

ГЕОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ И ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В КРИОСФЕРЕ

УДК 551.525; 502.2.05

DOI: 10.15372/KZ20210402

ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ
НА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МОХОВОГО ПОКРОВА
ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НА ШПИЦБЕРГЕНЕ

Н.И. Осокин, А.В. Сосновский

*Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, Россия;
osokinn@mail.ru, alexandr_sosnovskiy@mail.ru*

На основе экспериментальных исследований дана оценка влияния температуры воздуха и типа погоды на теплоизоляционные свойства мохового покрова. Показано, что в солнечную погоду при небольшой облачности максимальная температура поверхности породы под мхом толщиной 1 см почти на 13 °С выше, чем под мхом толщиной 5 см, тогда как в облачную погоду это различие составляет 3 °С. Измерения показали, что за период с 6 июля по 8 августа 2016 г. средняя температура 70-сантиметрового слоя породы под моховым покровом толщиной 5 см была на 1.5 °С ниже, чем под слоем мха толщиной 1 см.

Ключевые слова: метеорологические условия, моховой покров, температура породы, Шпицберген.

INFLUENCE OF METEOROLOGICAL CONDITIONS
ON THE THERMAL INSULATION PROPERTIES OF MOSS COVER ACCORDING
TO MEASUREMENTS ON SVALBARD

N.I. Osokin, A.V. Sosnovsky

*Institute of Geography, RAS, Staromonetny lane 29, Moscow, 119017, Russia;
osokinn@mail.ru, alexandr_sosnovskiy@mail.ru*

On the basis of experimental studies, an assessment of the influence of air temperature and weather type on the heat-shielding properties of the moss cover has been given. It has been revealed that in sunny weather with light cloudiness, the highest temperature of the soil surface under 1 cm thick moss is almost by 13 °C higher than under 5 cm thick moss, while in cloudy weather that difference is 3 °C. The measurements has demonstrated that for the period of 06.07 to 08.08.2016, the average temperature of the 70 cm thick soil layer under the 5 cm thick moss cover was by 1.5 °C lower than that under the 1 cm thick one.

Key words: meteorological conditions, moss cover, ground temperature, Svalbard.

ВВЕДЕНИЕ

Для исследования реакции многолетнемерзлых пород на текущие изменения климата и для разработки методов снижения негативных последствий деградации многолетней мерзлоты необходимо изучение влияния напочвенных покровов на термический режим породы. Напочвенные покровы оказывают существенное влияние на температуру почвы [Каверин и др., 2019; Novikova, 2016]. Наиболее распространенным напочвенным покровом в криолитозоне является моховой покров, который является естественным теплоизолятором. Его теплоизоляционные свойства и их динамика в течение года изучены недостаточно. Это связано как с большим видовым разнообразием мхов, так и с недостаточными исследованиями их теплофизических параметров. Теплоизолирующая роль

поверхностных покровов арктической тундры рассмотрена в монографии [Павлов, 2008], в которой представлены результаты изучения влияния поверхностных покровов на температуру поверхности почвы. Обзор исследований по коэффициенту теплопроводности мхов представлен в работе [Тишков и др., 2013].

Моховой покров, как и снежный покров, уменьшает теплообмен между нижними слоями атмосферы и подстилающей поверхностью. Однако в отличие от снежного покрова, теплоизоляционная роль которого проявляется в основном в период с отрицательными температурами воздуха, действие мохового покрова круглогодично. Так, в период с положительными температурами воздуха моховой покров защищает поверхностный слой

породы от нагрева, а в зимний период – от выхолаживания, особенно при небольшой толщине снега. Снежный покров защищает породу от прогрева до положительных температур только в период таяния и при оттепелях. В летний период моховой покров является основным фактором, уменьшающим прогревание и протаивание породы, а в холодный период года служит лишь дополнением к теплоизоляционному действию снежного покрова.

Для определения влияния мохового покрова на термический режим породы в теплый период года авторами в течение 30 дней в июле–августе были проведены натурные измерения в районе гидрометеостанции (ГМС) Баренцбург (о. Западный Шпицберген). Их целью было исследование влияния мохового покрова на температурный режим породы в зависимости от температуры воздуха и типа погоды. Предыдущие исследования [Тишков и др., 2013] показали, что в середине августа в районе пос. Баренцбург температура поверхности породы под моховым покровом толщиной 8 см на 4 °С ниже, чем при его отсутствии. При этом глубина протаивания многолетнемерзлой породы, представленной суглинком, под моховым покровом толщиной 8 см составила 0.98 м при температуре породы на этой глубине 0 °С. На соседнем участке без мохового покрова температура аналогичного типа породы на глубине 0.98 м была 4 °С при глубине протаивания 1.9 м. По данным измерений глубина проникновения суточных колебаний температуры в породу под моховым покровом составляла 0.1 м, тогда как в отсутствие мохового покрова эта величина составляла 0.3 м. В период с положительными температурами воздуха наличие мохового покрова снижает температуру породы и значительно уменьшает глубину ее протаивания.

В холодный период года теплопроводность промерзшего мха *Hylocomium splendens* var. *alascanum* в 3–4 раза больше, чем в летний [Там же]. Это обусловлено тем, что теплопроводность льда приблизительно в 4 раза больше, чем у воды, и в период осенних дождей влажность мха перед промерзанием увеличивается. Промерзший моховой покров представляет собой прочный мохово-ледяной монолит. Поэтому промерзший моховой покров не является существенным препятствием для выхолаживания подстилающих пород в холодный период года.

