

IMPACT OF SNOW COVER AND AIR TEMPERATURE ON GROUND FREEZING DEPTH AND STABILITY IN MOUNTAIN AREA

D.M. Frolov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Автор для переписки: e-mail: denisfrolov@mail.ru

Citation: Frolov D.M. 2020. Impact of snow cover and air temperature on ground freezing depth and stability in mountain area // Environmental dynamics and global climate change. V. 12. N. 1. P. 43–46. DOI: <https://doi.org/10.17816/edgcc21205>

Поскольку при строительстве селе- и лавиноудерживающих геотехнических сооружений на горных территориях возникает проблема крепления и устойчивости этих сооружений в условиях сезонного и/или многолетнего промерзания грунта, в данной работе производится оценка влияния снежного покрова и температуры воздуха на глубину промерзания и устойчивость 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: снежный покров, температура воздуха, промерзание и устойчивость грунта.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из факторов устойчивости грунта на склонах при строительстве селе- и лавиноудерживающих геотехнических сооружений в горных территориях является промерзание подстилающего грунта, так как в горных районах грунт может находиться в мерзлом состоянии в течение восьми и более месяцев. 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 [Haberhorn 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 $-^{\circ}\text{C}$, 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 покро-

ва 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 грунта на основе данных о температуре воздуха и толщине снежного покрова для метеостанций Терскол за зимние сезоны 2015/16–2019/20 по предложенной в статье [Фролов, 2019] 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. Расчётная схема применима для условий как покрытой снегом поверхности грунта, так и для оголённой поверхности. 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 и 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 на границе фронта промерзания записывалось как $F_1 = cLV + F_2$ или как:

$$dh_{\text{мг}}/dt = V = (F_1 - F_2)/cL,$$

где: F_1 — отток тепла через замёрзший грунт (и снежный покров) от фронта промерзания ($\text{Вт}/\text{м}^2$) в атмосферу; $LV = cLdh_{\text{мг}}/dt$ — расход тепла на фазовый переход, с влагосодержанием грунта ($1-4 \text{ кг}/\text{см} \cdot \text{м}^2$, или с долей содержания влаги $0,1-0,4$ от общего объёма среды, где максимальное значение содержания влаги, равное $0,4$ (которое было принято при расчётах) 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 — скорость движения фронта промерзания ($\text{см}/\text{с}$); F_2 — отток тепла на охлаждение талого грунта перед фронтом промерзания ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

При составлении уравнения баланса тепла было сделано пренебрежение слагаемыми, отвечающими за теплотери на охлаждение грунта, а также за изменение его влажности с глубиной.

Тепловой поток выражается по закону Фурье через градиент температуры и теплопроводность как $F = -\lambda (\text{grad } T)$. Таким образом, тепловой поток от фронта промерзания в атмосферу через комбинацию из двух сред (снег и мерзлый грунт) согласно данным справочника [Михеев, 1977] может быть записан как:

$$F_1 = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{-\Delta T}{\frac{\Delta x_{\text{с}}}{\lambda_{\text{с}}} + \frac{\Delta x_{\text{мг}}}{\lambda_{\text{мг}}}} = \frac{-T_{\text{возд}}}{\frac{h_{\text{с}}}{\lambda_{\text{с}}} + \frac{h_{\text{мг}}}{\lambda_{\text{мг}}}}$$

здесь $T_{\text{возд}}$ — температура воздуха, $h_{\text{с}}$ и $h_{\text{мг}}$ — толщина снега и глубина промерзания, а $\lambda_{\text{с}}$ и $\lambda_{\text{мг}}$ — теплопроводность снега и мёрзлого грунта.

