

Мерзлотоведение, инженерная геология

УДК 551.345

Температурный режим почвогрунтов при нарушении покровов в современных климатических условиях Центральной Якутии

С.П. Варламов, А.Ф. Жирков, Д.А. Находкин

*Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия
e-mail: vsp@mpi.ysk.ru*

Аннотация. В связи с потеплением климата возникает необходимость параметризации граничных условий при прогнозных оценках температурного режима грунтов холодных регионов. С этой целью проведены экспериментальные исследования за термическим режимом грунтов при удалении снежного и растительного покровов на территории комплексного стационара «Туймаада» Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. Получены результаты натурных наблюдений за двухгодичный цикл и дано сравнение с результатами аналогичных исследований, проведенных А.В. Павловым в начале 70-х гг. прошлого века. За этот период среднегодовая температура воздуха повысилась на 2,6 °С, а среднегодовая температура грунтов на глубине 3 м – на 0,6 °С на естественной и на 1,4 °С на нарушенной площадке. Из чего следует необходимость учета современного изменения климата при инженерных расчетах и прогнозах температурного режима грунтов.

Ключевые слова: природно-климатические факторы, многолетнемерзлые грунты, температура грунта, сезонноталый слой, растительность, нарушенные условия.

Ground Temperature Regime after Surface Disturbance under Current Climatic Conditions in Central Yakutia

S.P. Varlamov, A.F. Zhirkov, D.A. Nakhodkin

*Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia
e-mail: vsp@mpi.ysk.ru*

Abstract. In view of climate warming, there is a need for parameterization of boundary conditions in predictive assessments of the ground temperature regime in cold regions. For this, an experimental study has been conducted at the Tuymaada monitoring site of Melnikov Permafrost Institute of the SB RAS to investigate the ground thermal regime following the removal of snow and vegetation covers. Field data have been collected for a two-year cycle. These data are compared with the findings from a similar study performed by A.V. Pavlov in the early 1970s. During this period, the mean annual air temperature has increased by 2.6 °C. As a result, the mean annual ground temperature at a depth of 3 m has warmed by 0.6 °C at the undisturbed site and by 1.4 °C at the disturbed site, with the ground properties remaining virtually unchanged. It is therefore evident that the current changes in climate and its elements should be taking into account during engineering design and ground temperature regime forecasts.

Key words: environmental and climatic factors, permafrost, ground temperature, active layer, vegetation, surface disturbance.

ВАРЛАМОВ Сергей Прокопьевич – к.г.н., доцент, с.н.с.; ЖИРКОВ Александр Федотович – н.с.; НАХОДКИН Дмитрий Афанасьевич – инженер.

Введение

Современная динамика криолитозоны в целом согласуется с наблюдаемыми изменениями температуры воздуха и осадков. Исчерпывающий анализ данных и обзор литературы об изменении климата приведены в Пятом оценочном докладе Межправительственной группы экспертов [6, 7]. Особенности изменения климата на территории России анализируются в ежегодных обобщающих докладах Росгидромета [1]. Согласно данным этих публикаций, в Арктической зоне увеличение среднегодовой температуры воздуха в XX столетии было почти вдвое больше, чем в среднем по планете. В последней четверти XX века она росла со скоростью до 1,6 °C/10 лет, при этом изменения минимальных температур были в 2,5–4 раза больше, чем максимальных. В среднем по всей России эти величины составили, соответственно, 1,4–2,6 °C/10 лет и около 0,6 °C/10 лет. Средние зимние температуры увеличивались примерно вдвое больше, чем летние (в среднем по России тренды составили, соответственно, 0,9 °C/10 лет и 0,4 °C/10 лет), т.е. уменьшилась амплитуда годовых колебаний, от которой в значительной степени зависит мощность сезонноталого слоя. Изменения атмосферных осадков в Арктической зоне России были разнонаправлены и зависели от сезона и региона. Весной и осенью преобладали тенденции к увеличению во всех регионах России. С 1980-х гг. произошло увеличение высоты снега на европейской территории России и в Западной Сибири на 10–20 % и на

Чукотке до 30 %, в то время как в Восточной Сибири она уменьшилась на 15–20 %.

