

УДК 551.578.46+551.345

Изучение криолитозоны Зеравшанского и Гиссарского хребтов

В. Е. Гагарин, А. В. Кошурников, Д. М. Фролов (denisfrolov@mail.ru),
Э. И. Додобоев, И. А. Набиев

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Аннотация. Представлены краткие результаты изучения криолитозоны Зеравшанского и Гиссарского хребтов и описание численного метода для оценки глубины промерзания грунта на основе данных о толщине снежного покрова и температуре воздуха. Приведен пример использования этого численного метода оценки глубины промерзания для составления карты криолитозоны Зеравшанского и Гиссарского хребтов.

Ключевые слова: численный метод, глубина промерзания, толщина снежного покрова, температура воздуха, картографирование.

Объект исследования

Кафедрой Геокриологии МГУ в 2016 г. была организована стационарная геокриологическая площадка в районе Гиссарского хребта (перевал Анзоб, Зиддинская долина). На данной территории пробурены 3 геокриологические скважины глубиной от 3 до 5 м, оснащенными термодатчиками. Первые две скважины находятся на высоте 3372 м над у. м., третья скважина пробурена позже в 2019 г. в Зиддинской долине (абс. высота 2000 м). Нами были проведены режимные наблюдения за температурным состоянием грунтов, геофизические и лабораторные работы для определения состава, строения и свойств мерзлого грунта.

Методы исследования

Определение температурного режима мерзлых пород, лабораторные и геофизические методы (ВЭЗ, ЗСБ), дешифрирования спутниковых снимков.

Результаты исследований

По данным термометрических наблюдений сезонное промерзание грунтов на этой территории на склонах северной экспозиции наблюдается с середины октября, и продолжают 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 расчетной схеме. Расчетное моделирование показало наличие сезонных мерзлых пород на склоне северной экспозиции и южной экспозиции перевала Анзоб на глубине до 1,5 и 1,2 м. В Зиддинской долине глубина сезонного промерзания не превышает 1 м. Расчет показал, что градиент среднегодовой температуры грунтов на каждые 100 м поднятия для Гиссарского хребта равно 0,37 °С. Проведенные нами геофи-

зические исследования на перевале Анзоб позволили скорректировать геоэлектрический разрез, на котором по разнице в электрического сопротивления, хорошо выделяются суглинки, мощностью до 3 м, зона крупнообломочных пород с песчаным заполнителем, зона скальных пород и зона разломов. В результате годовых исследований были построены карты-схемы распространения мерзлых пород Гиссарского хребта (рис. 1 и 2).

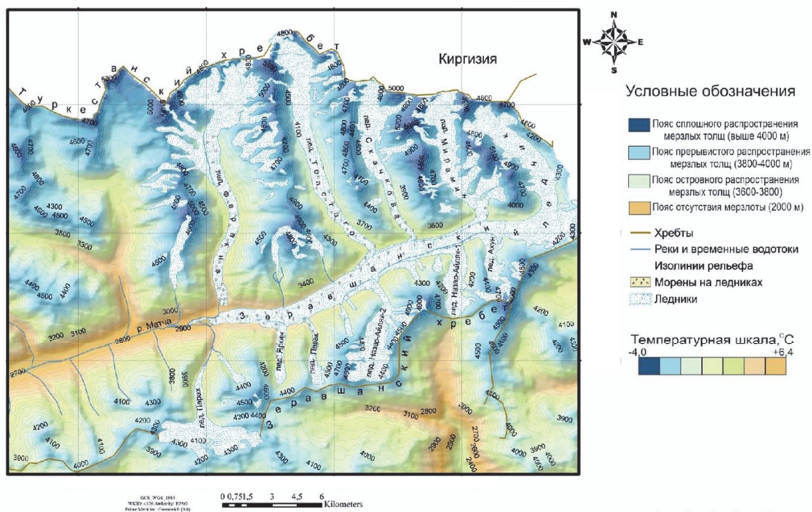


Рис. 1. Карта-схема криолитозоны в верховье р. Зеравшан (р. Матча)

