УДК 551.578.46+551.34+626.876.3

НАБЛЮДЕНИЯ И РАСЧЁТЫ ГЛУБИНЫ ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТА НА ПЕРЕВАЛЕ АНЗОБ (ТАДЖИКИСТАН)

Д.М. Фролов, А.В. Кошурников, В.Е. Гагарин, Э.И. Додобоев

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

Работа выполнена в рамках темы государственного задания «Опасность и риск природных процессов и явлений» (121051300175-4) и «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии» (121051100164-0).

В статье представлены результаты проводимых в последние годы наблюдений и расчётов глубины промерзания грунта на перевале Анзоб (Таджикистан). 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, температура и промерзание грунта

The article focuses on results of recent observations and calculations of the depth of ground freezing at the Anzob pass (Tajikistan). The calculating scheme was based on the problem of thermal conductivity of a three-layer medium (snow, frozen and thawed ground) with a phase transition at the boundary. The heat balance equation included the energy of the phase transition, the inflow of heat from the thawed soil and outflow into the frozen soil and in the presence of snow cover through it into the atmosphere.

Keywords: snow cover, air temperature, ground temperature and freezing

В последние годы проводились исследования температуры грунта на перевале Анзоб (Таджикистан). Там были пройдены две скважины глубиной 3 м, оснащенные терморегистраторами, проводящими запись температурных данных в течение всего года. По проделанным наблюдениям с 2016 года перевал Анзоб относится к области сезонного промерзания. По данным термометрических наблюдений сезонное промерзание грунтов на этой территории на склонах северной экспозиции наблюдается с середины октября, и продолжаются до конца апреля. На отметке 1,5 м температура пород уже в конце мая меняется с отрицательной на положительную, а к началу июня происходит полное оттаивание пород. Учитывая снежный покров, состав пород и влажность, а также другие факторы, влияющие на глубину промерзания, было произведено моделирование глубины промерзания по разработанной расчётной схеме. Расчётное моделирование показало наличие сезонных мерзлых пород на склоне северной экспозиции на глубине до 1,5 м. Так, в зимний период 2018 года на склонах северной экспозиции глубина сезонного промерзания грунта составила 1,5 метра (рис. 1). В зимний период 2020 года на склонах северной экспозиции глубина сезонного промерзания грунта составила 1,2 метра при среднегодовой температуре грунтов 2,42 °С (рис. 2). Расчёты производились по разработанному ранее алгоритму и расчётной схеме, 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. Поток тепла рассчитывался по закону Фурье, как произведение теплопроводности и градиента температуры. Предполагалось, что температура в каждой из сред изменяется линейно. Для снежного покрова и мерзлого грунта использовалась формула теплопроводности двухслойной среды (DeGaetano et al, 2001; Frolov, 2019).

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 записывалось как $F_1=cLV+F_2$ или как:

$$dh_{мг}/d\tau = V = (F_1 \; F_2)/cL, \qquad (1)$$

где: F_1 – отток тепла через замёрзший грунт (и снежный покров) от фронта промерзания (Вт/м^2) в атмосферу; $c\,L\,V = c\,L\,dh_{мг}/d\tau$ – расход тепла на фазовый переход, c – влагосодержание грунта (1 – 4 кг/см*м^2), (последнее значение соответствует полному заполнению пор водой у легкой глины с плотностью 2000 кг/м^3 и коэффициентом пористости 0,617 (Грунтоведение, 2005)); L – энергия фазового перехода (335 кДж/кг); $V = dh_{мг}/d\tau$ – скорость движения фронта промерзания (см/с); F_2 – отток тепла на охлаждение талого грунта перед фронтом промерзания (Вт/м^2).