К настоящему времени в районе г. Якутска произошли значительные повышения среднегодовой температуры воздуха. Например, по сравнению с начала пятилетия 1970-х гг. с пятилетием второго десятилетия нынешнего века среднегодовая температура воздуха повысилась на 2,8 °C. Для современного потепления климата характерно значительное повышение температуры воздуха в холодный сезон, что привело к изменению соотношения между параметрами атмосферного и почвенного климата. Одна из главных причин этого в том, что коэффициент теплопроводности мерзлого грунта выше, чем талого. Таким образом, происходящие асимметричные изменения зимних и летних температур требуют актуализации параметров криолитозоны с текущими климатическими условиями.

Постановка и методика исследований

В начале ноября 2014 г. на территории научно-экспериментального стационара «Туймаада» Института мерзлотоведения СО РАН были начаты экспериментальные наблюдения за гидротермическим режимом и глубиной сезонного протаивания грунтов на двух экспериментальных площадках: первая (нарушенная) с удалением снежного и лугового растительного покровов, вторая (контрольная) – на разнотравно-злаковом лугу (рис. 1). На площадках пробурены скважины и оборудованы для термометрических наблюдений термодатчиками логгерной



Рис. 1. Площадка с нарушенными условиями (растительный (а) и снежный (в) покровы удалены) и контрольная площадка в естественных условиях (летом (б) и зимой (г))

**Межгодовая изменчивость климатических характеристик района г. Якутска
(данные метеостанции) в периоды проведения экспериментов**

Годы	Температура воздуха, °С			Снежный покров		
	$\Sigma-T_{вз}$	$\Sigma+T_{вз}$	$T_{вз}$	H_c^{max} , м	Дата уст.	Дата схода
X.1971–IX.1972	-182,1	55,9	-10,5	0,25	29.X	30.IV
X.1972–IX.1973	-182,8	70,9	-9,3	0,22	24.X	29.IV
Среднее	-182,5	63,4	-9,9	0,24	–	–
X.2014–IX.2015	-153,4	66,0	-7,3	0,31	19.X	27.IV
X.2015–IX.2016	-150,6	62,0	-7,3	0,35	16.X	16.IV
Среднее	-152,0	64,0	-7,3	0,33	–	–

системы НОВО. Регистраторы температуры были установлены на поверхности грунта 0,0 м и на стандартных глубинах 0,2; 0,4; 0,8; 1,2; 1,6; 2,4 и 3,2 м. Для надежности и контроля температурных измерений логгером были дополнительно установлены полупроводниковые терморезисторы ММТ-4 на двух глубинах (1,6 и 3,2 м). Данные измерений с дискретностью 1 ч фиксировались на запоминающем устройстве [2]. На естественной площадке велись наблюдения за высотой снежного покрова и температурой снега на отметках 0,1–0,2 м. Глубина сезонного протаивания грунтов определялась во время ручного бурения в конце теплого сезона (в конце сентября). На естественной и нарушенной площадках также были отобраны пробы почвогрунтов на определение их влажности, теплофизических характеристик (плотность, теплоемкость, коэффициент теплопроводности) и гранулометрического состава. Образцы грунтов были доставлены в Санкт-Петербург для анализа с использованием современного оборудования. Эта работа была проведена в российско-немецкой лаборатории полярных исследований им. Отто Шмидта в рамках действовавшего соглашения с GEOMAR Центром им. Гельмгольца океанических исследований в Киле (Германия). Были установлены гранулометрический состав, влажность и содержание органики в образцах грунтов. С помощью гранулометрического анализа были определены типы залегающих грунтов.

Ранее в конце 1960-х и в начале 1970-х гг. на данном стационаре велись подобные комплексные экспериментальные исследования, целью которых было изучение и прямое измерение воздействия различных естественных и искусственных покровов на температурный режим грунтов. Под руководством А.В. Павлова проводились круглогодичные наблюдения за температурным режимом грунтов на ненарушенных естественных условиях и на экспериментальных площадках, где осуществлялись расчистка снега, настил искусственных покрытий, удаление растительности, мохово-торфяного

слоя и верхнего органического слоя почвы. Методика этих исследований подробно описана в его работах [3–5].

