



Оценка глубины промерзания грунта как сдерживающего фактора селевого процесса

Д.М. Фролов

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва,
Россия, denisfrolovm@mail.ru*

Аннотация. Поскольку в книге «Селеведение» В.Ф. Перова промерзание грунта указывается одним из определяющих сдерживающих факторов селевого процесса, в данной работе производится оценка глубины промерзания грунта на основе разработанной расчётной схемы за зимние сезоны 2015/16-2019/20 в Приэльбрусье. Расчётная схема строилась на основе задачи теплопроводности трехслойной среды (снег, мерзлый и талый грунт) с фазовым переходом на границе. Уравнение теплового баланса включало энергию фазового перехода, приток тепла из талого грунта и отток в мерзлый грунт и при наличии снежного покрова через него в атмосферу.

Ключевые слова: *сель, сдерживающий фактор, промерзание грунта, температура воздуха, толщина снежного покрова*

Ссылка для цитирования: Фролов Д.М. Оценка глубины промерзания грунта как сдерживающего фактора селевого процесса. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 418–421.

Estimation of ground freezing depth as deterrent factor of debris flow process

D.M. Frolov

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia,
denisfrolovm@mail.ru*

Abstract. As in the book “Selevedenie” (Debris Flow Science), V.F. Perov appointed ground freezing as one of the main determining deterrent factor of debris flow process, the ground freezing depth for winter periods 2015/16-2019/20 was estimated on basis of developed calculating scheme for Elbrus region. The calculating scheme for ground freezing is constructed on the basis of three-layer media heat conductivity problem (snow cover, frozen and thawed ground) with phase transition on the boundary of frozen and unfrozen ground. Heat balance equation includes phase transition energy, inflow of heat from unfrozen ground and outflow to frozen ground, snow cover and atmosphere.

Key words: *debris flow, deterrent factor, ground freezing, air temperature, snow cover thickness*

Cite this article: Frolov D.M. Estimation of ground freezing depth as deterrent factor of debris flow process. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 418–421.

Введение

Одним из факторов устойчивости склонов к воздействию селевых процессов согласно книги «Селеведение» [Перов, 2012] является промерзание подстилающего грунта, когда в горных районах, где грунт находится в мерзлом состоянии в течение восьми и более месяцев, селевые процессы на нём происходят реже. Однако, происходящее последнее время изменение температуры воздуха и количества осадков (в первую очередь в виде снега) [Golubev et al., 2008] ведут к изменению глубины и длительности промерзания грунта и как следствие уменьшение его устойчивости. Модельное исследование промерзания грунта в горах производилось в работах [Habekorn et al., 2016]. В данной работе на основе разработанной расчётной схемы производится оценка глубины промерзания грунта для последних пяти зимних сезонов на основе данных о толщине снежного покрова и температуре воздуха для метеостанции Терскол. Метеостанция Терскол расположена в долине Азау в Приэльбрусье на высоте 2141 м над уровнем моря. Средняя температура января составляет там -7°C , июля $-13,4^{\circ}\text{C}$, а средняя сумма отрицательных месячных температур зимнего периода (ноябрь-март) составляет -20°C . За период снегонакопления (в ноябре-марте) выпадает в среднем около 280 мм осадков, вызывая накопление снежного покрова до 70–80 см толщиной. Расчёты изменения глубины промерзания грунта производились по предложенной расчётной схеме по данным о толщине снежного покрова и температуре воздуха на основании трехслойной модели среды (талый грунт, мерзлый грунт, снег) и при предположении линейного изменения температуры в средах и тепловому потоку согласно закону Фурье.