Известно, что время начала формирования несливающейся мерзлоты зависит от климатических изменений, параметров снежного и мохового покровов, влажности породы [Общее мерзлотоведение, 1978; Павлов, 2008]. Наши расчеты [Сосновский, Осокин, 2018] показали, что для условий архипелага Шпицберген при толщине снежного покрова 1 м и влажности супеси 18 % наличие

мохового покрова *Hylocomium splendens* var. *alascanum* толщиной 5 см сдвигает начало формирования несливающейся мерзлоты, с учетом данных региональной модели изменения климата [Forland et al., 2011], на 24 года. Таким образом, в условиях небольших (4–5 °С) среднесуточных положительных температур воздуха на Шпицбергене снижение среднегодовой температуры породы под моховым покровом на несколько градусов может компенсировать возможный рост температуры воздуха при потеплении, что предохраняет многолетнюю мерзлоту от деградации. Так, в работе [Cable et al., 2016] отмечается, что в некоторых ландшафтах Западной Аляски отсутствие мохового слоя указывает на отсутствие вблизи поверхности многолетней мерзлоты. Поэтому при расчетах влияния климатических изменений на состояние многолетнемерзлой породы необходимо учитывать теплоизоляционную роль мохового покрова.

Теплоизоляционные свойства мха характеризуются его термическим сопротивлением и зависят как от теплопроводности, так и от его видовых особенностей, определяющих влажность, плотность, структуру. Теплоизоляционная роль мха, определяющая разность температур на поверхности и подошве слоя мха, зависит от его термического сопротивления, метеоусловий и свойств подстилающих пород. В работе [Алексеев, 2014] отмечается, что потепление в Арктике связано с изменениями в режиме приходящей солнечной радиации. В солнечную погоду теплоизоляционная роль мха возрастает по сравнению с облачной погодой. Это обусловлено, в частности, разным значением альбедо поверхности породы и мха. Так, альбедо почвы без растительности составляет 17 %, мха черного цвета – 18 %, а мха зеленого цвета (сплошной покров) 32 % [http://www.ifaran.ru/...reports/Artamonov.pdf], при этом в ясную погоду суммарная солнечная радиация в несколько раз больше, чем в облачную. В результате участки породы, покрытые моховым покровом, будут отражать значительно больше солнечной радиации, чем участки породы без мохового покрова. В облачную погоду различие в температурном режиме этих участков будет значительно меньше.

Влажность мха и, как следствие, его теплопроводность [Тишков и др., 2013] зависят от метеоусловий. Поэтому изменчивость метеопараметров при изменении климата будет влиять на теплоизоляционные свойства мха и теплообмен в системе “атмосфера–почва”.

В условиях изменения климата увеличивается количество опасных метеорологических явлений [Доклад..., 2020], к которым относятся и сильные осадки. За последние 20 лет их число увеличилось почти в 3 раза. Уменьшение количества дождливых дней было зафиксировано на большей

части суши, за исключением высоких широт в Северном полушарии. В период 2000–2099 гг. прогнозируется увеличение средней интенсивности осадков по всей территории суши. Анализ хода количества среднегодовых осадков за 1900–1999 гг. выявил положительные тенденции над континентальными районами [Semenov, Bengtsson, 2002]. Установлено непропорциональное увеличение количества сильных осадков на суше, включая локальные максимумы в Европе и восточной части Соединенных Штатов. С 1915 по 2005 г. количество средних годовых осадков на большей части архипелага Шпицберген возросло на 10–20 % [Forland et al., 2011]. В условиях дождливой погоды часть осадков аккумулируется в моховом покрове, увеличивая его влажность и теплопроводность.

В работе [Покровский, 2019] представлены результаты анализа глобальной и региональной облачности за 1983–2009 гг., полученные в рамках Международного спутникового проекта ISCCP. Результаты анализа показали уменьшение глобальной и региональной облачности на 2–6 %.

Таким образом, в результате изменений климата и метеорологических параметров может измениться теплоизолирующая роль мохового покрова. Поэтому исследование влияния динамики температуры воздуха, солнечной радиации, облачности и осадков на термический режим породы под моховым покровом позволит более точно прогнозировать влияние климатических изменений на деградацию многолетней мерзлоты.

Цель исследований – оценка влияния метеорологических условий на теплоизоляционные свойства мохового покрова и термический режим деятельного слоя арктических почв по данным измерений на архипелаге Шпицберген.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МХА

На архипелаге Шпицберген представлены десятки видов мхов. Они различаются как толщиной мохового покрова, так и структурными особенностями. Одним из наиболее распространенных видов мха в районе пос. Баренцбург (о. Западный Шпицберген) является *Hylocomium splendens* var. *alaskanum*. Его толщина составляет 5–8 см и плотность при влажности 200 % равна 176 кг/м³. Влияние мохового покрова на протаивание приповерхностного слоя многолетнемерзлых пород выражается в реакции термического состояния породы под моховым покровом на изменчивость метеорологических условий, особенно в летний период. При этом важным фактором являются теплофизические свойства мха, определяющие его теплоизоляционную способность. Обзор исследований теплофизических свойств мха представлен в работе [Тишков и др., 2013], в которой приведены коэф-

фициенты теплопроводности некоторых видов мхов, полученные в ходе полевых исследований.

Коэффициенты теплопроводности мха *Hylocomium splendens* var. *alaskanum* рассчитываются в теплый (λ_t) и холодный (λ_c) периоды года по формулам [Тишков и др., 2013]:

$$\lambda_t = 0.0003w + 0.0645, \lambda_c = 0.0014w + 0.0645,$$

где w – влажность мохового покрова, %.

