

УДК 551.345

## Влияние снежного покрова на промерзание и протаивание грунта на Западном Шпицбергене

© 2013 г. **А.Б. Шмакин**, Н.И. Осокин, А.В. Сосновский, Э.П. Зазовская, А.В. Борзенкова

Институт географии РАН, Москва  
*alexandr\_sosnovskiy@mail.ru*

*Статья принята к печати 17 июля 2013 г.*

Многолетняя мерзлота, промерзание и протаивание грунта, снежный покров, температурный режим грунта, Шпицберген.

Ground freezing and thawing, ground thermal regime, permafrost, snow cover, Svalbard.

Рассматриваются результаты натурных измерений и расчётов влияния снежного покрова на промерзание и протаивание грунта на Западном Шпицбергене. Установлено, что ещё до схода снежного покрова грунт протаивает на десятки сантиметров, в результате чего увеличивается толщина талого слоя. Так, под снегом, толщиной 40 см, глубина протаивания грунта составляет 35–50 см. По мнению авторов, это может быть вызвано талой водой с небольшой положительной температурой, фильтрующейся под снежным покровом в приповерхностной части грунта.

### Введение

Значительная роль снежного покрова в тепловом режиме деятельного слоя грунта хорошо известна благодаря множеству исследований, которые ведутся, как минимум, с XIX в. Так, в работе [4] отмечается, что сложный характер современной динамики верхних горизонтов криолитозоны определяется совокупным воздействием температуры воздуха и теплозащитной роли снежного покрова, который играет исключительную роль в промерзании почв и грунтов и формировании температурного режима в горных породах [1]. В меньшей степени снежный покров влияет на протаивание грунта, что обусловлено относительно небольшим периодом его таяния по сравнению с длительностью залегания. Однако в районах с большой толщиной снежного покрова и низкими положительными температурами воздуха это влияние может быть значительно.

В период таяния влияние снежного покрова заключается в теплоизоляции поверхности почвы от положительных температур воздуха и поддержании температуры на границе снег–грунт на уровне 0 °С. Вместе с тем значительная толщина снежного покрова препятствует выходу тепла из грунта в холодный период. Аналогична и роль сезонных снежников: на участках, освобождённых от снега, с ростом расстояния от края снежника растёт глубина протаивания грунта. Однако обычно считается, что суще-

ственного протаивания многолетнемёрзлого грунта под тающим снегом не происходит, и при расчётах предполагается, что грунт протаивает только после схода снежного покрова.

В работе [5] рассмотрены особенности геологической деятельности снежников в пределах трёх основных географических поясов, где ежегодно формируется устойчивый снежный покров. При этом отмечается, что в субарктическом поясе сезонный промёрзший слой почвы исчезает после схода снежного покрова, тогда как в умеренном поясе, когда промерзание почвы слабое, он часто исчезает ещё до схода снежного покрова. Хотя и в районах распространения многолетней мерзлоты отмечено оттаивание грунта под снежным покровом на небольшую глубину. Так, Н.А. Солнцев исследовал снежник недалеко от берега моря на п-ове Скуратова (Западный Таймыр) в период интенсивного таяния [7]. Под слоем мокрого фирна он обнаружил оттаявшую почву, толщиной 4 см, ниже которой находился мёрзлый грунт. Оттаивание грунта под снежным покровом на небольшую глубину отмечали W.V. Lewis в Исландии [9] и L.H. McCabe на Шпицбергене [10] ещё в 1930-х годах, однако в указанных случаях протаивание не превышало нескольких миллиметров.

Согласно нашим результатам, на горных склонах или в их основании, в зоне распространения многолетнемёрзлых пород возможна значительно большая глубина протаивания грунта

под снежным покровом (сравнимая с толщиной деятельного слоя), что, возможно, объясняется теплоотдачей от талой воды при её фильтрации в толще грунта вниз по склону. Таких толщин протаивания грунта под снегом для зоны многолетней мерзлоты в литературе до сих пор описано не было. На протяжении ряда лет в районе российского посёлка Баренцбург (Западный Шпицберген) сотрудниками Института географии РАН проводятся мониторинг температурного режима и глубины протаивания грунта на разных высотах над уровнем моря, а также исследование влияния поверхностных покровов на теплофизическое состояние деятельного слоя. В настоящей статье изложены результаты натуральных измерений и расчётов по влиянию снежного покрова на промерзание и протаивание грунта на Западном Шпицбергене.