Материалы и методы

В работе произведены расчёты глубины промерзания на основе данных о температуре воздуха и толщине снежного покрова для метеостанций Терскол для покрытой снегом поверхности почвы за зимние сезоны 2015/16–2019/20 по предложенной расчётной схеме. Расчётная схема строилась на основе задачи теплопроводности трехслойной среды (снег, мерзлый и талый грунт) с фазовым переходом на границе мерзлого и талого грунта. Уравнение теплового баланса включало энергию фазового перехода, приток тепла из талого грунта и отток в мерзлый грунт и при наличии снежного покрова через него в атмосферу. Поток тепла рассчитывался по закону Фурье, как произведение теплопроводности и градиента температуры. Предполагалось, что температура в каждой из сред изменяется линейно (например, [DeGaetano et al., 2001]). Для снежного покрова и мерзлого грунта использовалась формула теплопроводности двухслойной среды.

Расчет промерзания грунта на основе данных о температуре воздуха, толщине и теплопроводности снежного покрова в течение зимнего периода позволял оценить интенсивность движения фронта промерзания в этот период времени. Зависимость скорости движения фронта промерзания находилась по расчетной схеме. Схема учитывала намерзание грунта снизу на массиве мерзлого грунта в зимний период на основе данных о ежедневной температуре воздуха (и толщине и теплопроводности снежного покрова).

Уравнение теплового баланса записывалось как $F_1 = cLV + F_2$ или как:

$$dh_{mz}/dt = V = (F_1 - F_2)/cL, \quad (1)$$

где F_1 – отток тепла через замёрзший грунт (и снежный покров) от фронта промерзания ($\text{Вт}/\text{м}^2$) в атмосферу; $c L V = c L dh_{mz}/dt$ – расход тепла на фазовый переход, c – влагосодержание грунта ($1-4 \text{ кг}/\text{см}^3 \cdot \text{м}^2$), (последнее значение соответствует полному заполнению пор водой у легкой глины с плотностью $2000 \text{ кг}/\text{м}^3$ и коэффициентом пористости $0,617$ [Грунтоведение, 2005]); L – энергия фазового перехода ($335 \text{ кДж}/\text{кг}$);

$V = dh_{мг} / dt$ – скорость движения фронта промерзания (см/с); F_2 – отток тепла на охлаждение талого грунта перед фронтом промерзания (Вт/м²).

Тепловой поток выражался по закону Фурье: $F = -\lambda \text{ grad } T$. Тепловой поток через замёрзший грунт от фронта промерзания в атмосферу в случае наличия снежного покрова выражался через теплопроводность и тепловой поток комбинации из двух сред (снежный покров и мерзлый грунт) согласно данным справочника [Мухеев, 1977] как:

$$F_1 = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{-\Delta T}{\frac{\Delta x_c}{\lambda_c} + \frac{\Delta x_{мг}}{\lambda_{мг}}} = \frac{-T_{возд}}{\frac{h_c}{\lambda_c} + \frac{h_{мг}}{\lambda_{мг}}} \quad (2)$$

Здесь $T_{возд}$ – температура воздуха, h_c и $h_{мг}$ – толщина снега и глубина промерзания, а λ_c и $\lambda_{мг}$ – теплопроводность снега и мёрзлого грунта.

Предполагалось, что на глубине 10 м в грунте находится точка нулевых годовых колебаний температуры T_0 со среднегодовым значением около 7°C. Поэтому

$$F_2 = -\lambda_{мг} \frac{\Delta T}{\Delta x} = \lambda_{мг} \frac{T_0}{10 - h_{мг}} \quad (3)$$

Здесь $\lambda_{мг}$ – теплопроводность талого грунта. Вычисления производились с шагом в один день. На первый момент предполагалось, что толщина мерзлого грунта $h_{мг}$ равнялась 0,5 см. На каждом шаге по времени (каждый день) вычислялась (рассчитывалась) скорость промерзания V и значение толщины мерзлого грунта $h_{мг}$ для следующего дня (шага по времени). Согласно [Грунтоведение, 2005], средняя теплопроводность талого и мерзлого глинистого грунта могла быть взята как 1,4 и 1,8 Вт/м°C. Средняя теплопроводность снега λ_c рассчитывалась относительно плотности по формуле А.В. Павлова [Павлов, 1979] и бралась равной 0,18 Вт/м°C.

