

Результаты 35-летних мониторинговых исследований криолитозоны на стационаре «Чабыда» (Центральная Якутия)

С.П. Варламов, Ю.Б. Скачков, П.Н. Скрыбин

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск
vsp@mpi.ysn.ru

Аннотация. Представлены результаты 35-летнего мониторинга на стационаре «Чабыда» за тепловым состоянием мерзлотных ландшафтов при современном потеплении климата. Анализ многолетних данных метеостанций региона четко показал один из наиболее высоких трендов повышения среднегодовой температуры воздуха на севере России. Установлены количественные закономерности многолетней изменчивости параметров теплового состояния грунтов: температуры грунтов на подошвах деятельного слоя и годовых теплооборотов, глубины сезонного протаивания. Показана динамика теплового состояния слоя годовых теплооборотов при потеплении климата, свидетельствующая о термической устойчивости как высокотемпературных, так и низкотемпературных мерзлых пород. Основным регулирующим фактором теплового состояния грунтов мерзлотных ландшафтов являются короткопериодные колебания режима снегонакопления. Глубина сезонного протаивания характеризуется малой межгодовой изменчивостью, слабо реагирует на потепление климата и тенденции ее увеличения и уменьшения статически незначимы. Результаты исследований теплового режима грунтов можно распространить на однотипные ландшафты региона и являются надежной основой для прогноза теплопереноса в естественных ландшафтах.

Ключевые слова: глубина сезонного протаивания, климатические изменения, мониторинг, реакция криолитозоны, температура грунтов.

Results of 35 Years of Permafrost Monitoring at the Chabyda Station, Central Yakutia

S.P. Varlamov, Yu.B. Skachkov, P.N. Skryabin

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk
vsp@mpi.ysn.ru

Abstract. This paper presents the results of 35 years of observations conducted at the Chabyda station to monitor the thermal state of permafrost landscapes under current climatic warming. The analysis of long-term records from weather stations in the region has revealed one of the highest increasing trends in mean annual air temperature in northern Russia. Quantitative relationships in the long-term variability of ground thermal parameters, such as ground temperature at the bottom of the active layer and seasonal thaw depth, have been established. The ground temperature dynamics within the depth of zero annual amplitude indicates that both warm and cold permafrost are thermally stable. Short-term variability of the snow accumulation regime is the main factor controlling the thermal state of the ground in permafrost landscapes. The depth of seasonal thaw is characterized by low interannual variability and exhibits little response to climate warming, with no statistically significant increasing or decreasing trend. The results of the ground thermal monitoring can be extended to similar landscapes in the region, providing a reliable basis for predicting heat transfer in natural, undisturbed landscapes.

Key words: seasonal thaw depth, climate change, monitoring, permafrost response, ground temperature.

ВАРЛАМОВ Степан Прокопьевич – к.г.н., с.н.с.; СКАЧКОВ Юрий Борисович – к.г.н., с.н.с.; СКРЯБИН Павел Николаевич – к.г.н., с.н.с.

Введение

В условиях существенных климатических изменений последних десятилетий в Центральной Якутии [1], наиболее густонаселенного и перспективного для сельскохозяйственного и промышленного развития региона, важно постоянно иметь информацию о реакции криолитозоны на современное потепление.

С начала 1990-х годов унифицированную систему наблюдений за состоянием геологической среды на территории многолетнего и сезонного промерзания земной коры, оценки, контроля и прогноза ее изменений под воздействием природно-климатических и техногенных факторов стали определять как мониторинг криолитозоны. Мониторинг криолитозоны можно считать методом, позволяющим выяснить перспективную направленность современной эволюции криолитозоны в условиях меняющегося климата и техногенеза [2, 3].

Основными термическими параметрами, которые могут быть индикаторами тепловой эволюции верхних горизонтов криолитозоны в условиях современного потепления климата, являются: глубина сезонного протаивания (ξ), среднегодовые температуры на подошвах слоя сезонного протаивания (T_{ξ}) и слоя годовых теплооборотов (T_0).

В 1981 г. в 20 км к юго-западу от г. Якутска для проведения режимных наблюдений за тепловым состоянием верхних горизонтов многолетнемерзлых пород Институтом мерзлотоведения СО РАН был организован теплорезервуарный стационар «Чабыда». Деятельность стационара и результаты многолетних наблюдений на нем отражены в десятках публикациях, а также в документах, выходящих под эгидой Федеральной службы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды [4, 5]. К настоящему времени накоплен значительный объем длительных рядов наблюдений, не имеющих аналогов в Центральной Якутии. Информация, полученная на стационаре, позволяет оценить реакцию верхних горизонтов криолитозоны на климатические колебания последних десятилетий.