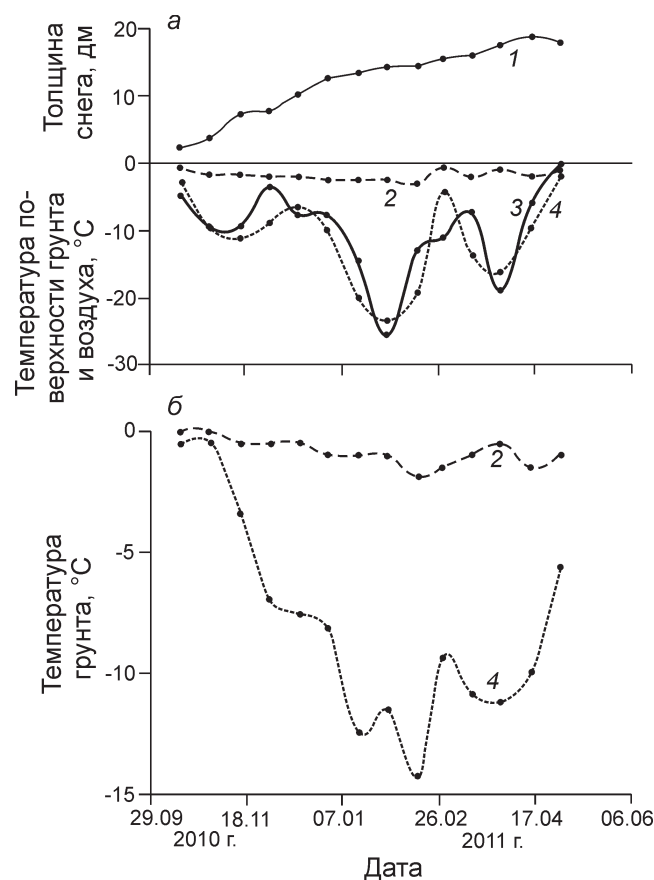
#### Влияние снежного покрова на температурный режим грунта

Климатические условия на архипелаге Шпицберген отличаются относительно небольшой изменчивостью положительной температуры воздуха летом и частыми и значительными колебаниями температуры воздуха зимой. При этом максимальная толщина снежного покрова, плотностью порядка  $350 \text{ кг/м}^3$ , часто превышает 1 м. Для определения влияния снежного покрова на температурный режим грунта в 2010–2011 гг. в двух точках с разной толщиной снежного покрова в грунте были размещены самопишущие датчики температуры с точностью измерений  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  (термохроны DS1921G-F5 – изолированные датчики в виде дисков, диаметром около 15 мм и толщиной около 4 мм).

*Первая серия термохрон* установлена в грунте 4 августа 2010 г. на расстоянии 100 м от гидрометеостанции (ГМС) Баренцбург и снята 24 июля 2011 г. Участок закладки термохрон находился на высоте 80 м над ур. моря. Термохроны были помещены на глубину 10, 20, 40, 60 и 70 см, а также на поверхности грунта – под мохом, толщиной 4 см. Максимальная толщина снежного покрова, по данным ГМС Баренцбург, в сезоне 2010/11 г. составляла 183 см. *Вторая серия термохрон* установлена 1 августа 2010 г. в долине Грендален, в 5 км на юг от ГМС Баренцбург, на высоте 18 м над ур. моря. С помощью термохрон фиксировалась температура грунта с интервалом 4 часа: 1) на поверх-

ности грунта под моховым покровом, толщиной 1 см; 2) над поверхностью грунта, на высоте 10 см; 3) на глубинах 10, 20, 40, 60 и 80 см. На момент снятия термохрон 24 июля 2011 г. грунт протаял на глубину около 80 см.

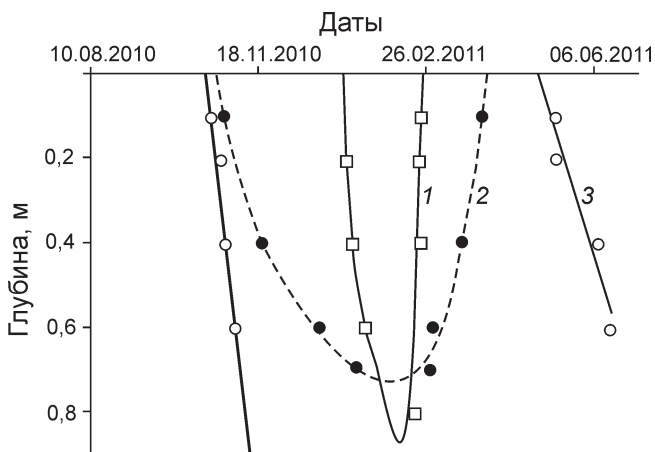
Результаты измерений показали, что минимальное значение температуры поверхности грунта под снежным покровом, толщиной 150 см, составляло  $-3,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Разница между температурой воздуха на метеостанции и температурой поверхности грунта была более  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 1, а). При этом температура грунта на