При влажности мха 200 % его коэффициенты теплопроводности летом и зимой составляют 0.12 и 0.34 Вт/(м·К), а термическое сопротивление 5-сантиметрового слоя мха 0.40 и 0.15 (м²·К)/Вт соответственно. В зимний период термическое сопротивление слоя мха толщиной 5 см и влажностью 200 % приблизительно соответствует термическому сопротивлению слоя снега толщиной 2.5 см при плотности 200 кг/м³. Отметим, что следствием этих формул является рост коэффициента теплопроводности мха при увеличении его влажности. Поэтому в солнечную погоду при снижении влажности мха его теплопроводность ниже, что усиливает его теплоизоляционные свойства по сравнению с дождливой погодой.

Теплопроводность талого мха зависит от его вида и влажности и изменяется в пределах 0.1–0.2 Вт/(м·К) [Там же]. Теплопроводность промерзшего мха увеличивается в 2–3 раза при росте его влажности.

По данным П.Н. Скрыбина [Павлов, 1980], летом 1978 г. на Сырдахском стационаре (Якутия) для бриевых мхов, которые отличаются большим видовым разнообразием, с влажностью 74–350 % получены значения коэффициента теплопроводности 0.08–0.30 Вт/(м·К). При средней влажности 200 % коэффициент теплопроводности мха составил 0.14 Вт/(м·К).

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТЕОУСЛОВИЯ В ПЕРИОД ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения температуры породы производились в условиях арктической тундры побережья залива Грэн-фьорд (о. Западный Шпицберген) в непосредственной близости от метеостанции Баренцбург (пос. Баренцбург) в период с 6 июля по 8 августа 2016 г. Остров Западный Шпицберген представляет собой горный район, больше половины площади которого покрыто ледниками. В прибрежной зоне есть равнинные территории, свободные ото льда и представляющие собой арктическую тундру со слабо развитым почвенным покровом, для которой характерны низкие температуры воздуха, небольшое содержание органических веществ в почве и частые циклы замерзания–оттаивания.

Для о. Западный Шпицберген в районе аэропорта Свальбард средняя годовая температура

воздуха с 1961–1990 по 1981–2010 гг. выросла с -6.7 до -4.6 °С. За календарные летние и зимние месяцы температура воздуха за эти периоды повысилась с 4.2 до 5.2 °С и с -15.1 до -11.7 °С [Forland et al., 2011]. Рост температуры воздуха приводит к увеличению мощности сезонноталого слоя (СТС). Мониторинг мощности СТС по скважине, пробуренной в Янссенхаугене (*Janssonhaugen*) в 20 км от столицы Шпицбергена – Лонгира [http://www.mosj.no/...], показал, что за 20 лет (с 1998 по 2017 г.) мощность СТС увеличилась в 1.2 раза (с 154 до 185 см).

Для измерений температуры породы были выбраны две площадки со мхом толщиной 1 см (*Gymnomitrium* sp. – печёночник с темной поверхностью) и толщиной 5 см (*Hylocomium splendens* var. – зеленого цвета) диаметром не менее 5 м каждая. Температурные датчики были помещены в супесь (влажностью 18 %) на глубину от 0 до 90 см с интервалом 10–20 см и на высоте 10 см над поверхностью мха. Мощность СТС варьировала от 120 до 250 см. Интервал записи температуры составлял 30 мин, что позволяло отслеживать влияние изменчивости метеоусловий на температуру пород СТС. Температура воздуха (данные с сайта http://rp5.ru/archive.php?wmo_id=20107) в период наблюдений изменялась от 13.6 °С (10.07.2016 г.) до 3.4 °С (08.08.2016 г.) (рис. 1). При этом максимальный суточный перепад температуры составил 5.8 °С и был зафиксирован 2 августа 2016 г. За период измерений были отмечены дни с небольшой облачностью и максимальной суммарной суточной солнечной радиацией и дни со 100%-й облачностью и ливнями с интенсивностью до 20 мм осадков в течение нескольких часов (см. рис. 1).

Температура воздуха в значительной степени определяется солнечной радиацией. Так, суточные максимумы температуры воздуха приходятся

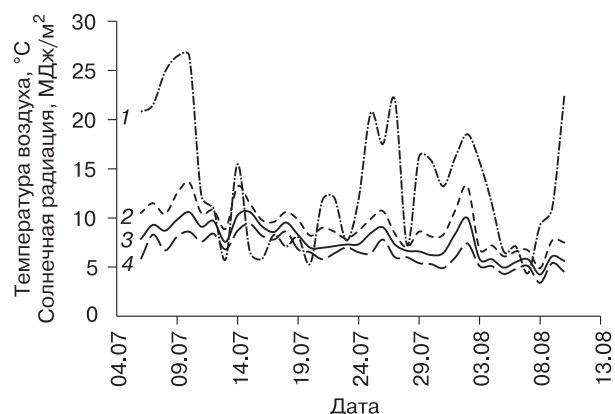


Рис. 1. Динамика суммарной солнечной радиации (1) и температуры воздуха.

Температура воздуха: 2 – максимальная, 3 – средняя суточная, 4 – минимальная.

в основном на максимумы суммарной суточной солнечной радиации (см. рис. 1). Максимальная суммарная суточная солнечная радиация приходится на 9 и 10 июля 2016 г. и равна 26.5 МДж/м². Минимальная суммарная суточная солнечная радиация зафиксирована 7 августа 2016 г. и равна 4.4 МДж/м². В этот день выпало 26 мм осадков.

Небольшие значения солнечной радиации приходится на 13, 16 и 20 июля 2016 г. (ливни и морось) и составляют 5.3 – 5.8 МДж/м². Среднее значение суммарной солнечной радиации за период 06.07–08.08.2016 г. равно 13.3 МДж/м².

Влияние суточной динамики метеоусловий на термический режим деятельного слоя при разной толщине мохового покрова

Рассмотрим влияние метеоусловий (температуры воздуха, солнечной радиации, облачности и осадков) на термический режим СТС при моховом покрове разной толщины.