Предполагалось, что на глубине 10 м в грунте находится точка нулевых годовых колебаний температуры T_0 со значением около 4°C (значение привязывалось к среднегодовой температуре в Терсколе). Поэтому

$$F_2 = -\lambda_{\text{тг}} \frac{\Delta T}{\Delta x} = \lambda_{\text{тг}} \frac{T_0}{10 - h_{\text{мг}}},$$

здесь $\lambda_{\text{тг}}$ — теплопроводность талого грунта. Вычисления производились с шагом в один день. На первый момент предполагалось, что толщина мерзлого грунта $h_{\text{мг}}$ равна $0,5 \text{ см}$. На каждом шаге по времени (каждый день) вычислялась (рассчитывалась) скорость промерзания V и значение толщины мерзлого грунта $h_{\text{мг}}$ для следующего дня (шага по времени). Согласно [Грунтоведение, 2005], средняя теплопроводность талого и мерзлого глинистого грунта может быть взята как $1,4$ и $1,8 \text{ Вт}/\text{м}^\circ\text{C}$.

Средняя теплопроводность снега $\lambda_{\text{с}}$ рассчитывалась относительно плотности по формуле А.В. Павлова [Павлов, 1979] и бралась равной $0,18 \text{ Вт}/\text{м}^\circ\text{C}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

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: $h_{\text{мг}}(t_{n+1}) = h_{\text{мг}}(t_n) + \Delta t V(t_n)$. По полученной разностной схеме для каждого зимнего сезона на $2015/16-2019/20$ были произведены расчёты изменения глубины промерзания грунта. Результаты расчётов приведены на рис. 1.

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 1.

Согласно расчётам, грунт под снежным покровом остается мёрзлым в Приэльбрусье с декабря по апрель. Мощность накапливаемого снежного покрова может достигать при этом полуметра и более. При этом грунт под покрытой снежным покровом поверхностью промерзает согласно расчётам в среднем на 20 и более сантиметров. В случае частичного или полного сдувания снежного покрова промерзание грунта