**Рис. 1.** Температурный режим по данным ГМС Баренцбург: а – толщина снега, температура воздуха и поверхности грунта; б – температура грунта на глубине 60 см; 1 – толщина снега; 2, 4 – температура поверхности грунта и температура грунта на глубине 60 см: 2 – при максимальной толщине снега 150 см, 4 – при толщине снега менее 15 см; 3 – температура воздуха по данным ГМС

**Fig. 1.** Temperature regime according to the data of the meteorological station Barentsburg:

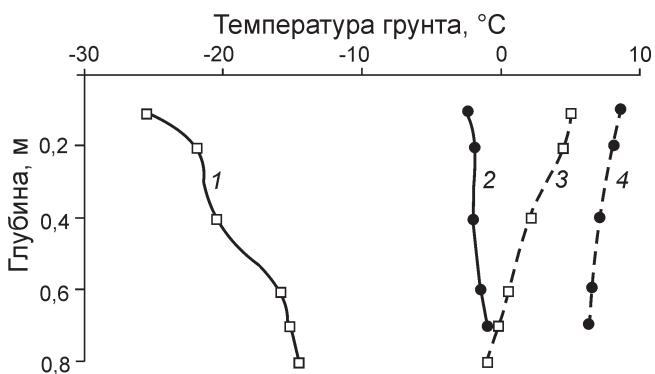
а – snow depth, air temperature, and ground surface temperature; б – ground temperature at 60 cm depth: 1 – snow depth at the meteorological station; 2 and 4 – ground surface temperature and ground temperature at 60 cm depth: 2 – under maximum snow depth of 150 cm, 4 – under the snow depth less than 15 cm; 3 – air temperature according to the data of meteorological station



**Рис. 2.** Термоизоплеты грунта:  
 1, 3 – при толщине снежного покрова до 15 см; 2 – при максимальной толщине снежного покрова 150 см; 1 – температура грунта  $-14^{\circ}\text{C}$ ; 2, 3 – температура грунта  $-1^{\circ}\text{C}$   
**Fig. 2.** Thermoisopleths of the ground:  
 1, 3 – under the snow depth of 15 cm; 2 – under the maximal snow cover of 150 cm; 1 – ground temperature  $-14^{\circ}\text{C}$ ; 2, 3 – ground temperature  $-1^{\circ}\text{C}$

глубине 60 см не опускалась ниже  $-2,0^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 1, б). Через  $0^{\circ}\text{C}$  температура грунта на этой глубине переходит к 4 ноября 2010 г., т.е. через 23 дня после начала промерзания грунта. Толщина снега на тот момент на ГМС Баренцбург достигала 45 см.

В районе Грендален, в месте установки второй серии термохрон, снег частично сноился под действием ветра. Перепад между температурой воздуха на ГМС Баренцбург и температурой поверхности грунта под неболь-



**Рис. 3.** Распределение температуры грунта по глубине в районе ГМС Баренцбург (2, 4) и в районе Грендален (1, 3):  
 1, 2 – в холодный период 4 февраля 2011 г.; 3, 4 – в тёплый период 5 августа 2010 г.  
**Fig. 3.** Time series of deep ground temperature in Barentsburg area (2, 4) and in Grendalen area (1, 3):  
 1, 2 – on 04.02.2011 (cold season); 3, 4 – on 05.08.2010 (warm season)

шим снежным покровом составлял около  $2^{\circ}\text{C}$ . Такому перепаду температур соответствует толщина снежного покрова менее 15 см. Минимальная температура поверхности грунта составила  $-28,5^{\circ}\text{C}$ , а минимальная температура грунта на глубинах 60 и 80 см через трое суток достигла значений  $-16,5$  и  $-15,0^{\circ}\text{C}$  соответственно. Температура грунта на глубине 80 см в летний период не превышала  $-0,5^{\circ}\text{C}$ , а на глубине 60 см поднималась до  $0,5^{\circ}\text{C}$ .

