

УДК 532(075.8)

DOI 10.23671/VNC.2019.1.27287

К ПРОБЛЕМЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГЛЯЦИАЛЬНЫХ СЕЛЕЙ

И.Д. Музаев*, В.Г. Созанов**

Аннотация. В статье рассмотрены особенности формирования гляциального селевого потока. Установлены критериальные условия устойчивости (неустойчивости) ледникового массива с учетом сейсмического воздействия на ледниковый массив. Приведены сведения о гляциальных селевых потоках. Разработки, описанные в статье, позволяют оценить опасность возникновения гляциального селевого потока при различных физико-географических условиях.

Ключевые слова: гляциальный селевой поток, разрушающее напряжение льда, касательное напряжение, шкала Рихтера-Меркали, критериальное условие устойчивости.

ВВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМУ ГЛЯЦИАЛЬНЫХ СЕЛЕЙ. НЕКОТОРЫЕ НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ ГЛЯЦИАЛЬНЫЕ СЕЛИ И ИХ ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В начале приведем описание некоторых гляциальных селей, описанных в разных литературных источниках.

Один из самых грандиозных гляциальных селей сошел в Перу 10 января 1962 г. в верховьях р. Санти в результате срыва с высоты 6 655 м части карниза ледника Уаскаран высотой около 100 м. Сорвавшаяся часть ледникового языка имела площадь до 20 га. Поток гляциального селя, состоящий из глыб льда и скал, имея высоту от 60 до 120 м, прошел за 10 минут отрезок, равный 16 км, со скоростью 100 км/ч, уничтожив ряд селений и разрушив на конусе поселок Ранраирки.

Катастрофические гляциальные сели имели место в Перу и в мае 1970 года. В результате сильного землетрясения с северной вершины Уаскарана от вершинного ледника оторвался огромный блок льда и горной породы. Масса обвала рухнула на нижний ледник на северном склоне горы и устремилась вниз по долине р. Ллангануко. Переход высот от места обвала до остановки селевого потока составил 4 170 м, причем первые 610 м имело место свободное падение и путь по морене, следующие 2 740 м движение по уклону $\sim 23^\circ$ и последние 670 м – по уклону 5° .

Гляциальный селевой поток, мчавшийся по долине со скоростью ~ 300 км/ч перепрыгнул водораздел, имеющий высоту до 200 м, и обрушился на город Юнгай, покрыв его грязекаменной массой. В долину Рио-Санта поток выбросил селевую массу на противоположный берег на высоту 53 м и после поворота на 90° поток жидкой грязи, содержащей мелкие валуны, преодолел еще 50 км со скоростью

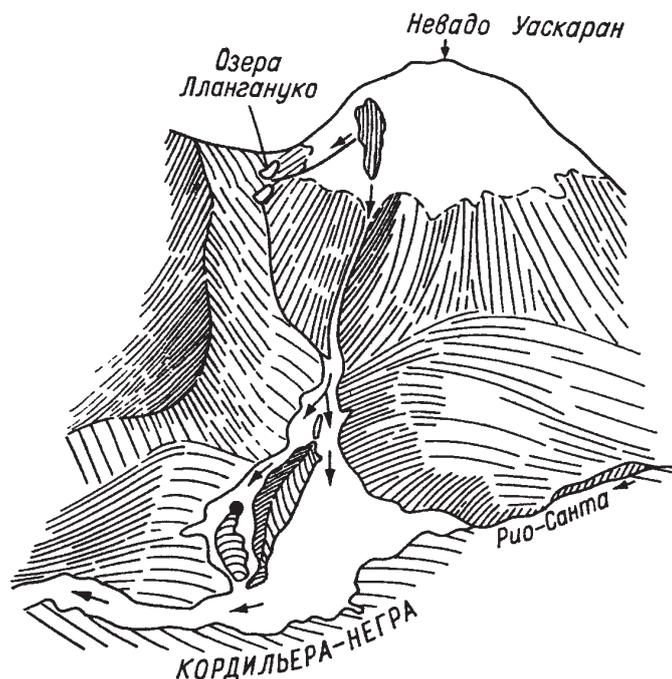


Рис. 1. Схематический рисунок склона горы Уаскаран и долин Ллангануко и Рио-Санта, где образовался и двигался катастрофический селевой поток 1970 г. Черным кружком отмечено местоположение г. Юнгай [3]

* Музаев Илларион Давидович – д. т. н., профессор Владикавказского филиала ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», г. н. с. Геофизического института Владикавказского научного центра РАН (muzaevid@mail.ru).