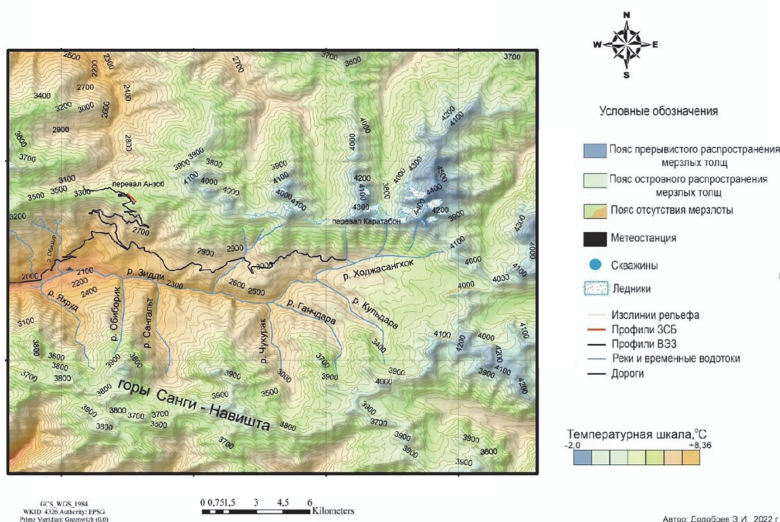


Рис. 2. Карта-схема криолитозоны в верховье р. Варзоб (р. Зидех)

Для составления карт использовался подход, при котором учитываются различия в высотном положении границ распространения ММП для макросклонов, имеющих наиболее выраженные различия геотермического режима. Такими являются макросклоны северной и южной экспозиции. Образцы, отобранных на перевале Анзоб, при искусственном замораживании в лабораторных условиях характеризуются массивной криогенной текстурой, распределение льда по всему объему грунта наблюдается в виде цемента. Образования ледяных шпиров наблюдается лишь при увеличении влажности до 30 %.

В данной работе на основе разработанной расчетной схемы также производится оценка глубины промерзания грунта для нескольких последних зимних сезонов на основе данных о толщине снежного покрова и температуре воздуха для перевала Анзоб (Таджикистан). Аздобский перевал (Таджикистан) находится на широте 39,07 и долготе 68,88 с высотой 3373 м над у. м. Среднегодовая температура там составляет $-2,7^{\circ}\text{C}$, но из-за сильного снегонакопления многолетнее промерзание отсутствует и наблюдается лишь сезонное. Расчетное моделирование показало наличие сезонных мерзлых пород на склоне северной экспозиции на глубине до 1,5 м. Так, в зимний период 2018 г. на склонах северной экспозиции глубина сезонного промерзания грунта составила 1,5 м (рис. 4). В зимний период 2020 г. на склонах северной экспозиции глубина сезонного промерзания грунта составила 1,2 м при среднегодовой температуре грунтов $2,42^{\circ}\text{C}$ (рис. 5). Расчеты изменения глубины промерзания грунта производились по предложенной расчетной 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.

Также были рассмотрены располагаемые в открытом доступе на сайте «Погода и климат» архивные метеорологические данные по метеостанции «Анзобский перевал». И уже на основе выбранных из них данных по температуре воздуха и толщине снежного покрова за зимние сезоны 2010/11–2019/20 (рис. 3) были произведены расчеты влияния толщины снежного покрова и температуры воздуха на глубину промерзания грунта по предложенной расчетной схеме.

Расчетная 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, [4]). Для снежного покрова и мерзлого грунта использовалась формула теплопроводности двухслойной среды.

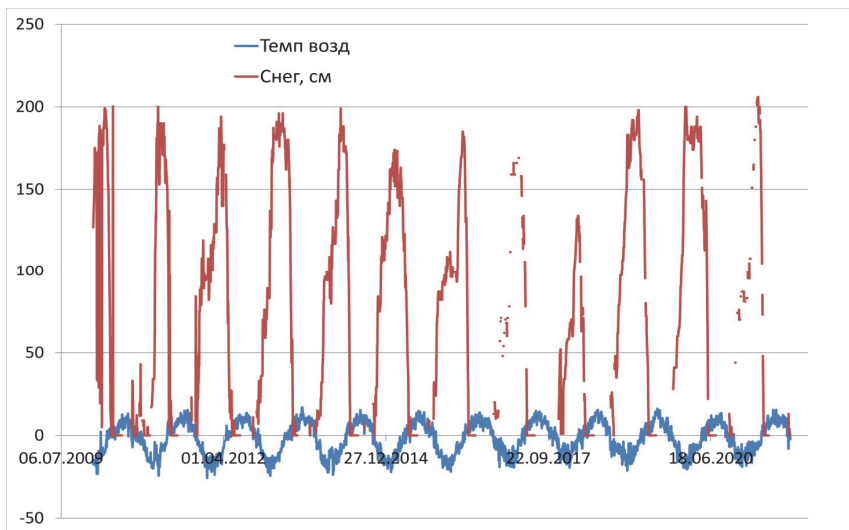


Рис. 3. Изменения температуры воздуха и толщины снежного покрова по архивным данным метеонаблюдений для метеостанции «Анзобский перевал» для зимних периодов 2010/11–2019/20