На рис. 2, а представлены значения температуры воздуха 09.07.2016 г. по данным ГМС Баренцбург (высота над уровнем моря 73 м), температуры воздуха на высоте 10 см над поверхностью мха, температуры на поверхности породы и на глубине 10 и 20 см под моховым покровом толщиной 1 и 5 см при ясной погоде, максимальной суточной радиации и средней скорости ветра 3 м/с.

Измерения показали, что в солнечную погоду при небольшой облачности температура воздуха на высоте 10 см над поверхностью мха толщиной 1 см (кривая 2) больше, чем над мхом толщиной 5 см (кривая 3). После 9 часов утра эта разница достигает 2 °С. При этом наибольшая температура воздуха на высоте 10 см достигает 22 °С в 18 часов 30 минут. Наибольшая температура воздуха на ГМС Баренцбург составляла 12.5 °С в 21 час.

Температура поверхности породы под мхом толщиной 1 см (кривая 4) под действием солнечной радиации постоянно растет и достигает 23.4 °С в 16 часов. При этом под моховым покровом толщиной 5 см наибольшая температура поверхности породы составляет 10.6 °С в 17 часов (кривая 5), что на 12.8 °С ниже, чем под мхом толщиной 1 см. Результаты измерений показали, что максимальная разница температуры поверхности породы под мхом толщиной 1 см и породы на глубине 10 см составляла 14 °С. Наибольшая температура породы на глубине 10 и 20 см под мхом толщиной 1 см составляла 9.6 и 7.2 °С соответственно. Температура породы на глубине 20 см под мхом толщиной 1 и 5 см различалась приблизительно на 1.5 °С (кривые 6, 7).

Ясная солнечная погода наблюдалась и в другие дни. Так, 02.08.2016 г. максимальные значения температуры поверхности породы под мхом толщиной 1 см (в 16:30) и 5 см (в 18:30) составляли 22

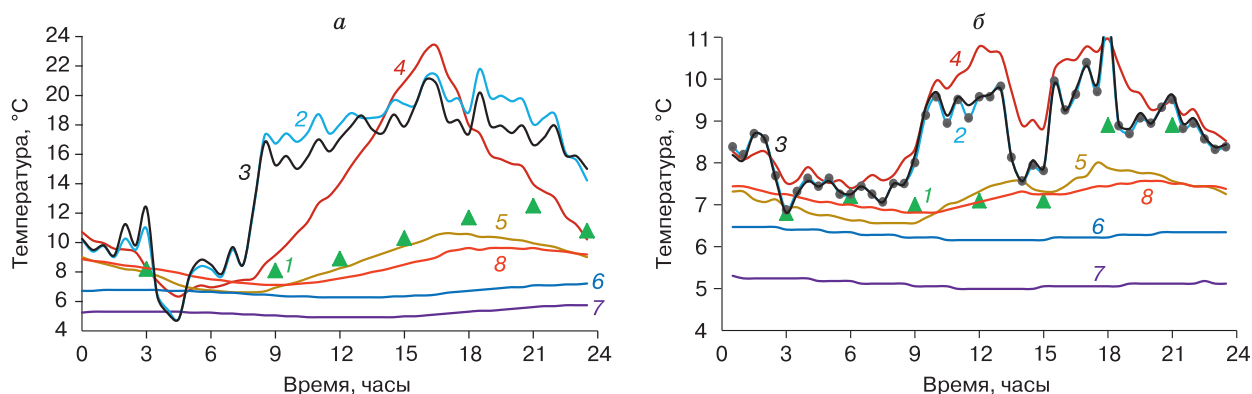


Рис. 2. Температура воздуха и породы 09.07.2016 г. при ясной погоде и максимальной суточной радиации (а) и 13.07.2016 г. при 100%-й облачности и осадках (б).

Температура воздуха: 1 – по данным ГМС Баренцбург; 2, 3 – на высоте 10 см над поверхностью мха. Температура породы: 4, 5 – на поверхности; 6, 7 – на глубине 20 см; 8 – на глубине 10 см. Толщина мха: 1 см (2, 4, 6, 8) и 5 см (3, 5, 7).

и 11 °С соответственно. При этом максимальное значение температуры поверхности породы под мхом толщиной 5 см было достигнуто на 2 ч позже. Максимальное значение температуры воздуха на метеостанции Баренцбург в этот день достигало 13.2 °С в 15 часов.

В солнечный день 26.07.2016 г. при общей облачности 10 % температура воздуха в 19 часов на высоте 10 см над мхом толщиной 1 см составляла 18.5 °С и 16.9 °С над мхом толщиной 5 см. Отметим, что в пасмурный и дождливый день 07.08.2016 г. при ливне (21 мм осадков) и общей облачности 100 % температура воздуха в 6 часов на высоте 10 см над мхом толщиной 1 и 5 см была практически равной и составляла 5.4 °С.

Разность температуры поверхности породы и температуры воздуха (в солнечный день 26.07.2016 г.) на высоте 10 см над моховым покровом толщиной 1 см составляла 3.5 °С, тогда как при толщине мха 5 см равна 7.2 °С. При этом температура поверхности породы под мхом толщиной 1 см была на 5.2 °С больше, чем под мхом толщиной 5 см. Температура поверхности породы под мхом толщиной 5 см в основном не отличается от температуры воздуха на метеостанции.

Результаты измерений в облачный дождливый день 13.07.2016 г. (при средней скорости ветра 2 м/с) температуры воздуха, температуры поверхности породы под мхом толщиной 1 и 5 см и породы на глубине 10 и 20 см представлены на рис. 2, б.