** Созанов Валерий Гаврилович – д. т. н., профессор Северо-Осетинского государственного университета им. К.Л. Хетагурова.

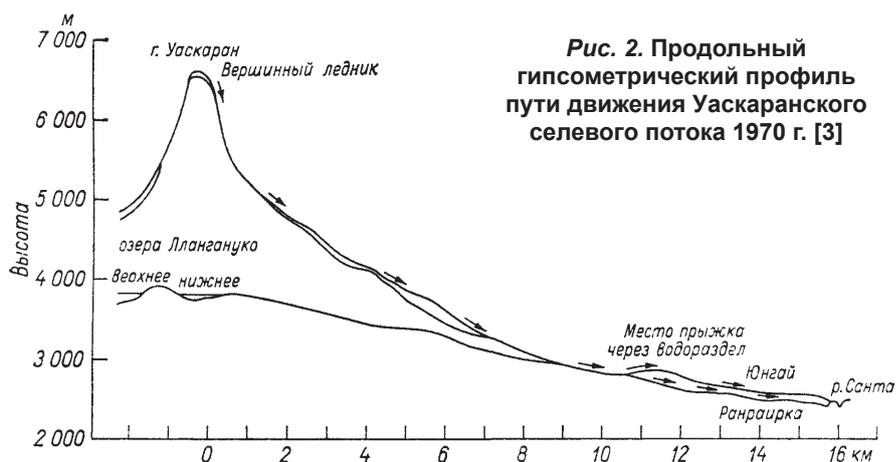


Рис. 2. Продольный гипсометрический профиль пути движения Ускаранского селевого потока 1970 г. [3]

~ 25 км/ч.

Ускаранские селевые потоки, особенно прошедший в 1970 году, наиболее напоминают катастрофические события в Геналдонском ущелье в 2002 году.

На рис. 1 показан склон Ускаран с вершиной Невадо и продвижение гляциального селя в долины Ллангануко и Рио-Санта в 1970 г., а на рис. 2 приведен гипсометрический профиль пути движения Ускаранского гляциального селя.

Мощные гляциальные сели имели место в ущелье р.Терек в 1776–78; 1785; 1817; 1832 годах. В августе 1832 г. у подножья г. Казбек была вынесена огромная масса льда в Дарьяльское ущелье, в результате на р.Терек образовалась завальная плотина высотой до 100 м, которая затем постепенно размывалась.

В районе с. Казбеги в 1927, 1953 и 1967 годах прошли гляциальные сели, состоявшие из льда, скальных глыб, воды и камней.

Подвижки Девдоракского ледника и его сползание вниз к Тереку имели место и в 1970, и 2014

с которого в 1910 г. гляциальные сели индуцировали образование и прохождение по рекам Блота и Чхери с поступлением в р. Терек грязекаменных селей, не приведших к созданию подпруженного озера и к угрожающему Владикавказу наводнению.

В 1902 г. в результате схода ледника Колка прошел гляциальный сел, уничтоживший курорт Кармадон. Согласно описанию очевидцев он состоял не только из льда и снега, но и песка, камней и скальных глыб. В результате погибло несколько десятков людей и несколько тысяч голов скота [3].

В 1969 году также произошла подвижка ледника Колка, но образовавшийся при этом гляциальный сел не был столь разрушительным, как в 1902 году.