В районе заложения термохрон первой серии перепад температур воздуха и поверхности грунта составил  $20^{\circ}\text{C}$  на 150 см снега, т.е. около  $0,13^{\circ}\text{C}$  на 1 см. На Шпицбергене, в районе проведения измерений, плотность снега через 1–2 месяца после установления снежного покрова достигает  $300\text{ кг/м}^3$  вследствие ветрового уплотнения и оттепелей и в среднем за холодный период превышает  $350\text{ кг/м}^3$ . В районе заложения термохрон второй серии (в долине Грендален) разница температуры поверхности грунта и воздуха (по данным ГМС Баренцбург) менялась на протяжении холодного периода от 0 до  $6^{\circ}\text{C}$ . Термоизоплеты температуры грунта при разной толщине снежного покрова представлены на рис. 2. Из него видно, что при толщине снежного покрова до 15 см требуется около двух недель для охлаждения грунта до  $-1^{\circ}\text{C}$  на глубине 60 см, тогда как при максимальной толщине снежного покрова (150 см) на это потребуется в 4 раза больше времени.

Распределение температуры грунта по глубине в районе ГМС Баренцбург и в долине Грендален в тёплый (5 августа 2010 г.) и холодный периоды (4 февраля 2011 г.) показано на рис. 3. Распределение по глубине положительной температуры грунта на месте установки термохрон первой серии для кривой 4 соответствует линейной зависимости температуры грунта от глубины:  $T = -0,03667z + 8,77$ ; коэффициент корреляции  $R^2 = 0,9441$ . Согласно этой зависимости, температура  $T = 0^{\circ}\text{C}$  должна наблюдаться на глубине около 240 см, что приблизительно соответствует результатам измерений. Заметим, что такая глубина протаивания не получается, если вести расчёты по уравнению теплопроводности исходя из температуры воздуха. Так, расчёты по формулам, приведённым в работе [3], для суглинка, плотностью  $1800\text{ кг/м}^3$ , влажностью 20%, с коэффициентом

том теплопроводности  $1,57 \text{ Вт/(м } ^\circ\text{С)}$  [6] при среднесуточной температуре воздуха  $4 \text{ } ^\circ\text{С}$  дают глубину протаивания грунта на  $1 \text{ м}$  за 4 месяца. За 2 месяца эта глубина составляет  $0,7 \text{ м}$ . Возможно, здесь на протаивание влияет талая вода с вышележащих горизонтов. Таким образом, глубина протаивания грунта в районе с небольшой толщиной снежного покрова зимой значительно меньше, чем при толщине снежного покрова  $150 \text{ см}$  с плотностью  $350 \text{ кг/м}^3$ . Это объясняется выхолаживанием грунта при небольшой толщине снежного покрова. Так, средняя температура грунта на глубине  $0\text{--}80 \text{ см}$  составляет  $-2 \text{ } ^\circ\text{С}$  при толщине снега  $150 \text{ см}$  (кривая 2 на рис. 3) и  $-20 \text{ } ^\circ\text{С}$  при толщине снега  $15 \text{ см}$  (кривая 1 на рис. 3).

По данным Университетского центра Свальбарда (сайт [www.unis.no](http://www.unis.no)), температура грунта в скважине с середины января по середину марта 2013 г. изменялась от  $-0,8$  до  $-5 \text{ } ^\circ\text{С}$  на глубине  $1 \text{ м}$  и от  $-2,2$  до  $-8 \text{ } ^\circ\text{С}$  на глубине  $0,25 \text{ м}$ . Средняя температура грунта на начало февраля на глубине  $0\text{--}80 \text{ см}$  составила  $-4 \text{ } ^\circ\text{С}$ . С ростом глубины среднегодовая (с марта 2012 по март 2013 г.) температура грунта понижается с  $-2,3 \text{ } ^\circ\text{С}$  на глубине  $5 \text{ м}$  до  $-3 \text{ } ^\circ\text{С}$  на глубине  $15 \text{ м}$ . Зависимость температуры приповерхностных слоёв грунта от толщины снежного покрова, неравномерность распределения толщины снежного покрова по площади, а также большие значения коэффициента теплопроводности грунта по сравнению со снегом могут приводить к горизонтальному переносу тепла в грунте и определённом выравниванию температуры на участках с разной толщиной снежного покрова. Именно поэтому на больших глубинах различие в температуре грунта под снежным покровом разной толщины будут сглаживаться. Однако на локальных участках с большой толщиной снежного покрова в приповерхностных слоях грунта возможно значительное повышение его температуры вплоть до формирования таликов. Это может существенно снизить прочностные характеристики грунта и способствовать деформации оснований и фундаментов под сооружениями.