В этот день (13.07.2016 г.) была отмечена 100%-я облачность и минимальная суточная солнечная радиация. При этом в 6 и 9 часов выпало по 2 мм осадков. В период после 18 и до 23 часов шли ливневые осадки и температура поверхности породы под слоем мха толщиной 1 см упала на 2.5 °С (с 11.0 до 8.5 °С), а под слоем мха толщиной 5 см

температура снизилась на 0.7 °С (с 7.9 до 7.2 °С). При этом температура поверхности породы под мхом толщиной 1 см была на 3 °С больше, чем под мхом толщиной 5 см, в основном в дневное время, тогда как ночью разница в 2 раза меньше. Температура породы на глубине 20 см под мхом толщиной 1 и 5 см различалась приблизительно на 1 °С. Температура поверхности породы под мхом толщиной 5 см (кривая 5) и температура породы на глубине 10 см под мхом толщиной 1 см (кривая 8) достаточно близки к температуре воздуха в период до 16 часов.

Близкая картина имела место 07.08.2016 г. при 100%-й облачности и осадках. Ночью температура воздуха, по данным ГМС Баренцбург, была на 0.5 °С больше, чем над поверхностью мха, тогда как в дневные часы эта разница меняла знак и увеличивалась до 1 °С. При этом в дневные часы температура поверхности породы под слоем мха толщиной 1 см превышала температуру воздуха над мхом (на высоте 10 см) почти на 1.5 °С.

Количество осадков 07.08.2016 г. составило 10 и 11 мм в 6 и 9 часов и 3 и 2 мм в 18 и 21 часов соответственно, при 100%-й облачности. Через 1 ч после начала ливня, в 18 часов, температура поверхности породы под мхом толщиной 1 см упала с 8.6 до 5.8 °С, а под мхом толщиной 5 см – с 7.0 до 6.2 °С. Измерения показали, что в облачную погоду температура воздуха на высоте 10 см над моховым покровом толщиной 5 и 1 см в основном совпадает (см. рис. 2, б). Средняя суточная разность этих температур составляла 0.2 °С. При небольшой облачности в результате разницы в альbedo мха (из-за его цвета) температура над мхом толщиной 1 см на 1 °С больше, чем над мхом толщиной 5 см (см. рис. 2, а). Температура воздуха на метеостанции Баренцбург (на высоте 2 м) ниже температуры воздуха над мхом. Наибольшая су-

точная разность этих температур составляла около 4 °С (см. рис. 2, а), при среднесуточном значении 2.7 °С.

Измерения температуры породы под мхом толщиной 1 и 5 см в самый холодный и теплый дни и температуры воздуха на высоте 10 см над мхом показали следующее. В теплый день 15.07.2016 г. (средняя суточная температура воздуха $T_a = 10.8$ °С) средняя температура породы на глубине 20–70 см под слоем мха толщиной 1 см была на 1.6 °С больше, чем под мхом толщиной 5 см. В холодный день 08.08.2016 г. ($T_a = 4.4$ °С) это превышение составляло 0.5 °С. Средняя суточная температура воздуха на высоте 10 см над мхом толщиной 1 и 5 см составляла в самый теплый день 14.3 и 11.6 °С, а в холодный день соответственно 6.8 и 5.7 °С.

Рассмотрим влияние типа погоды на теплоизоляционную способность мохового покрова. В ясную погоду в 16 часов температура на поверхности породы и на глубине 20 см под моховым покровом толщиной 5 см равна 10.5 и 5.1 °С соответственно (см. рис. 2, а). Перепад температур при этом составит 5.4 °С, тогда как под моховым покровом толщиной 1 см эта разность равна 16.9 °С. Температурный градиент на глубине 0–20 см, определяющий поток тепла в породу, в этих случаях равен 27 и 88 °С/м соответственно. Теплоизоляционное воздействие мохового покрова толщиной 5 см в солнечную погоду в 3.3 раза больше, чем мохового покрова толщиной 1 см, что значительно снижает тепловой поток в породу.

В облачную погоду на этот же момент времени (см. рис. 2, б) градиенты равны 13 и 22 °С/м, и теплоизоляционное воздействие мохового покрова толщиной 5 см в 1.7 раза больше, чем мохового покрова толщиной 1 см. Таким образом, в ясную солнечную погоду теплоизоляционная роль мохового покрова толщиной 5 см почти в 2 раза выше,

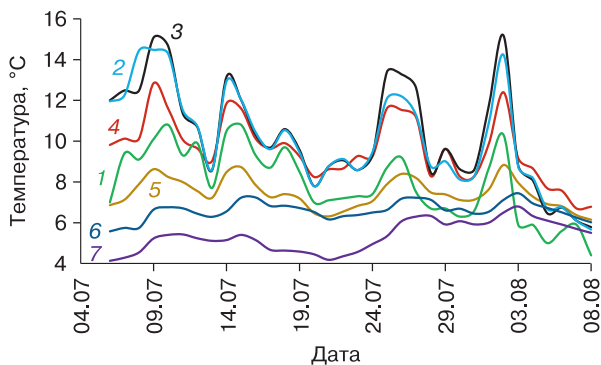


Рис. 3. Динамика температуры воздуха и температуры породы.

Температура воздуха: 1 — по данным ГМС Баренцбург; 2, 3 — на высоте 10 см над поверхностью мха. Температура породы: 4, 5 — на поверхности; 6, 7 — на глубине 20 см. Толщина мха: 1 см (2, 4, 6) и 5 см (3, 5, 7).

чем в облачную. Это обусловлено большей ролью альbedo мохового покрова в солнечную погоду (за счет большего значения суммарной солнечной радиации в безоблачный день, см. рис. 1), так и возможным изменением влажности мха. В солнечную погоду происходит небольшое снижение влажности мха при его нагревании под солнцем и уменьшение коэффициента теплопроводности.