20 сентября 2002 года в верховьях р. Геналдон со склона г. Джимарайхох на ледник Колка обрушилась большая масса льда и скальных пород. В результате удара значительная часть ледника сошла с ложи, и примерно 110 млн м³ смеси льда и обломков горных пород понеслись вниз со скоростью 80–90 м/с. Основной объем гляциального селевого потока

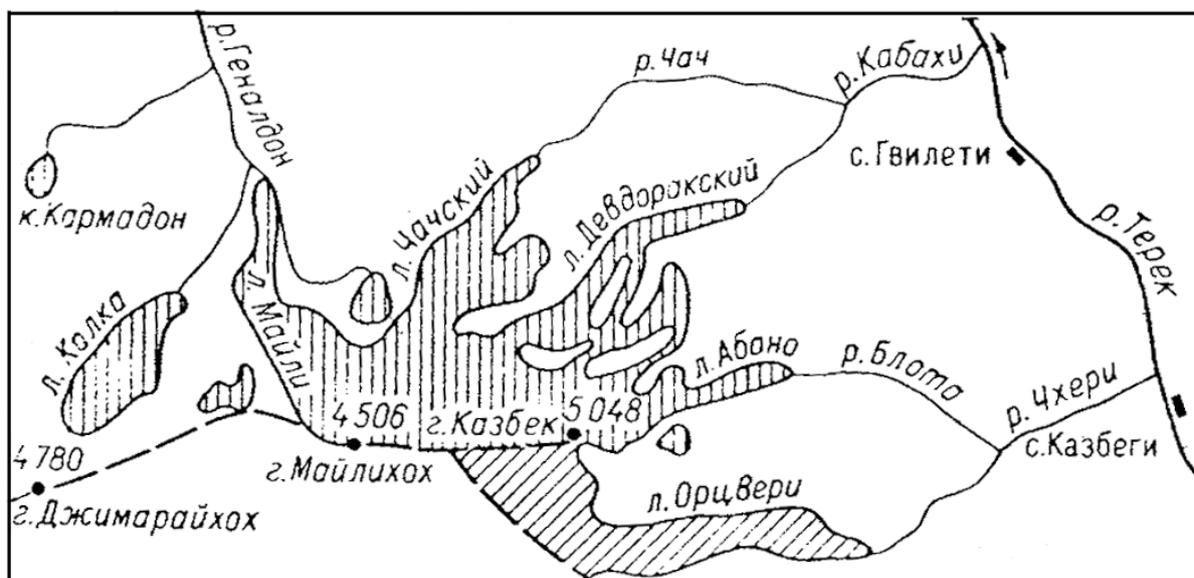


Рис. 3. Ледники района г. Казбек

остановился перед каньоном Скалистого Хребта, пройдя 19 км. Часть селевого потока, состоящая из воды, льда и камней, после остановки основной массы, прошла по долине р. Гизельдон еще 14 км. В результате погибло 126 человек.

Сход гляциальных селей имеет место и в горах Южной и Северной Америки, в Гималаях, в Гренландии, в Альпах, на Памире, Непале, на Тянь-Шане, т. е. практически во всех высокогорных регионах.

Мы привели малую часть имеющихся в литературе описаний гляциальных селей. Согласно им гляциальный сель состоит не только из макротельностей ледовых структур, но и продуктов вовлечения в ледовые структуры из подстилающей поверхности песка, камней и подверженных ледовым динамическим воздействиям скальных глыб.

В работе [3] рассматриваются различные факторы, вызвавшие селевой поток, который был задержан взрывонабросной противоселевой плотинной и предотвратил вторжение селя в г. Алма-Ата.

Рассматриваются такие причины образования селя, как: таяние ледников и снега из-за жаркого лета; роль дождевых осадков; пульсирующий характер режима расхода и скоростей, выходящих из морены; повышение напора воды во внутриглетчерных полостях; высокая влажность и неустойчивость рыхло-обломочных пород в селевых очагах.

Однако среди них не упоминается возможность сейсмических толчков малой силы, могущих сыграть роль спускового механизма для подвижки ледяных пластов с вершины хребта Алатау, хотя регион относится к сейсмическим.

Более того, при рассмотрении причин, вызывающих возникновение гляциальных селей, расчетная оценка возможности их образования не дается.