При большой толщине снежного покрова время его таяния может существенно возрасти, что уменьшит продолжительность непосредственного воздействия положительных температур воздуха на грунт и снизит глубину протаивания. В период таяния снежного покро-

ва весной и летом 2011 г. толщина снежного покрова составила: 15 мая –  $146 \text{ см}$ , 30 мая –  $109 \text{ см}$ , 14 июня –  $8 \text{ см}$ . С 15 по 30 мая снежный покров таял при отрицательных среднесуточных температурах воздуха. В первой половине июня среднесуточная температура воздуха составила  $2,7 \text{ } ^\circ\text{С}$ . С 30 мая по 14 июня растаял слой снега, толщиной  $101 \text{ см}$ , что, при плотности снега  $350 \text{ кг/м}^3$ , даёт слой талой воды  $22 \text{ мм/сут}$ . При этом температурный коэффициент таяния равен  $8 \text{ мм слоя воды на } 1 \text{ } ^\circ\text{С/сут}$ .

С продвижением вверх по склону температура воздуха понижается. Если принять высотный коэффициент  $0,7 \text{ } ^\circ\text{С}$  на  $100 \text{ м}$ , то при подъёме на  $200 \text{ м}$  интенсивность таяния уменьшится в 2 раза и начнётся значительно позже. Средняя температура воздуха за четыре месяца с положительными температурами составила  $3,6 \text{ } ^\circ\text{С}$  в 2010 г. и  $5,2 \text{ } ^\circ\text{С}$  в 2011 г. За первую половину этого периода в 2010 г. мог бы растаять снежный покров, толщиной до  $5 \text{ м}$ . При этом глубина протаивания грунта значительно сократится, так как время действия положительной температуры воздуха на грунт уменьшится вдвое.

#### **Температурный режим и протаивание грунта под снежным покровом**

Рассмотрим влияние снежного покрова на скорость протаивания и температурный режим грунта во время снеготаяния. Температура грунта измерялась на участке расположения термохрон второй серии при снежном покрове, толщиной  $10 \text{ см}$ . Установлено, что переход температуры поверхности грунта через  $0 \text{ } ^\circ\text{С}$  произошёл 26 мая 2011 г. На глубине  $40$  и  $60 \text{ см}$  такой переход состоялся соответственно 15 мая и в период с 6 по 19 июля, т.е. через  $20$  и  $41\text{--}54$  суток. Температурный градиент на глубине  $60\text{--}80 \text{ см}$  26 мая был равен  $5 \text{ } ^\circ\text{С/м}$  (температура грунта на этих глубинах была равна  $-2,5$  и  $-3,5 \text{ } ^\circ\text{С}$  соответственно). Такой градиент температуры на рассмотренной глубине сохранялся до 5 июля, но при более высоких температурах грунта (на  $1,5 \text{ } ^\circ\text{С}$  выше).

При толщине снежного покрова в месте расположения термохрон первой серии (ГМС Баренцбург), равной  $159 \text{ см}$ , скачок повышения температуры поверхности с  $-0,5$  до  $0,5 \text{ } ^\circ\text{С}$  с дальнейшим ростом температуры поверхности грунта произошёл 10 июня, что обусловлено сходом снежного покрова. По данным этой

ГМС, толщина снежного покрова на тот момент составила 36 см и снег полностью растаял через четыре дня. Согласно измерениям термохронами, скорость протаивания грунта после схода снежного покрова, толщиной 150 см, составила 40 см за пять суток и 60 см за девять суток. Такая интенсивность протаивания в 4 раза выше, чем в грунте при изначально небольшой толщине снежного покрова.

На динамику протаивания грунта влияет его температурный режим к моменту схода снежного покрова. С этой целью измерялась температура грунта в скважинах. Для бурения скважины использовался металлический щуп, диаметром 1 см, с шагом 10–20 см. В самой нижней точке скважины измерялась температура грунта, причём температурный датчик выдерживался до тех пор, пока не устанавливался стационарный режим, т.е. более 10 мин. Затем строилась температурная кривая. Её вид для глубин ниже глубины суточных колебаний представлял собой, как правило, линейную зависимость. Когда щуп достигал верхней кровли мерзлоты, температура грунта, по данным измерений, становилась равной 0 °С. При этом щуп дальше не проходил. При 20%-й влажности грунта, большом количестве грубообломочного материала и температуре ниже 0 °С мёрзлый грунт представлял собой монолит. Из сотен выполненных измерений глубины протаивания грунта только в нескольких случаях щуп пробивался в мёрзлую зону грунта, где температура была ниже 0 °С. При этом, возможно, щуп попадал в расщелину между камнями, так как в этих местах, как правило, наблюдалось повышенное содержание грубообломочного материала.