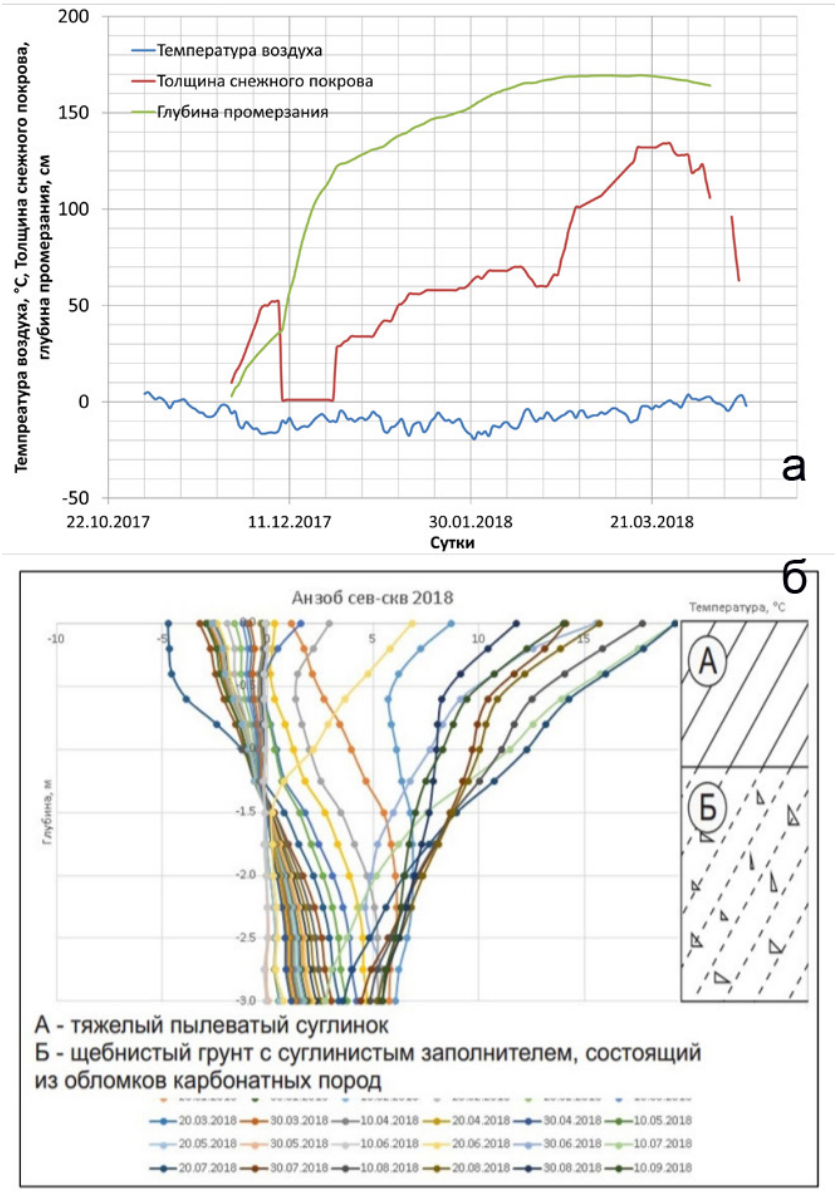

Рис. 1. Изменение температуры воздуха, толщины снежного покрова и расчётной глубины промерзания (а), годовые амплитуды температуры грунта на склонах северной экспозиции в зимний период 2018 года (б)

Тепловой поток выражался по закону Фурье: F= -λ 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 (Михеев, 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 5 м в грунте находится точка нулевых годовых колебаний температуры T_0 со среднегодовым значением около 2,42°С. Поэтому

$$F_2 = -\lambda_{мг} \frac{\Delta T}{\Delta x} = \lambda_{мг} \frac{T_0}{5 - h_{мг}}, \quad (3)$$

Здесь $\lambda_{тг}$ – 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°С. Средняя теплопроводность снега λ_c рассчитывалась относительно плотности по формуле А.В. Павлова (Павлов, 1979) и бралась равной 0,18 Вт/м°С.