Наибольшая разность температуры поверхности породы под моховым покровом толщиной 1 см в ясный (см. рис. 2, а) и облачный (см. рис. 2, б) дни составила 12.4 °С, тогда как под моховым покровом толщиной 5 см эта разность почти в 5 раз меньше и равна 2.6 °С.

Влияние мохового покрова на температуру породы за период наблюдений

Изменение средней суточной температуры воздуха и породы под мхом толщиной 1 и 5 см за период наблюдений с 6 июля по 8 августа 2016 г. представлено на рис. 3. Средняя за этот период скорость ветра составляла 2.7 м/с. Измерения показали, что при локальных максимумах температуры воздуха ее значения на высоте 10 см над мхом толщиной 1 см (кривая 2) больше, чем над мхом толщиной 5 см (кривая 3). Причем эти значения больше температуры воздуха по данным метеостанции Баренцбург (кривая 1). Наибольшая разница температур поверхности породы под мхом толщиной 1 и 5 см (кривые 4, 5) приходилась на 09.07.2016 г. и составляла 4.2 °С.

Средняя за период измерений температура поверхности породы составляла 7.4 °С под мхом толщиной 5 см и 9.6 °С под мхом толщиной 1 см, при средней температуре воздуха на ГМС Баренцбург, равной 7.9 °С. Средняя температура породы на глубине 20 см под мхом толщиной 1 см (кривая 6) была на 2.2 °С больше, чем под мхом толщиной 5 см (кривая 7).

Наибольшая разница температуры породы на глубине 20 см под мхом толщиной 1 и 5 см, равная 2.2 °С, приходилась на 21.07.2016 г. При средней температуре воздуха 7.9 °С средняя температура породы на глубине 20 см составляла 5.4 °С под мхом толщиной 5 см и 6.6 °С под мхом толщиной 1 см.

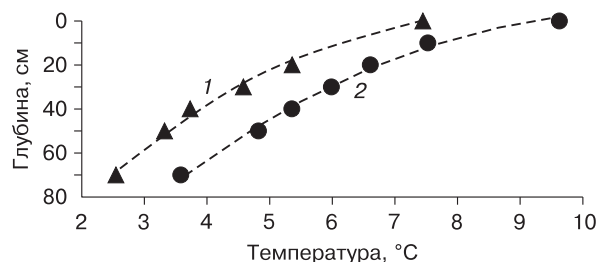


Рис. 4. Распределение по глубине средней температуры породы за период 06.07–08.08.2016 г. под мхом толщиной 5 см (1) и 1 см (2).

Измерения показали, что в начале периода измерений 06.07.2016 г. температура породы на глубине 50 см под мхом толщиной 1 и 5 см составляла 3.2 и 1.3 °С соответственно. Наибольшая разность температуры породы приходилась на 16.07.2016 г. и составляла 2.8 °С. Средняя разность температуры породы на глубине 50 см под мхом толщиной 1 и 5 см составляла 1.5 °С.

Распределение средней за период 06.07–08.08.2016 г. температуры породы на глубине от 0 до 70 см под мхом толщиной 1 и 5 см представлено на рис. 4. Средняя по глубине температура породы под слоем мха толщиной 5 см была на 1.5 °С ниже, чем под слоем мха толщиной 1 см. Таким образом, удаление мохового покрова толщиной 5 см при инженерном освоении территории может приводить к повышению температуры СТС на 1.5 °С. На глубине 70 см средняя за период измерений температура породы под моховым покровом толщиной 1 и 5 см составляла 3.6 и 2.5 °С соответственно; на глубине 40 см равна 5.4 и 3.7 °С и на поверхности породы 9.6 и 7.4 °С.

Влияние температуры воздуха на температуру породы под моховым покровом

Исследования показали, что при разной температуре воздуха теплоизоляционная роль мохового покрова может быть различной. Температура поверхности породы для мха толщиной 1 и 5 см в зависимости от среднесуточной температуры воздуха на ГМС Баренцбург представлена на рис. 5, а. Зависимость среднесуточной температуры поверхности породы (T_s) от среднесуточной температуры воздуха на метеостанции (T_a) для мха толщиной 1 см аппроксимируется формулой

$$T_s = 0.740 T_a + 3.745, R^2 = 0.717,$$

для мха толщиной 5 см – формулой

$$T_s = 0.304 T_a + 5.031, R^2 = 0.542,$$

где R^2 – величина достоверности.

Эти зависимости являются статистически значимыми при уровне значимости 5 %. При росте температуры воздуха (на ГМС Баренцбург) увеличивается разность температур поверхности породы под мхом разной толщины. При среднесуточной температуре воздуха $T_a = 4.4$ °С среднесуточная температура поверхности породы под мхом толщиной 1 и 5 см составляет 6.8 и 6.1 °С, тогда как при температуре воздуха 10.8 °С эти значения составляли уже 11.6 и 8.2 °С соответственно (см. рис. 5, а). В результате при росте температуры воздуха от 4.4 до 10.8 °С разность температуры поверхности породы под моховым покровом толщиной 1 и 5 см увеличивается от 0.7 до 3.4 °С (см. рис. 5, а).

Зависимость температуры породы на глубине 20 см под моховым покровом толщиной 1 и 5 см от температуры воздуха представлена на рис. 5, б. На рис. 5, б видно, что при температуре воздуха более 7 °С средняя температура породы на глубине 20 см под моховым покровом толщиной 1 см на 1.5 °С больше, чем для мха толщиной 5 см. При температуре воздуха менее 7 °С разность температуры породы под моховым покровом толщиной 1 и 5 см почти в 2 раза меньше. Таким образом, с ростом температуры воздуха увеличивается теплоизоляционная роль мохового покрова. При наличии значительной облачности и осадков влияние мохового покрова на температурный режим поверхности породы значительно слабее.