При этом нет попытки рассчитать ту высоту гор, при которой не выпадают дожди, а только снег.

Нет также оценки прочности льда с позиций накопленного тепла солнечной радиации, без чего весьма сложно оценивать начало обрушения ледяных карнизов и потерю устойчивости ледяных пластов.

Для оценки влияния солнечного тепла может быть использована зависимость, имеющая вид:

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 - \sqrt{\frac{s}{s_0}} \right)^2, \quad (1)$$

где σ и σ_0 – значения разрушающего напряжения соответственно для льда, не подвергающегося облучению солнечной радиацией $\sigma_0 = 5,5 \text{ кг/см}^2$ и облученного (σ); s – количества тепла солнечной радиации, поглощенного единицей

объема льда; s_0 – предельное количество поглощенного тепла, при котором лед полностью теряет прочность ($s_0 = 44 \text{ ккал/см}^3$).

На рис. 4 кривая 1 отвечает формуле (1), кривая 2 – опытным данным, кривая 3 – расчетным данным по формуле, предложенной авторами данной работы:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left(1 - \sqrt{\frac{s}{s_0}} \right)^{2,5}. \quad (2)$$

Из рис. 4 видно практически полное совпадение расчетных данных по зависимости (2) с данными экспериментов.

По нашему убеждению, основной причиной обрушения ледяных карнизов и возникновения гляциальных селей на значительных горных высотах, где температура приземного воздушного слоя остается отрицательной, являются сейсмические толчки.

Сейсмические толчки небольшой силы, не превышающие 3–4 баллов по шкале Рихтера-Меркалли, человек практически не ощущает. Примером может служить тот факт, что Румынское разрушительное землетрясение силой более 7 баллов было зафиксировано в Москве только сейсмической станцией с весьма чувствительными приборами, но населением города не было замечено, так как не превышало 3–3,5 балла.

Вместе с тем мы полагаем, что гипотеза, которая лежит в основе дальнейшего теоретического расчета потери устойчивости ледяного пласта, лежащего на горном откосе, и динамики гляциальных селей должна найти подтверждение и на сейсмических станциях, где автоматически регистрируются и форшоки, и сейсмические толчки, и афтершоки землетрясений, как бы малы они не были.

Мы считаем, что тонкий слой воды на контактной подстилающей поверхности может быть одной из причин образования гляциального селя, но не может играть решающей роли.

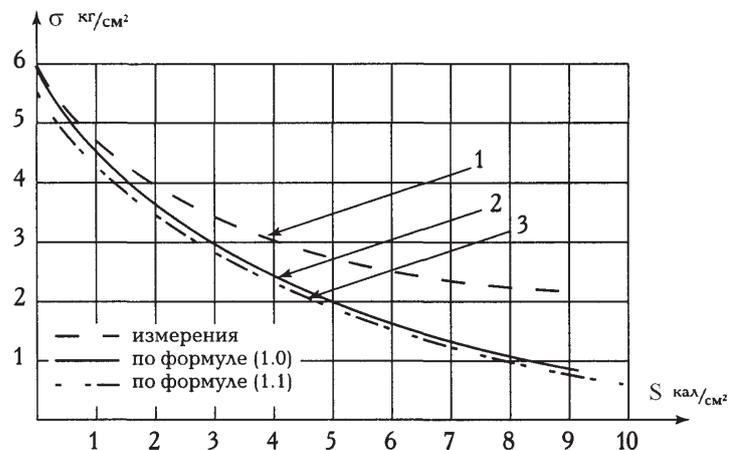


Рис. 4

Это с очевидностью следует уже из того, что поверхность скольжения гляциального селя представляет собой неровную, сильно неоднородную поверхность, с отдельными скальными выступами, и если даже предположить, что от трения контактная поверхность ледяного селя образует пограничный слой вязкой жидкости, то он не может быть продольно однородным из-за неровностей скальной породы.

Поэтому гипотеза о значительной роли воды на подстилающей поверхности для образования гляциального селя вряд ли соответствует физическому обоснованию и является нереалистичной.