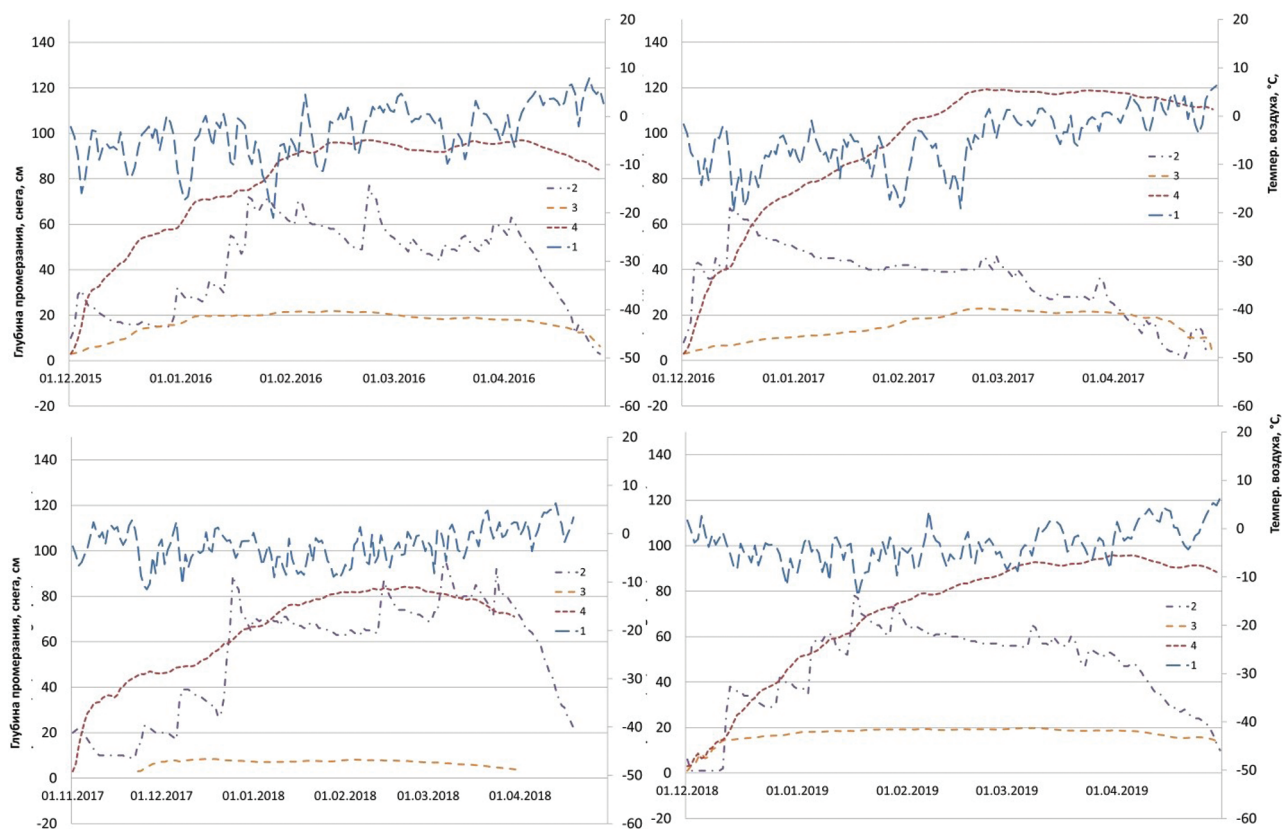


Рис. 1. Изменения температуры воздуха и глубины промерзания по данным расчётов для покрытой снегом и оголённой поверхности грунта для метеостанции Терскол для зимних периодов 2015/16–2018/19 (1 — температура воздуха, 2 — толщина снежного покрова и 3 — расчётная глубина промерзания грунта под снежным покровом 4 — расчётная глубина промерзания оголённого грунта)

Таблица 1

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

Зимний период	Сумма отриц. среднемес. температур, °С	Сред. за февраль толщина снежного покрова, см	Макс. глубина промерзания покрытого снегом грунта, см	Макс. глубина промерзания оголённого грунта, см
2015/16	–18,7	60	21	97
2016/17	–27,7	40	23	119
2017/18	–14,2	70	8	83
2018/19	–19,4	60	20	96
2019/20			20	

может происходить на глубину до 1 метра и более и длится более продолжительный период. Таким образом, предложенный метод расчёта динамики глубины промерзания грунта на основе данных о температуре воздуха и толщине снежного покрова позволяет оценить промерзание грунта как фактора устойчивости грунта при строительстве селе- и лавинозащитных сооружений.

Работа выполнена на основе темы государственного задания № 121051300175-4 «Опасность и риск природных процессов и явлений».

ЛИТЕРАТУРА

1. Грунтоведение / Под ред. В.Т. Трофимов. 2005. М.: Изд-во Наука. С. 1024.
2. Кудрявцев В.А. 1954. Температура верхних горизонтов вечномёрзлой толщи в пределах СССР. М.: Изд-во АН СССР. С. 183.
3. Михеев М.А. 1977. Основы теплопередачи / Под. Ред. М.А. Михеев, И.М. Михеева. М.: Изд-во Энергия С. 344.
4. Павлов А.В. 1979. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск.: Изд-во Наука. С. 284.

5. Фролов Д.М. 2019. Расчёт глубины промерзания грунта под оголённой и покрытой снегом поверхностью на метеостанции МГУ за зимние периоды 2011/12-2017/18 // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 10. № 2. С. 86-90.
6. DeGaetano A.T., Cameron M.D., Wilks D.S. 2001. Physical simulation of maximum seasonal soil freezing depth in the United States using routine weather observations // Journal of Applied Meteorology. Vol. 40(3). P. 546-555.
7. Golubev V.N., Petrushina M.N., Frolov D.M. 2008. Winter regime of temperature and precipitation as a factor of snow-cover distribution and its stratigraphy // Annals of Glaciology Vol. 49, P. 179-186.
8. Haberkorn A., Wever N., Hoelzle M., Phillips M., Kenner R., Bavay M., Lehning M. 2016. Distributed snow and rock temperature modeling in steep rock walls using Alpine3D // The Cryosphere Discuss. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-2016-73>

Поступила: 17.03.2021

Одобрена: 14.04.2021

Принята: 22.06.2021