Температуру грунта под снежным покровом и на небольшом удалении от него сначала измеряли на небольшом сезонном снежнике с максимальной толщиной 40 см и размером 4 × 8 м, расположенном под склоном западной экспозиции, крутизной 20–30°. Измерения вели с помощью температурного датчика (Digitalthermometer, GTN 175/Pt), точность измерения которого составляет 0,1 °С. Плотность снега в период таяния достигала 550 кг/м<sup>3</sup>. Измеренная температура поверхности почвы на краю сезонного снежника под слоем снега в 1 см составила 0,5 °С. Глубина протаивания грунта на участке без снежного покрова на расстоянии 0,8 и 7 м от края снежника была равна

около 50 см. Это говорит о том, что грунт протаял на значительную глубину ещё под снежным покровом. Это подтвердили и измерения в центре снежника, которые показали толщину талого слоя до 35 см.

При дальнейших измерениях на участках, покрытых снегом большой толщины, установлено, что ещё до схода снежного покрова грунт протаивает на десятки сантиметров, что позже будет способствовать росту толщины талого слоя грунта. Так, под снежником, длиной более 200 м, шириной до 10 м и толщиной 40 см (рис. 4), глубина протаивания грунта достигала 35 см. Это могло быть вызвано талой водой с небольшой положительной температурой, фильтрующейся под снежным покровом в приповерхностной части грунта с верхней части склона.

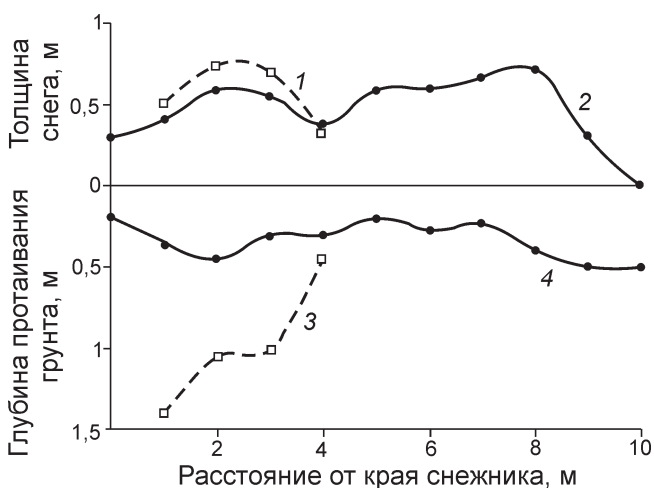
Измерения на других участках, покрытых снегом, также подтвердили эффект протаивания грунта на десятки сантиметров под снежным покровом. Так, измерения 11 июля 2011 г. на снежнике, расположенном в ложине на склоне горы Улаф, недалеко от её вершины (в районе пос. Баренцбург), на высоте 428 м над ур. моря, показали рост толщины талого слоя от 5 см на границе снежника до 25 см на расстоянии 3 м от края в направлении к его центру. Отметим, что по ложине проходил интенсивный сток талой воды, которая, вероятно, определяла интенсивность оттаивания грунта под этим снежником. Под соседним, широким заснеженным участком, расположенным в 50 м от первого участка на ровном склоне западной экспозиции, где не отмечались признаки значительного стока воды, протаивания грунта не было. Однако на этом же снежнике, ниже по склону примерно на 300 м, на высоте 323 м над ур. моря, в его середине (см. рис. 4) глубина протаивания грунта превысила 0,5 м. При этом не наблюдалось закономерности изменения глубины протаивания грунта от края снежника к его середине.