В непосредственной близости от площадок на расстоянии 100 м расположена метеостанция СВФУ и ИМЗ СО РАН, данные которой по температуре воздуха и осадкам использовались в данной работе (рис. 1).

Обсуждение результатов

Получен результат двухгодовых циклов наблюдений за температурным режимом приземного слоя атмосферы на высоте 2 м, режимом накопления снежного покрова, температурой поверхности почвы луга, оголенной поверхности и температурой почвогрунтов.

Сравнение климатических характеристик разных периодов наблюдений приведено в табл. 1. Сопоставление результатов наблюдений, проведенных на экспериментальных площадках в 2014–2016 гг., с данными 70-х гг. прошлого века показало, что значения средней годовой температуры воздуха ($T_{вз}$) повысились на 2,6 °С. Сумма же средних месячных положительных температур воздуха ($\Sigma+T_{вз}$) увеличилась всего на 0,6 °С, а сумма средних месячных отрицательных температур воздуха ($\Sigma-T_{вз}$) понизилась на 30,5 °С. Максимальная средняя месячная высота снежного покрова была на 0,09 м больше. Устойчивый снежный покров устанавливался на 5–13 дней раньше, а дата схода его была на 2–14 дней ранее.

На рис. 2 показан временной ход температуры грунта на глубинах 1,6 м и 3,2 м на нарушенной и контрольной площадках. Здесь же показан ход температуры воздуха и высоты снежного покрова на контрольной площадке. Как и следовало ожидать, в зимний период температура грунта на площадке с расчищенным снегом и удаленным растительным покровом оказалась ниже, чем на контрольной площадке. Разница температур к концу зимы составила около 5 °С на глубине 3,2 м и около 8 °С на глубине 1,6 м. С началом теплого периода эта разница стала уменьшаться.