Это обусловлено тем, что рост температуры воздуха более 7 °С происходит в основном за счет солнечной радиации, которая приводит к наибольшей дифференциации температур под мхом (см. рис. 2, а). В облачную погоду температура воздуха и суммарная солнечная радиация меньше (см. рис. 1), и разность температуры породы под моховым покровом разной толщины и с различными значениями альбедо меньше (см. рис. 2, б). Другим фактором является различие в динамике изменения температуры породы под моховым по-

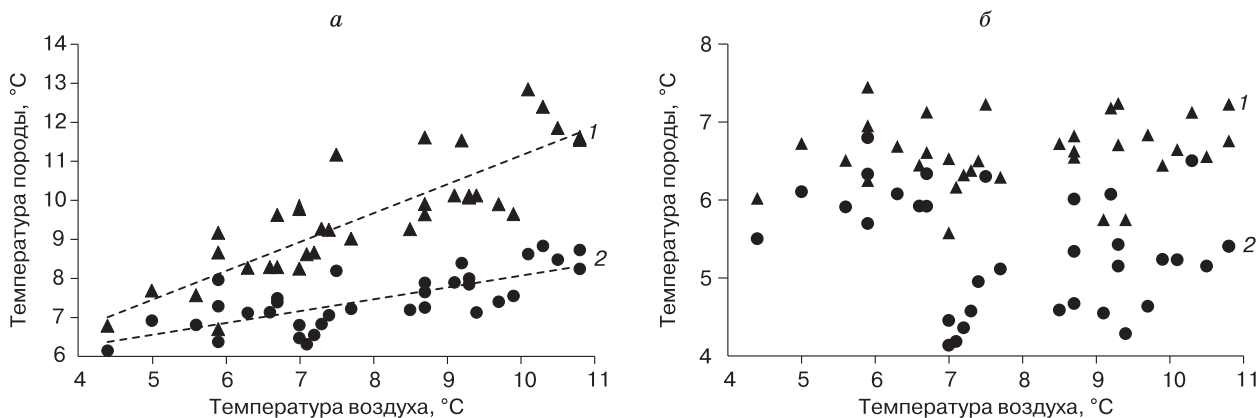


Рис. 5. Зависимости температуры поверхности породы (а) и температуры породы на глубине 20 см (б) от температуры воздуха для мха толщиной 1 см (1) и 5 см (2).

кровом при изменении температуры воздуха. Так, при понижении температуры воздуха изначально более нагретый слой породы под мхом толщиной 1 см (по сравнению со мхом толщиной 5 см) быстрее остынет по сравнению с породой, защищенной 5-сантиметровым моховым покровом. В результате температура поверхности породы под мхом толщиной 1 см может временно стать даже ниже, чем температура поверхности породы под слоем мха толщиной 5 см.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях потепления климата изменяется как глобальная, так и региональная облачность, сокращается количество дождливых дней за счет увеличения интенсивности ливней и роста числа дней с экстремальными осадками, происходят изменения в режиме приходящей солнечной радиации.

Результаты исследований показали, что в зависимости от типа погоды и температуры воздуха изменяется теплоизоляционная роль мохового покрова.

В солнечную погоду при небольшой облачности температура поверхности породы под мхом *Gymnomitrium* sp. толщиной 1 см с темной поверхностью (альbedo мха близко к альbedo породы) увеличивается до 23.4 °С, тогда как под зеленым моховым покровом *Hylocomium splendens* var. толщиной 5 см (альbedo мха в 2 раза больше, чем альbedo породы) наибольшая температура поверхности породы ниже на 12.8 °С. В облачную погоду температура поверхности породы под мхом толщиной 1 см не превышала 11 °С, что почти на 12 °С ниже, чем в солнечную погоду, при том что максимальная температура воздуха, по данным ГМС Баренцбург равная 12.5 °С в солнечную и 8.9 °С в облачную погоду, отличалась только на 3.6 °С.

Влияние мохового покрова на температуру породы обусловлено как его толщиной, так и величиной альbedo. Кроме того, в дождливую погоду часть осадков аккумулируется в моховом покрове, увеличивая его влажность и теплопроводность. Поэтому после дождя может происходить быстрое нагревание породы под моховым покровом.

Измерения показали, что при росте температуры воздуха увеличивается разность температуры поверхности породы под моховым покровом толщиной 1 и 5 см, температура поверхности породы под мхом толщиной 5 см растет значительно медленнее, чем под моховым покровом толщиной 1 см.

В ясную солнечную погоду теплоизоляционное влияние мохового покрова почти в 2 раза сильнее, чем в облачную. Это обусловлено в основном большей ролью альbedo мохового покрова в солнечную погоду по сравнению с облачной.

Установлено, что за период с 6 июля по 8 августа 2016 г. температура 70-сантиметрового слоя породы под моховым покровом толщиной 5 см была в среднем на 1.5 °С ниже, чем под слоем мха толщиной 1 см. В результате под слоем мха толщиной 5 см будет значительно меньше глубина протаивания породы и будут дольше сохраняться многолетнемерзлые породы.

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы государственного задания № 0148-2019-0004 и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-55-80107 БРИКС а). Экспедиционные исследования на архипелаге Шпицберген осуществлялись при финансовой поддержке госзадания № 0127-2019-0009 и логистической помощи Российского научного центра на Шпицбергене (РНЦШ).