В заключение приведем данные по прочности ледовых пластов.

УСТОЙЧИВОСТЬ ЛЕДЯНЫХ ПЛАСТОВ НА ГОРНОМ СКЛОНЕ

В данном параграфе рассматриваются условия статической устойчивости и неустойчивости языков ледников, а также отдельных ледяных пластов, разорванных из-за рельефа горного склона, в частности из-за его выпуклости, когда ледяной пласт испытывает выгиб вверх и в нем образуется квази-вертикальная трещина, приводящая к излому.

В качестве главной причины потери устойчивости и начала подвижки ледяного пласта рассматриваются сейсмические толчки, так как в горах, где возникают гляциальные селевые потоки, как правило, происходят сейсмические толчки той или иной силы.

По нашему мнению, образование гляциального селевого потока вряд ли возможно из-за повышения температуры воздуха, хотя бы потому, что это повышение должно достичь поверхности контакта ледяного пласта с горной грядой, что возможно лишь при наличии трещин в ледовой пластине вплоть до подстилающей поверхности. Появление таких трещин можно ожидать в нижней, имеющей наименьшую толщину части языка ледника, которая и может оторваться. Однако из-за малости объема такой части образование мощной гляциальной сели в этом случае маловероятно. Скорей всего, оторвавшаяся часть языка ледника упрется в скальную выпуклость и остановится, ибо для достижения им заметной скорости необходимо, чтобы поверхность горного склона была достаточно гладкой, что для горных образований скорее исключение, чем реальность.

Очевидно, повышение температуры воздуха может вызвать таяние льда, но это может иметь место на высотах ниже 2 км от уровня моря. В подтверждение этих соображений приведем таблицу значений температуры на разных высотах от отметки моря для средней полосы Европы, что соответствует средней полосе России и Северному Кавказу.

Таблица 1

Температура воздуха °С	Толщина ледяного покрова, см	Разрушающее напряжение на изгиб, σ , кг/см ²
+3,5	52	2,8
-0,4	44	2,2
-0,8	42	2,3
+4,6	39	0,7
-1,2	36	1,4

Таблица 2

z (км)	0	2	4	6	8	10
T^0	12	0	-12	-32	-36	-42

Из таблицы 1 следует, что на высоте 2 км температура по шкале Цельсия равна нулю, а на высоте 4 км – уже 12 градусам. Конечно, надо учитывать, что распределение температуры по высоте зависит от времени года, от географического положения гор и от стратификации атмосферного воздуха.

Очевидно, что сейсмические толчки являются не единственной причиной возникновения гляциальных селей, но нам представляется, что они являются главным их спусковым механизмом. В пользу такого предположения говорят примеры крупнейших катастроф: Уаскаранского гляциального селя и Сарезского обвала, явившихся следствием землетрясений.

Перейдем к установлению критериальных условий потери статической устойчивости ледяного пласта на горном склоне. При этом будем следовать методу, приведенному в монографии [1], рассматривающей лавинообразные потоки, ибо гляциальный сел по существу, с позиции теоретической механики, может быть отнесен к таким потокам.

Пусть G и ρ – вес и плотность ледяного пласта; f – коэффициент кулонового трения; ψ – угол между наклоном склона и горизонтальной плоскостью; K_s – сила сейсмического толчка, направленного под углом θ к откосу с ледовыми напластованиями; H – мощность (толщина) ледового массива; τ^* – предельное значение касательного напряжения, при котором ледяной пласт срывается с поверхности примерзания льда к горному склону; g – ускорение силы тяжести.