Объекты и методы исследования

Стационар «Чабыда» расположен в зоне средней тайги и характеризует как низко-, так и высокотемпературную криолитозону. Детальная характеристика наблюдательных площадок и их расположение на стационаре даны в ряде публикаций [6, 7].

Рельеф района исследований характеризуется сочетанием пониженных и возвышенных участков холмисто-увалистой равнины. Пониженные участки представляют собой днища ручьев и

распадков, сухие возвышенные участки – склоны различной крутизны и водораздельные пространства. На склонах грунты представлены мелко- и среднезернистыми песками, на водоразделах в верхних горизонтах – супесями, ниже – песками. Объектами исследований являются горные породы слоя годовых теплооборотов или, иначе говоря, слоя годовых температурных колебаний (верхние 10–20 м).

На территории стационара в зависимости от ландшафтных условий мощность сезонноталого слоя (ξ) грунтов с разным механическим составом и влагосодержанием, от характера растительного и напочвенного покровов изменяется в больших пределах от 0,4 до 4,0 м, среднегодовая температура грунтов (T_0) на глубине 10 м – от $-0,2$ до $-5,0$ °C [6].

Экспериментальные площадки (Пл.) были организованы в двух типах местности: мелкодолинный (днище долины ручья) – в сфагново-багульниково-ерниковой мари (Пл. 3а), мохово-осоково-вейниковой низине (Пл. 8а), мохово-багульниково-ерниковой листовенничной редине (Пл. 1) и в мохово-багульниково-брусничном листовенничнике (Пл. 8) на днище ложбины стока; склоновый – в мертвопокровно-толокнянковом сосняке на пологом склоне (Пл. 5, 6б), толокнянковом сосняке (Пл. 7б) и брусничном листовенничнике (Пл. 9) на приводораздельных склонах, на умеренно-крутых склонах в брусничном сосняке северной (Пл. 10) и толокнянковом сосняке южной (Пл. 11) экспозиций.

Наблюдения за термическим режимом грунтов деятельного слоя на стационаре «Чабыда» проводились в теплые сезоны 1981 и 1982 гг. ежедневно, в 7 сроков, а в холодный сезон 1982/83 гг. – в 4 стандартных срока. В годовые циклы 1983–1986 гг., летом, наблюдения проводились один раз в пентаду, в 4 срока. В 1981–1987 гг. замеры температуры грунтов в слое годовых теплооборотов проводились один раз в декаду. С 1987 г. термические наблюдения проводятся по более сокращенной программе – 15 числа каждого месяца. Также ежемесячно наблюдается высота снежного покрова, а в конце теплого сезона – глубина сезонного протаивания. Методика проведения геотермического мониторинга показала свою надежность и может с успехом использоваться в разных природно-климатических условиях.

Результаты и обсуждение

Динамика современного климата. Изменчивость основных элементов климата (температура воздуха и атмосферные осадки) за период исследований на стационаре «Чабыда» проследим по данным метеостанции г. Якутска, бли-

жайшей к территории исследований (рис. 1–2). Следует отметить, что норма (средняя за период 1961–1990 гг.) среднегодовой температуры воздуха по г. Якутску составляет $-10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а норма среднегодовой суммы осадков – 235 мм.

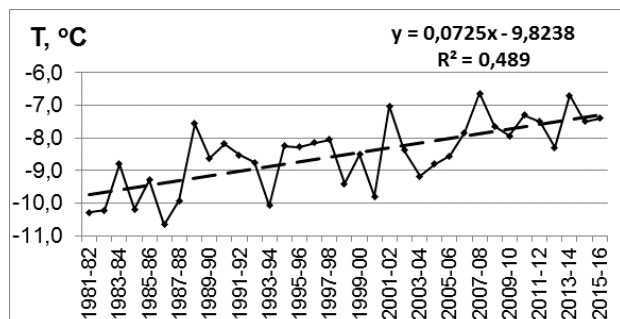


Рис. 1. Многолетняя изменчивость (1981–2016 гг.) среднегодовой температуры воздуха в г. Якутске, $^{\circ}\text{C}$. Пунктир – линейный тренд.