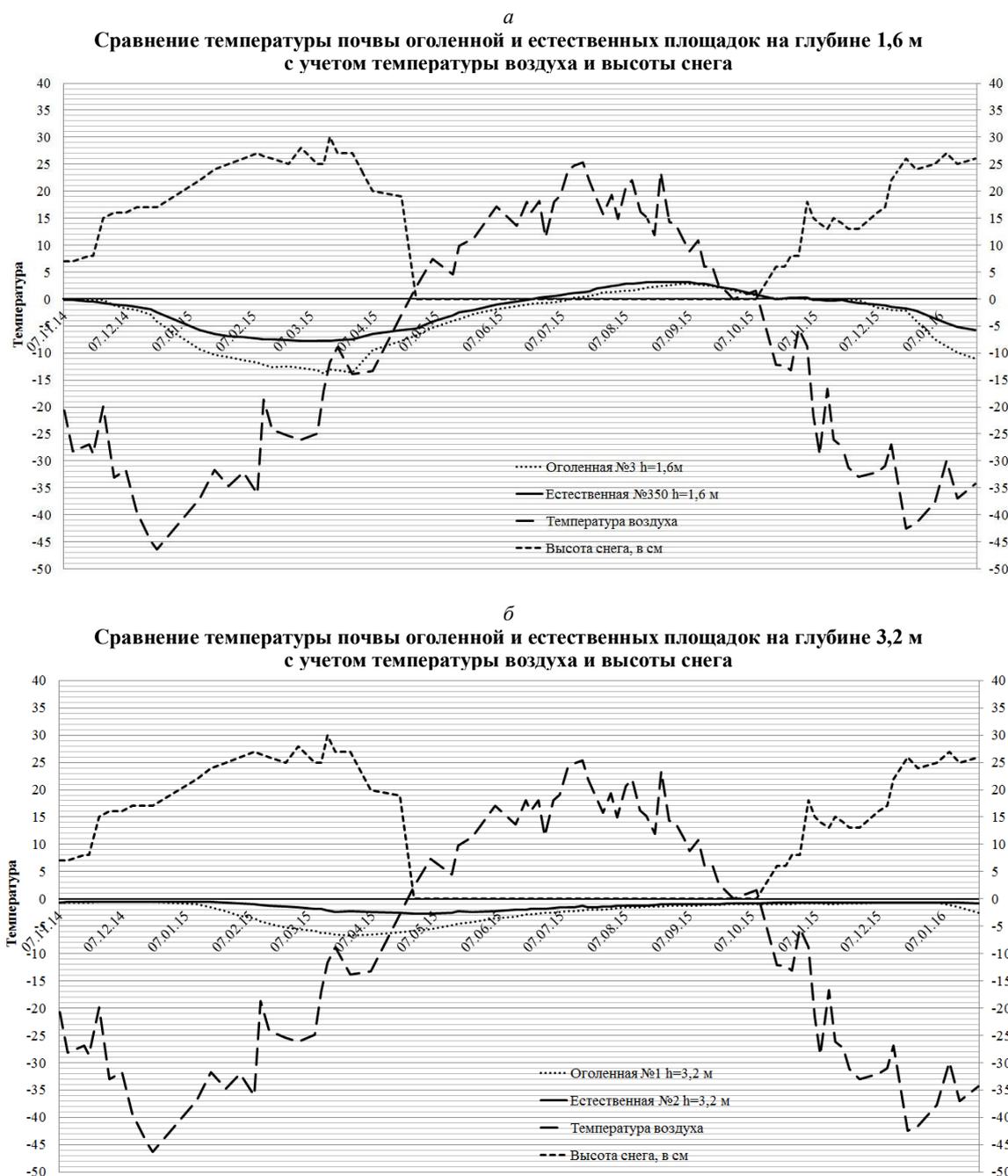


Рис. 2. Временной ход температуры воздуха, высоты снежного покрова, температуры грунта на глубинах 1,6 м (а) и 3,2 м (б) на контрольной и экспериментальной площадках за период наблюдений (температура воздуха и высота снежного покрова по контрольной площадке)

В результате выполненных экспериментальных работ был получен полный объем данных о гранулометрическом составе, плотности, влажности и теплофизических характеристиках грунтов низкой надпойменной террасы р.Лены для типичных геокриологических и климатических условий Центральной Якутии (табл. 2). Влажность, плотность и основные теплофизические свойства грунтов являются осредненными за теплый период года (с мая по сентябрь включительно). Влажность грунтов варьирует в пре-

делах от 5,3 до 14,5 %, плотность – от 2540 до 2700 кг/м³, теплопроводность – от 0,24 до 1,18 Вт/(м·К), температуропроводность – от 0,18 до 0,52·10⁶ м²/с, объемная теплоемкость – от 1,28 до 2,36·10⁶ Дж/(кг·К).

Межгодовая изменчивость влажности пород сезоннотропавяющего слоя на экспериментальных площадках отражена на рис. 3.

Сравнение данных по влажности, теплопроводности почвогрунтов, полученных в 1970-е гг. и в 2014–2016 гг., показало, что они сопостави-

Теплофизические характеристики грунтов

Глубина, м	Разрез	Влажность, W, %	Плотность грунтов, ρ , кг/м ³	Теплопроводность, λ , Вт/(м·К)	Температуропроводность, $a \cdot 10^6$, м ² /с	Объемная теплоемкость, $C \cdot 10^{-6}$, Дж/(кг·К)
0,1	Алевриты (супесь, с растительностью)	14,5	2580	0,24	0,19	1,28
0,2	Алевриты (супесь, с растительностью)	12,3	2610	0,26	0,19	1,33
0,3	Алевриты (супесь мелкозернистая)	10,3	2550	0,25	0,18	1,37
0,4	Алевриты (супесь мелкозернистая)	8,5	2630	0,42	0,32	1,3
0,5	Алевриты (супесь мелкозернистая)	6,2	2540	0,48	0,3	1,56
0,6	Алевриты (супесь)	6,2	2590	0,44	0,26	1,71
0,7	Алевриты (супесь)	5,5	2610	0,56	0,31	1,82
0,8	Алевриты (супесь)	5,3	2640	0,66	0,34	1,95
0,9	Песок пылеватый	5,7	2630	0,53	0,25	2,09
1,0	Песок пылеватый	6,8	2660	0,76	0,36	2,14
1,1	Песок пылеватый	7,2	2680	0,9	0,39	2,27
1,2	Песок мелкозернистый	7,1	2650	1,05	0,5	2,06
1,3	Песок мелкозернистый	6,4	2690	0,98	0,46	2,1
1,4	Песок мелкозернистый	5,9	2700	1,18	0,52	2,23
1,5	Песок мелкозернистый	6,1	2680	1,04	0,44	2,36