Измерения 19 июля 2011 г. в районе Грен-Фьорд (в 3 км южнее ГМС Баренцбург) на сезонном снежнике, толщиной до 0,75 м, расположенном под склоном, показали глубину протаивания грунта под ним до 1,4 м (рис. 5). При этом наблюдалось уменьшение глубины протаивания грунта с удалением от верхнего края снежника в направлении к его центру. В последнем случае значительное протаива-



**Рис. 4.** Сезонный снежник на высоте 323 м над ур. моря на ровном склоне горы Улаф  
**Fig. 4.** The snow patch at 323 m a.s.l. on undisturbed slope of the Ulaf Mountain

ние под снегом (до 1,4 м), возможно, объясняется существованием талика под снежным покровом в течение всего холодного периода из-за большого ветрового снегонакопления под



**Рис. 5.** Протаивание грунта под снегом:  
 1, 2 – толщина сезонного снежника; 3, 4 – глубина протаивания грунта; 1, 3 – для района Грен-Фьорд; 2, 4 – для склона горы Улаф

**Fig. 5.** Thawing of ground under snow:  
 1, 2 – depth of snow patch; 3, 4 – depth of ground thawing; 1, 3 – in the Gryonfjord area; 2, 4 – on slope of the Ulaf Mountain

склоном. Однако этот вопрос требует дополнительных исследований.

В период таяния снежного покрова талая вода, двигаясь по склону, может пересекать участки грунта, свободные от снега и имеющие положительную температуру в талом слое. В результате талая вода будет нагреваться, а при попадании этой воды в зону мёрзлого грунта последний будет протаивать, в результате чего поток талой воды будет постепенно опускаться вглубь, не касаясь снежного покрова. При этом снежный покров, пропуская под собой талую воду, в то же время может предохранять грунт от повторного промерзания при заморозках.

#### Интенсивность протаивания грунта под снегом

Влиянием солнечной радиации на протаивание грунта под снегом, толщиной более 20 см, можно пренебречь, так как в период таяния на границе грунт–снег температура грунта не превышает 0 °С (при наличии контакта между ними), а при температуре поверхности почвы не выше 0 °С протаивание вследствие вертикального теплообмена практически отсутствует. Поэтому основной механизм протаивания грунта, судя по всему,

заключается в фильтрации воды с вышележащей части склона. Это подтверждают измерения весной и летом 2012 г. В конце января и начале февраля этого года во время оттепели прошли ливневые жидкие осадки, количество которых за несколько дней составило более 80 мм. В результате на поверхности грунта скопилась вода, при замерзании которой на большей части исследуемой территории сформировалась ледяная корка, толщиной более 5 см. Талая вода стекала по ней и не попадала на грунт, поэтому грунт под ледяной коркой не протаивал. Измерения показали, что если в отсутствие ледяной корки летом 2011 г. в основном имело место протаивание грунта под снежным покровом на десятки сантиметров, то при её наличии эффект был противоположным – протаивание грунта под снегом наблюдалось лишь в редких случаях. Отметим, что формирование ледяной корки на поверхности почвы в период оттепелей вследствие таяния снега или выпадения жидких осадков при дальнейшем похолодании наблюдается, как правило, в южных регионах России и на территории Украины [2].

На границе талого и мёрзлого грунта приток тепла от талой воды компенсирует отток тепла в мёрзлый грунт и затраты тепла на фазовые переходы при протаивании грунта. Поэтому на границе талого и мёрзлого грунта условие Стефана можно записать в следующем виде:

$$\alpha(T_{\text{вд}} - T_{\text{м}}) - \lambda_{\text{м}} \frac{\partial T_{\text{м}}}{\partial x} = \rho L w \frac{d\xi}{d\tau},$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи на границе вода–грунт;  $T_{\text{вд}}$  – температура воды;  $T_{\text{м}}$  – температура мёрзлого грунта на фазовой границе;  $\lambda_{\text{м}}$  – коэффициент теплопроводности мёрзлого грунта;  $\rho$  – плотность грунта;  $L$  – теплота плавления;  $w$  – влажность мёрзлого грунта;  $\xi$  – положение границы талого и мёрзлого грунта;  $\tau$  – время;  $x$  – вертикальная координата.

