, оказывает значительные динамические и пульсационные нагрузки на препятствия. Стремительный рост давления при взаимодействии переднего фронта селевого потока с препятствием приводит к высоким скоростям деформации и развитию неупругих деформаций, что может привести к разрушению даже при незначительной величине давления. Пульсационные нагрузки при прохождении селевого потока через препятствие, обусловленные волновым характером движения селея, также способствуют значительному росту скоростей деформации.

В отличие от селей оползни течения оказывают на препятствие статическое давление.

Таким образом, при эквивалентном оползневом и гидродинамическом давлении на одно и то же препятствие в равных условиях, селевой поток будет обладать более разрушительным воздействием.

### Выводы

Тесная взаимосвязь склоновых селей с другими склоновыми экзогенными процессами обусловлена несколькими обстоятельствами: парагенетическим характером течения склоновых экзогенных процессов; различными генетическими типами отложений, одновременно являющимися очагами твердого питания различных склоновых экзогенных процессов; взаимной трансформацией различных склоновых экзогенных процессов при самоорганизации диссипативных структур.

От других склоновых экзогенных процессов (обвалов, осыпей, оползней и др.) склоновые селевые потоки отличаются предельно разрушенной структурой материала в потоке, высокими скоростями и волновым характером движения, ударным воздействием и пульсационной нагрузкой на препятствие, отсутствием генетической связи подстилающей поверхности с движущимся потоком и т.д.

По своему агрегатному состоянию селевая масса является полиминеральной полидисперсной суспензией. Именно агрегатное состояние селевой массы обуславливает отличие селевых потоков от генетически близких склоновых экзогенных процессов.

### Список литературы

- Казаков Н.А. (2000). Геологические и ландшафтные критерии оценки лавинной и селевой опасности при строительстве линейных сооружений (на примере о. Сахалин). Дисс. канд. геол.-мин. наук. М., Деп. ВЦНТИ, 216 с.
- Перов В.Ф. (2012). Селеведение. Учебное пособие. М., Географический факультет МГУ, 272 с.
- Рыбальченко С.В., Верховов К.В. (2017). Склоновые селевые бассейны и их морфодинамические особенности. Геориск, 4: 44-49.
- Флейшман С.М. (1978). Сели. Л., Гидрометеоздат, 312 с.