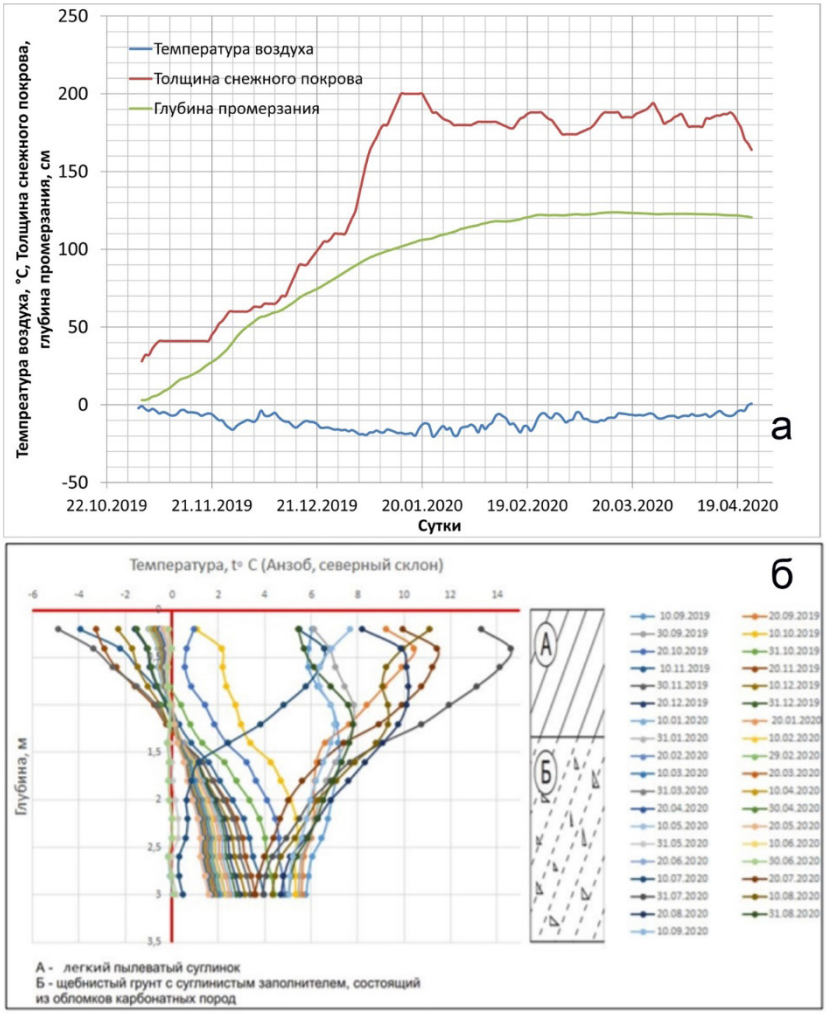

Рис. 2. Изменение температуры воздуха, толщины снежного покрова и расчётной глубины промерзания (а), годовые амплитуды температуры грунта на склонах северной экспозиции в зимний период 2020 года (б)

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 были произведены расчёты изменения глубины промерзания грунта. Примеры результатов расчёта для зимних периодов 2017/18 и 2019/20 приведены на рисунках 1 и 2.

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.

Согласно расчётам, грунт под снежным покровом остается мёрзлым на перевале Анзоб с ноября по апрель. Мощность накапливаемого снежного покрова может достигать при этом два метра и более. 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.

Литература

1. Грунтоведение. Под ред. В.Т. Трофимов. М.: Изд-во МГУ, Наука, 2005, 1024 с.
2. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, Энергия, 1977, 344 с.
3. Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 284 с.
4. 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.
5. Frolov D.M. Calculation of ground freezing depth under bare and covered with the snow cover ground surface on the site of the meteorological observatory of Lomonosov Moscow State University for winter seasons of 2011/12–2017/18 // Environmental dynamics and global climate change. 2019. 10:86-90. https://doi.org/10.17816/edgcc21203