Тогда условия срыва (не срыва) и устойчивости (неустойчивости) ледяного пласта запишутся в виде [1–3]

$$\rho g H [\sin \psi - f \cos \psi + \alpha_s \beta K_s (\cos \theta + f \sin \theta)] \geq \tau^* \\ \beta \alpha_s K_s (\cos \theta + f \sin \theta) \geq f \cos \psi - \sin \psi \quad (3)$$

Эти условия при нижних знаках неравенств означают устойчивость ледяного пласта. При верхних знаках неравенств (3) означают потерю устойчиво-

Таблица 3

группы	Баллы по шкале Меркалли-Рихтера	Сейсмическое ускорение τ^* [см/сек ²]	Коэффициент сейсмичности K_s	Характер землетрясения
I	1-6	2,5-10 ²	0,01	слабые, умеренные, сильные
II	7-8	10 ² – 5 · 10 ²	0,025-0,05	очень сильные, разрушительные
III	9	5 · 10 ² – 10 ³	0,1	опустошительные
IV	10-12	10 ³ – 5 · 10 ³	0,1-0,5	катастрофические

Таблица 4

Скальные	Полу-скальные	Крупно-обломочные	Плотные морены	Сухой песчаный	Насыщенные водой
0,5	0,75	1,0	1,5	1,75	2,0

сти ледяного пласта и, следовательно, возникновение гляциального селя.

Таким образом, условие потери устойчивости ледяного пласта в пределах заданных постоянных значений θ и ψ могут быть записаны в форме

$$H > \frac{\tau^*}{g[\sin \psi - f \cos \psi + \alpha_s \beta K_s (\cos \theta + f \sin \theta)]}$$

$$K_s > \frac{f \cos \psi - \sin \psi}{\alpha_s \beta (\cos \theta + f \sin \theta)} = K_s^* \quad (4)$$

При этом значения K_s следует брать из табл. 3. Значения параметра α_s для различных пород,

подстилающих ледяные пласты, приводятся в таблице 4.

Очевидно, два последних значения α_s в табл. 4 являются нереальными в плане изучения гляциальных селей, они приведены лишь для того, чтобы показать, что скальные породы требуют больших значений сейсмических толчков, достаточных для подвижки ледяного пласта, так как воздействие толчков приходится на контактную, низовую поверхность льда.

Параметр β изменяется от 1 до 2, причем первую цифру относят к фундаментам, а вторую – к верхней части сооружений. Очевидно, что для ледовых напластований следует брать $\beta = 1$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Войнич-Сяноженцкий Т.Г., Созанов В.Г. Лавинообразные потоки. Возникновение, динамики и воздействие на окружающую среду. – Владикавказ: Изд-во СОГУ, 1997 г. 220 с.
2. Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1977 г. 155 с.
3. Войтковский К.Ф. Механические свойства льда. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1960 г. 100 с.
4. Войтковский К.Ф. Лавиноведение. – М.: Изд-во Московского университета, 1989 г. 158 с.

TO THE PROBLEM THE OCCURRENCE OF GLACIAL MUDFLOWS

I.D. Muzaev*, V.G. Sozanov**

* Dr. of Sc. Professor, Vladikavkaz branch of the Financial University under the Government of the Russian Federation, city researcher Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (muzaev@mail.ru).

** Dr. Professor of the North Ossetian State University. K.L. Khetagurov.

Abstract. The article considers peculiarities of glacial mudflows formation. Criteria conditions of stability (instability) of the glacial massif in terms of seismic influence on the glacial massif are established. Data on glacial mudflows is provided.

The development described in the article allow to estimate the danger of glacial mudflow emergence under certain physical and geographical conditions.

Keywords: glacial mudflow, a breaking stress of the ice, shear stress, is the Richter scale - Mercalli, Criterion the stability condition.

REFERENCES

1. Vojnich-Syanozhenckij T.G., Sozanov V.G. Lavinobraznye potoki. Vozniknovenie, dinamiki i vozdejstvie na okruzhayushchuyu sredu. – Vladikavkaz: Izd-vo SOGU, 1997 g. 220 s.
2. Vinogradov YU.B. Glyacial'nye proryvnye pavodki i selevyje potoki. – Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977 g. 155 s.
3. Vojtkovskij K.F. Mekhanicheskie svojstva l'da. – M.: Izd-vo Akademii nauk SSSR, 1960 g. 100 s.
4. Vojtkovskij K.F. Lavinovedenie. – M.: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1989 g. 158 s.