Отметим, что скорость потока воды на склоне при её выходе на поверхность из зоны оползня, глубиной 0,8 м, превышала 5 см/с при температуре воды 1 °С. Если принять эти условия и коэффициент теплоотдачи от воды в ледяной покров в виде [8]  $\alpha = 1209v_{\text{вд}}$  Вт/(м<sup>2</sup> К) ( $v_{\text{вд}}$  – скорость движения воды, м/с), то при скорости фильтрации воды 1 мм/с получим интенсивность протаивания грунта, равную 2,5 см/мес. Если учесть, что при обте-

кании зёрен грунта скорость потока может увеличиться в  $\pi/2$  раза, а площадь контакта в 2–4 раза, то интенсивность протаивания грунта может возрасти до 15 см/мес, что по порядку близко к измеренным значениям. Однако скорость движения воды, равная 1 мм/с, соответствует скорости фильтрации около 90 м/сут, характерной для коэффициента фильтрации гравелистого или крупного песка при градиенте напора, равном единице. Для супеси и суглинка коэффициент фильтрации составляет 0,1–0,7 и 0,005–0,4 м/сут соответственно. Материал грунта состоял из большого количества мелкого гравия разной крупности, размером до 4 мм, что может свидетельствовать о значительной скорости фильтрации талой воды сквозь грунт.

Исходя из теплобалансовых соотношений, получим, что для протаивания 10 см грунта, плотностью 1800 кг/м<sup>3</sup> и влажностью 20%, потребовалась бы фильтрация с лежащих выше по склону участков слоя воды, толщиной 3 м и температурой 1 °С (которая после теплообмена понизится до 0 °С). Поэтому протаиванию грунта под снежным покровом в основном подвергаются участки склона с каналами стока. Однако протаивание наблюдалось и в районе вершины склона, где количество талой воды, стекающей по склону, ограничено. В целом вопрос о количественной оценке интенсивности протаивания мёрзлого грунта под снегом требует дальнейших исследований.

### Заключение

Полученные результаты позволили установить влияние снежного покрова большой плотности на промерзание и протаивание грунта в условиях Западного Шпицбергена. При небольшой толщине снежного покрова выхолаживание грунта в зимний период достигает такой величины, что температура верхнего 80-сантиметрового слоя грунта оказывается на 18 °С ниже, а глубина летнего протаивания грунта почти в 3 раза меньше, чем при толщине снежного покрова 150 см. Кроме того, измерения показали, что толщина протаивания грунта под тающими сезонными снежниками может достигать нескольких десятков сантиметров и сравнима с толщиной деятельного слоя в данном районе. Возможная причина этого – приток талой воды с вышележащих участков протаявшего грунта. В итоге значительно возрастает итоговая тол-

щина летнего протаивания мерзлоты, которую невозможно объяснить с точки зрения только вертикального теплообмена в грунте.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность В.Р. Алексееву за ценные критические замечания, позволившие существенно улучшить рукопись.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации НШ-479-2012.5, проекта Программы фундаментальных исследований ОНЗ РАН № 12, грантов РФФИ № 13-05-01167 и № 11-05-00573.

### Литература

1. *Гаврилова М.К.* Климат и многолетнее промерзание горных пород / Под ред. В.Т. Балобаева. Новосибирск: Наука, 1978. 214 с.
2. *Логвинов К.Т., Бабиченко В.Н., Кулаковская М.Ю.* Опасные явления погоды на Украине. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 236 с.
3. *Павлов А.В.* Расчет и регулирование мерзлотного режима почвы. Новосибирск: Наука, 1980. 240 с.
4. *Павлов А.В.* Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2008. 230 с.
5. *Перов В.Ф.* Снежники, ледники и мерзлотный рельеф Хибинских гор // Результаты исследований по международным геофизическим проектам. Гляциология. № 22. М.: Наука, 1968. 118 с.
6. СНиП 2.02.04–88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: изд. ГУП ЦПП, 1997. 52 с.
7. *Солнцев Н.А.* Снежники как геоморфологический фактор. М.: Географгиз, 1949. 92 с.
8. *Шуляковский Л.Г.* К методике расчета толщины ледяного покрова на водохранилищах // Тр. ГМЦ. 1972. Вып. 112. С. 50–63.
9. *Lewis W.V.* Snow-patch in Iceland // The Geographical Journal. 1939. V. 44. № 2. P. 153–161.
10. *McCabe L.H.* Nivation and corrie erosion in West Spitzbergen // The Geographical Journal. 1939. V. 44. № 6. P. 447–465.

### Summary

This paper presents the results of experimental research of snow cover influence on ground freezing/thawing in Svalbard. Observations show that even before the snow disappearance ground thaws for dozens of centimeters that increases the thaw depth later in the season. Under the snow cover of 40 cm the thaw depth can reach 35–50 cm. The thawing can be caused by melt water with slightly positive temperature, percolating under the snow cover near the ground surface. The data on ground temperature regime during a year under various snow depths are given. Under a shallow snow cover the ground cools significantly, and this process causes the slowing down subsequent thawing.