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:

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

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

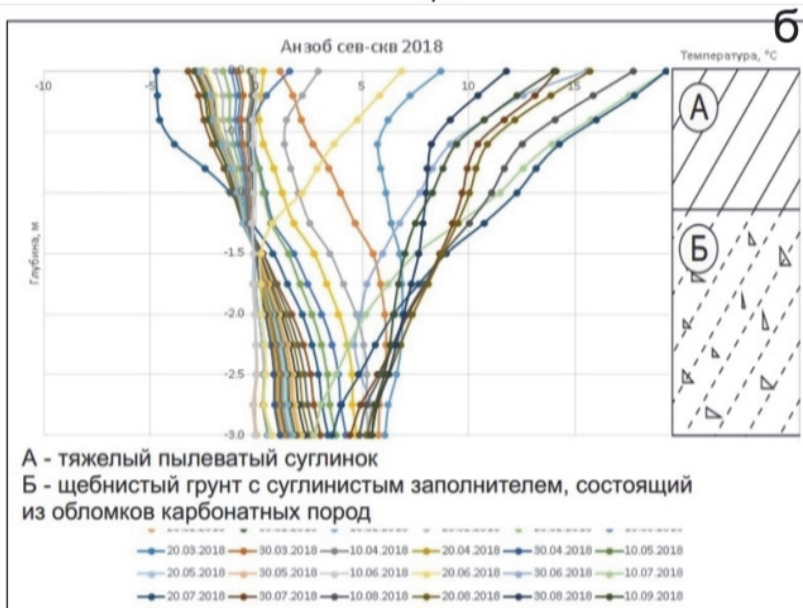


Рис. 4. Изменения температуры воздуха, толщины снежного покрова и глубины промерзания грунта по данным расчетов и наблюдений для метеостанции Анзобский перевал для зимнего периода 2017/18

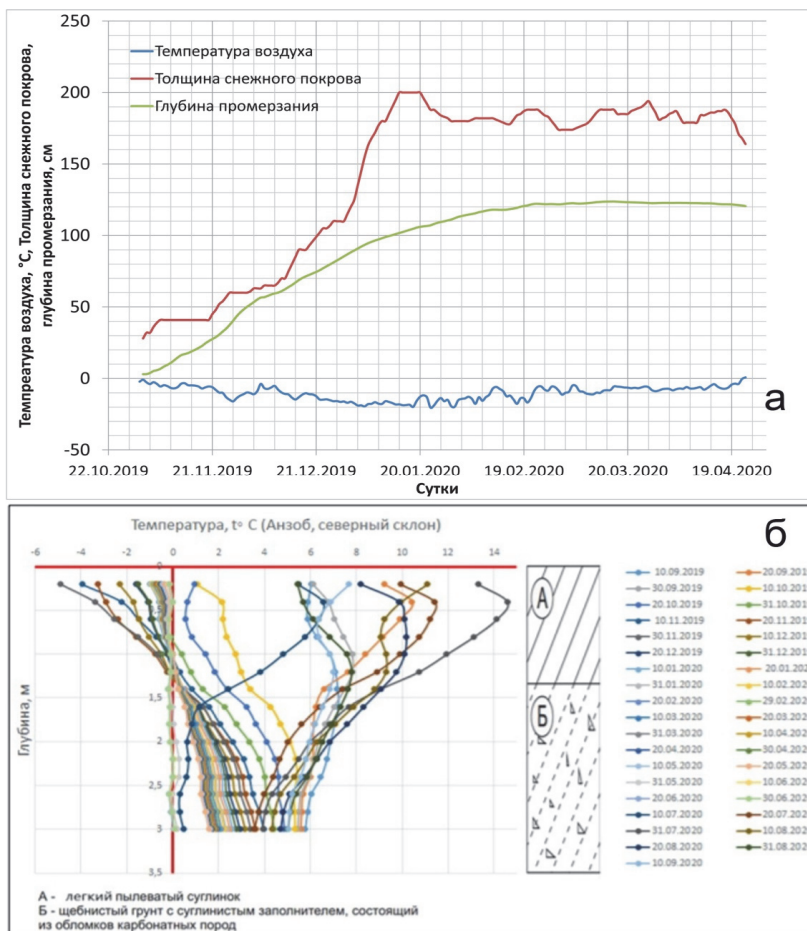


Рис. 5. Изменения температуры воздуха, толщины снежного покрова и глубины промерзания грунта по данным расчетов и наблюдений для метеостанции Анзобский перевал для зимнего периода 2019/20