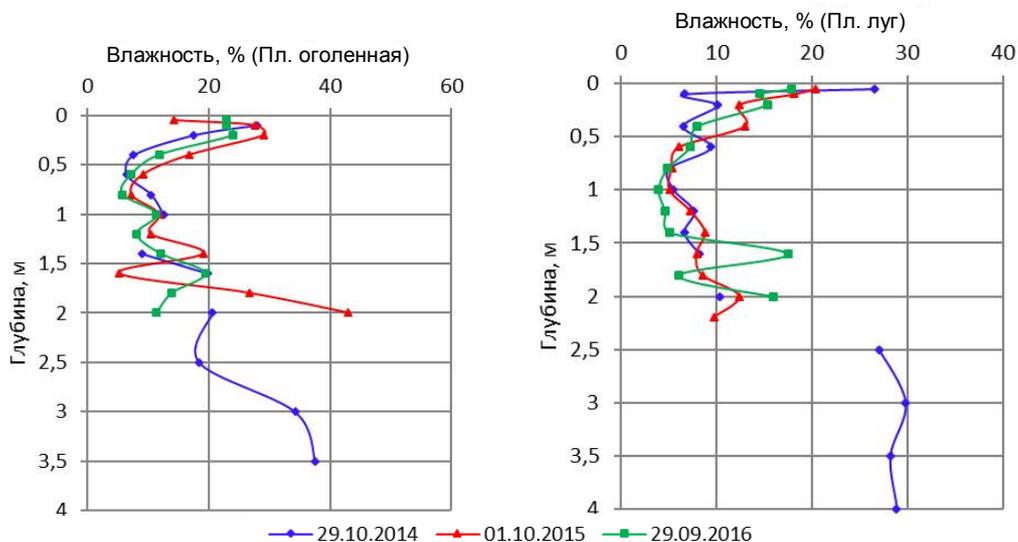


Рис. 3. Распределение влажности грунтов сезоннопротаивающего слоя на экспериментальных площадках в 2014–2016 гг.

Теплофизические характеристики грунтов в 1972 и 2015 гг.

мы и имеют незначительные отклонения (табл. 3). Отчасти это можно объяснить как различной точностью использованных в 1970-х и в настоящее время методов измерений, так и конкретными погодными условиями летнего сезона.

Средняя годовая температура воздуха в последнее пятилетие, как выше было отмечено, по сравнению с первым пятилетием 1970-х гг. повысилась на 2,8 °С, а средняя годовая темпе-

Год	Глубина, м	Разрез	Влажность, %	Теплопроводность, Вт/(м·К)
1972	0,2	Суглинок пылеватый	12	0,523
	1,0	Песок мелкозернистый	6,1	0,84
2015	0,2	Алевриты (супесь, с растительностью)	12,3	0,605
	1,0	Песок пылеватый	6,8	0,76

Таблица 4

Осредненные средние месячные и средние годовые температуры грунтов на глубине 3 м (1971–1973 гг.) и 3,2 м (2014–2016 гг.) на естественной и нарушенной площадках