Результаты и выводы

В работе для выведенного дифференциального уравнения по времени первого порядка для изменения глубины промерзания грунта была построена разностная схема посредством аппроксимации этого дифференциального уравнения явным методом Эйлера: $h_{мг}(t_{n+1}) = h_{мг}(t_n) + \Delta t V(t_n)$. По полученной разностной схеме для каждого зимнего сезона 2015/16-2019/20 были произведены расчёты изменения глубины промерзания грунта. Пример результатов расчёта для зимнего сезона 2016/17 приведён на рисунке.



Рис. Изменение расчётной глубины промерзания (3) на основе температуры воздуха (1) и толщины снежного покрова (2) для метеостанции Терскол в зимний период 2016/17 гг.

Fig. Change in the estimated freezing depth (3) based on the air temperature (1) and the thickness of the snow cover (2) for the Terskol weather station in the winter 2016/17

Примененный метод расчёта является хорошо физически обоснованным. Решение по методу хорошо описывает процесс изменения глубины промерзания в течение зимнего сезона. Важным для успешной работы метода является наиболее возможно точное задание начальных данных.

Результаты расчета максимальной глубины промерзания грунта для метеостанции Терскол за зимние периоды 2015/16–2019/20 приведены в таблице.

Таблица. Изменение максимальной глубины промерзания грунта, средней за февраль толщины снежного покрова и суммы отрицательных месячных температур для метеостанции Терскол за зимние периоды 2015/16–2019/20

Table. Changes in the maximum depth of soil freezing, average for February snow cover thickness, and the sum of negative monthly temperatures for Terskol weather station for winter periods 2015/16–2019/20

Зимний период	Сумма отриц. мес. температур, °С	Сред. за февраль толщина снежного покрова, см	Макс. глубина промерзания грунта, см
2015/16	-18,7	60	21
2016/17	-27,7	40	23
2017/18	-14,2	70	8
2018/19	-19,4	60	20
2019/20			20

Таким образом, предложенный метод расчёта динамики глубины промерзания грунта на основе данных о температуре воздуха и толщине снежного покрова позволяет оценить промерзание грунта как сдерживающего фактора селевого процесса.

Благодарности

Работа выполнена на основе темы I.7 АААА-А16-116032810093-2 «Картографирование, моделирование и оценка риска опасных природных процессов» (ГЗ).

Список литературы

- Грунтоведение. Под ред. В.Т. Трофимов. — М.: Изд-во МГУ, Наука, 2005, 1024 с.
- Кудрявцев В.А. Температура верхних горизонтов вечномерзлой толщи в пределах СССР / М.: Изд-во АН СССР, 1954. 183 с.
- Михеев М.А. Основы теплопередачи. Изд. 2-е / М.А. Михеев, И.М. Михеева. М., Энергия, 1977, 344 с.
- Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск, «Наука», 1979. 284 с.
- Перов В.Ф. Селеведение. Учебное пособие. – М.: Географический факультет МГУ, 2012. 272 с.
- DeGaetano, A.T., Cameron M.D., Wilks D.S. Physical simulation of maximum seasonal soil freezing depth in the united states using routine weather observation // *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(3), pp. 546–555.
- Golubev V.N., Petrushina M.N., Frolov D.M. Winter regime of temperature and precipitation as a factor of snow-cover distribution and its stratigraphy // *Annals of Glaciology*, 2008, 49, pp. 179-186.
- Haberkorn A., Wever N., Hoelzle M., Phillips M., Kenner R., Bavay M., Lehning M. Distributed snow and rock temperature modeling in steep rock walls using Alpine3D. *Cryosphere Discuss.* 2016. <https://doi.org/10.5194/tc-2016-73>.