Тепловой поток выражался по закону Фурье: $F = -\lambda \text{ grad} T$. Тепловой поток через замерзший 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 [2] как:

$$F_1 = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} = -\frac{\Delta T}{\frac{\Delta x_c}{\lambda_c} + \frac{\Delta x_{m2}}{\lambda_{m2}}} = \frac{-T_{возд}}{\frac{h_c}{\lambda_c} + \frac{h_{m2}}{\lambda_{m2}}}, \quad (2)$$

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

Предполагалось, что на глубине 10 м в грунте находится точка нулевых годовых колебаний температуры T_0 со среднегодовым значением около 2,42 °С. Поэтому

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

Здесь $\lambda_{\text{мг}}$ – теплопроводность талого грунта. Вычисления производились с шагом в один день. На первый момент предполагалось, что толщина мерзлого грунта $h_{\text{мг}}$ равнялась 0,5 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 [1], 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 [3] и бралась равной 0,18 Вт/(м·°С). 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 2010/11–2019/20 были произведены расчеты изменения глубины промерзания грунта. Примеры результатов расчета для зимних сезонов 2017/18 и 2018/2020 приведены на рис. 4 и 5.

Примененный метод расчета 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 расчетам, грунт под снежным покровом остается мерзлым на Анзобском перевале с декабря по апрель. Мощность накапливаемого снежного покрова может достигать при этом полутора метров и более. При этом грунт под покрытой снежным покровом поверхностью промерзает согласно расчетам в среднем на 1,5 м. Таким образом, предложенный метод расчета 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.

Выводы

Перевал Анзоб относится к области сезонного промерзания пород, учитывая градиент среднегодовой температуры пород можно заключить, что появление многолетнемерзлых пород на Гиссарском хребте мы можем ожидать на высотах более 4 тыс. м.

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).

Список литературы

1. Грунтоведение / под ред. В. Т. Трофимова. М. : Изд-во МГУ : Наука, 2005, 1024 с.
2. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е. М. : 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. Vol. 40, N 3. P. 546–555.

УДК 551.345

Концепция и первые результаты проекта создания государственной системы мониторинга многолетней мерзлоты РФ на базе наблюдательной сети Росгидромета

Н. Э. Демидов (nikdemidov@mail.ru), С. Р. Веркулич, М. А. Анисимов,
Ю. В. Угрюмов

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

Аннотация. Деградация многолетней мерзлоты – одно из очевидных негативных последствий теплеющего климата. В целях контроля реакции мерзлоты на климатические изменения в РФ планируется создание государственной системы мониторинга состояния многолетней мерзлоты с опорой на метеостанции Росгидромета. Метеостанции покрывают территорию криолитозоны, логистически доступны и, что особенно важно, обеспечены длительными рядами климатических наблюдений (в том числе, наблюдениями за температурой грунтов до глубины 3,2 м). Программой формирования сети мониторинга, разработанной в ФГБУ “ААНИИ”, предусматривается создание 140 пунктов с термометрическими скважинами и площадками наблюдения за сезонно-талым слоем. Рабочая документация наблюдений на пунктах мониторинга основана на российских ГОСТ и требованиях международной программы мониторинга мерзлоты GTNP. В 2022 г. начаты работы по выбору точек для организации пунктов, которые охватили север европейской части России, Западную и Южную Сибирь. В 2023 г. предполагается ввод в эксплуатацию первых тридцати пунктов мониторинга. В 2024–2025 гг. планируется организация еще 110 пунктов в пределах оставшейся части криолитозоны.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, криолитозона, фоновый мониторинг.

3 сентября 2021 г. Президент РФ утвердил перечень поручений Правительству РФ, среди которых (Пр-1971, п. 1.в) «обеспечить внесение в законодательство Российской Федерации изменений, направленных на создание на базе государственной наблюдательной сети Росгидромета государственной системы мониторинга состояния многолетней мерзлоты (ГСМ СММ), наделить Росгидромет необходимыми полномочиями, и предусмотреть выделение из федерального бюджета бюджетных ассигнований на разработку и функционирование ГСМ СММ при подготовке проекта федерального закона о федеральном бюджете на 2023 год и на плановый период 2024 и 2025 годов».