Годы	Месяцы												Год
	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
Естественная (луг) площадка													
1971–1973	-0,8	-0,7	-0,7	-0,7	-1,7	-3,2	-4,0	-3,6	-2,8	-2,0	-1,4	-1,1	-1,9
2014–2016	-0,7	-0,6	-0,7	-0,6	-1,1	-2,0	-2,6	-2,4	-1,9	-1,5	-1,1	-0,9	-1,3
Нарушенная (оголенная) площадка													
1971–1973	-0,7	-0,6	-0,7	-4,0	-8,5	– 10,5	-9,9	-7,5	-4,4	-2,7	-1,4	-0,9	-4,3
2014–2016	-1,0	-0,7	-0,7	-1,2	-4,6	-6,4	6,3	-4,1	-3,3	2,2	-1,6	-1,2	-2,9

Таблица 5

Сравнение осредненных средних годовых температур почвогрунтов на экспериментальных площадках в 1971–1973 и 2014–2016 гг., °С

Н, м	Пл. оголенная (Огл)			Пл. естественная (Ест)			1971–1973	2014–2016
	1971–1973	2014–2016	ΔT	1971–1973	2014–2016	ΔT	$\Delta T = \text{Огл} - \text{Ест}$	$\Delta T = \text{Огл} - \text{Ест}$
0,2	-6,2	-6,0	-0,2	-2,5	-2,7	0,2	-3,7	-3,3
0,4	-6,1	-5,7	-0,4	-2,7	-2,5	-0,2	-3,4	-3,2
0,8	-5,9	-5,8	-0,1	-2,7	-2,1	-0,6	-3,2	-3,7
1,2	-5,1	-4,4	0,3	-2,3	-1,9	-0,4	-2,8	-2,5
1,6	-5,1	-4,9	-0,2	-2,2	-2,0	-0,2	-2,9	-2,9
2,4	-4,6	-3,2	-1,4	-1,9	-1,5	-0,4	-2,7	-1,7
3,2	-4,3	-3,0	-1,3	-2,1	-1,4	-0,7	-2,2	-1,6

Таблица 6

Мощность сезонноталого слоя грунтов на экспериментальных площадках, м

Год	Естественная площадка	Нарушенная площадка
1972	1,84	2,0
1973	1,99	–
2014	2,10	–
2015	2,23	2,03
2016	2,08	2,15

Выводы

Сопоставление результатов наблюдений, проведенных на экспериментальных площадках в 2014–2016 гг., с данными 70-х гг. прошлого века показало, что значения средней годовой температуры воздуха ($T_{вз}$) повысились на 2,6 °С. Сумма же средних месячных положительных температур воздуха ($\sum +T_{вз}$) увеличилась на 0,6 °С, а сумма средних месячных отрицательных температур воздуха ($\sum -T_{вз}$) понизилась на 30,5 °С.

Получен полный объем данных о гранулометрическом составе, плотности, влажности и теплофизических характеристиках почвогрунтов низкой надпойменной террасы р. Лены для типичной геокриологических и климатических условий Центральной Якутии.

Установлено, что средняя годовая температура грунтов на глубине 3 м повысилась на 0,6 °С

ратура грунтов на глубине 3–3,2 м – на 0,6 °С на естественной и на 1,4 °С на нарушенной площадках (табл. 4). В настоящее время средняя годовая температура грунтов в деятельном двухметровом слое на площадке с удаленными покровами на 2,5–3,7 °С холоднее, чем на естественной (табл. 5). В 1970-е гг. на оголенной площадке ниже деятельного слоя в зимнее время процесс аккумуляция холода проходил более интенсивно, чем в настоящее время (рис. 4). В то же время в сезонноталывающем слое грунтов такая закономерность не наблюдается, т.к. зимнее их охлаждение компенсируется ранним весенним и поздним летним прогревом (табл. 5). Пилообразный характер кривой распределения средней годовой температуры почвогрунтов в деятельном слое в нарушенных условиях, по-видимому, объясняется разностью применяемых методик.

Разность мощностей сезонноталого слоя грунтов на оголенной и естественной площадках незначительна и их сопоставление считаем не корректным. В период с середины 1970-х гг. до 2009 г. территория стационара не была огожена, поэтому подвергалась антропогенному воздействию разного рода. Это, по-видимому, способствовало повышению мощности сезонноталого слоя грунтов на площадке с ненарушенными условиями (табл. 6).