Литература

- Алексеев Г.В.** Арктическое измерение глобального потепления // Лед и снег, 2014, т. 54, № 2, с. 53–68.
- Доклад** об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. М., Росгидромет, 2020, 97 с.
- Каверин Д.А., Лапина Л.Э., Пастухов А.В., Новаковский Н.Б.** Влияние трансформации растительного и почвенного покровов на температуру почв при эксплуатации зимней дороги в Большеземельской тундре // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, № 1, с. 17–27.
- Общее** мерзлотоведение / Под ред. В.А. Кудрявцева. М., Изд-во Моск. ун-та, 1978, 464 с.
- Павлов А.В.** Расчет и регулирование мерзлотного режима почвы. Новосибирск, Наука, 1980, 240 с.
- Павлов А.В.** Мониторинг криолитозоны. Новосибирск, Акад. изд-во "Гео", 2008, 229 с.
- Покровский О.М.** Изменения облачности в период глобального потепления по результатам международного спутникового проекта // Исследование Земли из космоса, 2019, № 1, с. 3–13.
- Сосновский А.В., Осокин Н.И.** Влияние мохового и снежного покровов на устойчивость многолетней мерзлоты на Западном Шпицбергене при климатических изменениях // Вестн. Кольского науч. центра, 2018, № 3, с. 179–185.
- Тишков А.А., Осокин Н.И., Сосновский А.В.** Влияние синузид мохообразных на деятельный слой арктических почв // Изв. РАН. Сер. геогр., 2013, № 3, с. 39–46.
- Cable W.L., Romanovsky V.E., Jorgenson M.T.** Scaling-up permafrost thermal measurements in western Alaska using an ecotype approach // The Cryosphere, 2016, No. 10, p. 2517–2532.
- Forland E.J., Benestad R., Hanssen-Bauer I. et al.** Temperature and precipitation development at Svalbard 1900–2100 // Hindawi Publishing Corporation Advances in Meteorology, 2011, Article ID 89379, 14 p.
- Novikova V.O.** Soil temperature and vegetation cover in sandy steppe plot (Nature Reserve "Dnieper-Oreliksy") // Biological Bulletin of Bogdan Chmelnytsky Melitopol State Pedagogical University, 2016, vol. 6 (2), p. 5–13.
- Semenov V.A., Bengtsson L.** Secular trends in daily precipitation characteristics: greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM // Climate Dynamics, 2002, No. 19, p. 123–140.

URL: <http://www.ifaran.ru/science/conferences/kislovodsk2014/reports/Artamonov.pdf> (дата обращения: 02.03.2020).

URL: <http://www.mosj.no/en/climate/land/permafrost.html> (дата обращения: 02.08.2020).

References

Alekseev G.V. Arctic dimension of global warming. *Led i Sneg* [Ice and Snow], 2014, vol. 54, No. 2, p. 53–68 (in Russian).

A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2019. Moscow, Federal Service of Russia for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet), 97 p. (in Russian).

Kaverin D.A., Lapina L.E., Pastukhov A.V., Novakovskiy A.B. The impact of transformation in vegetation and soil cover on the soil temperature regime under winter road operation in Bolshezemelskaya tundra. *Earth's Cryosphere*, 2019, vol. XXIII, No. 1, p. 16–25.

Obschee merzlotovedenie [General Geocryology]. V.A. Kudryavtsev (Ed.). Moscow, Moscow University Publ., 1978, 464 p. (in Russian).

Pavlov A.V. Raschet i regulirovanie merzlotnogo rezhima pochvy [Calculation and Regulation of Permafrost Regime of Soil]. Novosibirsk, Nauka, 1980, 240 p. (in Russian).

Pavlov A.V. Monitoring kriolitozony [Monitoring of Cryolithozone]. Novosibirsk, Geo, 2008, 229 p. (in Russian).

Pokrovskiy O.M. Changes in cloudiness during the period of global warming based on the results of an international satellite project. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth Research from Space], 2019, No. 1, p. 3–13 (in Russian).

Sosnovskiy A.V., Osokin N.I. Impact of moss and snow cover on the sustainability of permafrost in West Spitsbergen due to climate change. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra* [Herald Russian Academy of Sciences of the Kola Science Centre of the RAS], 2018, No. 3, p. 179–185 (in Russian).

Tishkov A.A., Osokin N.I., Sosnovskiy A.V. The impact of moss synusia on the active layer of Arctic Soil and Subsoil. *Izv. Acad. Nauk, Ser. Geogr.* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographic series], 2013, No. 3, p. 39–46 (in Russian).

Cable W.L., Romanovskiy V.E., Jorgenson M.T. Scaling-up permafrost thermal measurements in western Alaska using an ecotype approach. *The Cryosphere*, 2016, No. 10, p. 2517–2532.

Forland E.J., Benestad R., Hanssen-Bauer I., Haugen J.E., Skaugen T.E. Temperature and precipitation development at Svalbard 1900–2100. Hindawi Publishing Corporation Advances in Meteorology, 2011, Article ID 89379.

Novikova V.O. Soil temperature and vegetation cover in sandy steppe plot (Nature Reserve “Dnieper-Orelsky”). *Biological Bulletin of Bogdan Chmelnytskyi Melitopol State Pedagogical University*, 2016, vol. 6 (2), p. 5–13.

Semenov V.A., Bengtsson L. Secular trends in daily precipitation characteristics: greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM. *Climate Dynamics*, 2002, No. 19, p. 123–140.

URL: <http://www.ifaran.ru/science/conferences/kislovodsk2014/reports/Artamonov.pdf> (last visited: 02.03.2020).

URL: <http://www.mosj.no/en/climate/land/permafrost.html> (last visited: 02.08.2020).

*Поступила в редакцию 13 сентября 2020 г.,
после доработки – 22 марта 2021 г.,
принята к публикации 19 апреля 2021 г.*