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВОГРУНТОВ ПРИ НАРУШЕНИИ ПОКРОВОВ

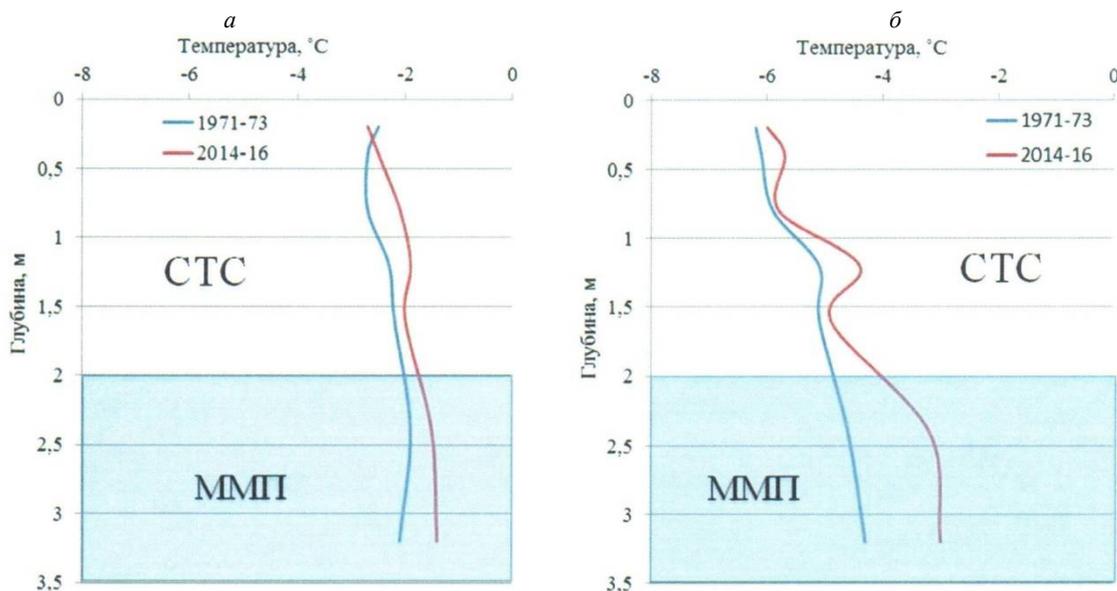


Рис. 4. Сравнение распределения средней годовой температуры грунтов с глубиной на естественной (а) и нарушенной (б) площадках в разные периоды наблюдений

на естественной и на 1,4 °С на нарушенной площадках. В 1970-е гг. на оголенной площадке ниже деятельного слоя в зимнее время процесс аккумуляция холода происходил более интенсивно, чем в настоящее время. В холодный период (ноябрь–апрель) отепляющее влияние снежного покрова составило в среднем 7,7 °С.

При актуализации параметров криолитозоны в расчетах и прогнозах температурного режима грунтов необходимо учитывать современные изменения климата и его влияние на температурный режим почвогрунтов.

Литература

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2014 год. М.: Росгидромет, 2015. 107 с.
2. Жирков А.Ф., Варламов С.П., Железняк М.Н. Результаты годичного цикла наблюдений температурного режима грунтов в естественных условиях и при нарушении покровов // Материалы Пятой конференции геокриологов России. МГУ им. М.В. Ломоносова, 14–17 июня 2016 г. Т. 2, ч. 5. Динамическая геокриология. Геокрио-

логические процессы и явления. М.: Университетская книга, 2016. С. 52–58.

3. Павлов А.В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. Якутск: Кн. изд-во, 1975. 304 с.

4. Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 282 с.

5. Павлов А.В. Расчет и регулирование мерзлотного режима почвы. Новосибирск: Наука, 1980. 240 с.

6. IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2013. 1535 p.

7. IPCC Summary for Policymakers / Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press: P.1–30.

Поступила в редакцию 18.08.2017