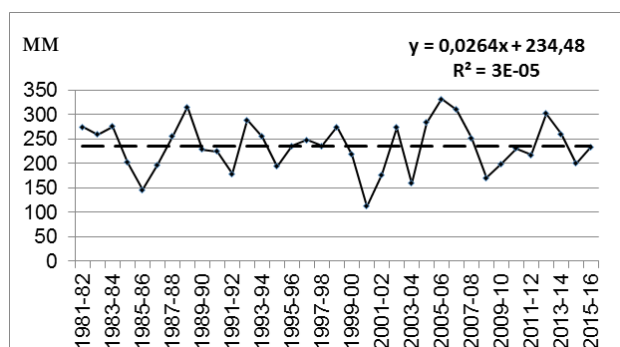


Рис. 2. Многолетняя изменчивость (1981–2016 гг.) годовой суммы осадков в г. Якутске, мм. Пунктир – линейный тренд.

Как свидетельствует рис. 1, тренд повышения среднегодовой температуры воздуха статистически значим и имеет устойчивый рост. Это повышение происходило преимущественно за счет потепления зимних сезонов (октябрь–апрель). В летние сезоны (май–сентябрь) потепление было менее существенно.

Представленные на рис. 2 данные показывают, что за последние десятилетия наблюдались значительные межгодовые колебания годовых сумм осадков, но в целом в Якутске они не увеличивались. Наблюдавшиеся в последние 35 лет суммы осадков по месяцам и в целом за год практически близки к нормам. Тем не менее необходимо отметить, что в отдельные годы (1989, 1993, 2005–2007, 2013 гг.) выпадали аномально большие осадки.

Анализ многолетней изменчивости температуры грунтов. К настоящему времени по площадкам 1 и 5 имеется база данных за 36 лет наблюдений, по Пл. 8 – за 34 года, по Пл. 9 – за 32 года, а по остальным площадкам – за 31 год. Такой представительный материал позволяет

качественно провести анализ изменчивости основных тепловых параметров слоя годовых теплооборотов и сделать объективные выводы. Представление о многолетней изменчивости величины ξ и T_0 на экспериментальных площадках дает табл. 1.

Т а б л и ц а 1
Средние многолетние и экстремумы основных тепловых параметров грунтов слоя годовых теплооборотов

Площадка (годы наблюдений)	ξ , м			T_0 , $^{\circ}\text{C}$		
	min	среднее	max	min	среднее	max
Мелкодолинный тип местности						
1 (1981–2016 гг.)	0,81	1,07	1,30	-3,4	-2,7	-1,8
3а (1986–2016 гг.)	0,37	0,37	0,53	-4,9	-4,0	-2,8
8 (1982–2016 гг.)	0,86	1,17	1,37	-3,3	-2,7	-1,9
8а (1986–2016 гг.)	0,65	1,03	1,45	-4,5	-3,3	-1,8
Склоновый тип местности						
5 (1981–2016 гг.)	3,26	3,51	3,86	-0,6	-0,4	-0,3
6б (1986–2016 гг.)	3,54	3,79	4,11	-0,6	-0,4	-0,2
7б (1986–2016 гг.)	1,70	1,87	2,00	-1,5	-0,9	-0,3
9 (1985–2016 гг.)	1,31	1,51	1,72	-2,5	-2,2	-1,8
10 (1986–2016 гг.)	1,63	1,91	2,11	-2,4	-2,0	-1,6
11 (1986–2016 гг.)	1,73	1,91	2,27	-1,5	-1,2	-0,9

Наибольшие колебания T_0 происходили в ландшафтах мелкодолинного типа местности (табл. 1 и рис. 3, а). Эти изменения обуславливались в основном влиянием двух зимних факторов: условиями снегонакопления и суммой температур воздуха за холодный период. Причем первый фактор в условиях резко континентального климата Центральной Якутии является преобладающим [8, 9].

За весь период наблюдений самые низкие и высокие среднегодовые температуры на площадках мелкодолинного типа местности были отмечены соответственно в 2003/04 и 2006/07 гидрологические годы (октябрь–сентябрь). В склоновом типе местности пик понижения температуры грунтов также пришелся на 2003/04 г., а пик повышения температуры отмечался в 2007/08 г. Исключением здесь является Пл. 7б, где самая низкая температура грунтов отмечена в 1987/88 г. (рис. 3).

Зима в 2002/03 гг. была аномально малоснежной и с аномально поздним сроком образования устойчивого снежного покрова (рис. 4). Это стало главной причиной сильного охлаждения грунтов, несмотря на достаточно теплый год. Последующие годы характеризовались многоснежными зимами, что привело к резкому повышению температуры грунтов. В период с 2002/03 по 2006/07 (2007/08) г. температура грунтов на подошве деятельного слоя в этих типах местности повысилась на $0,5\text{--}6,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и на подошве слоя годовых теплооборотов – на $0,3\text{--}2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

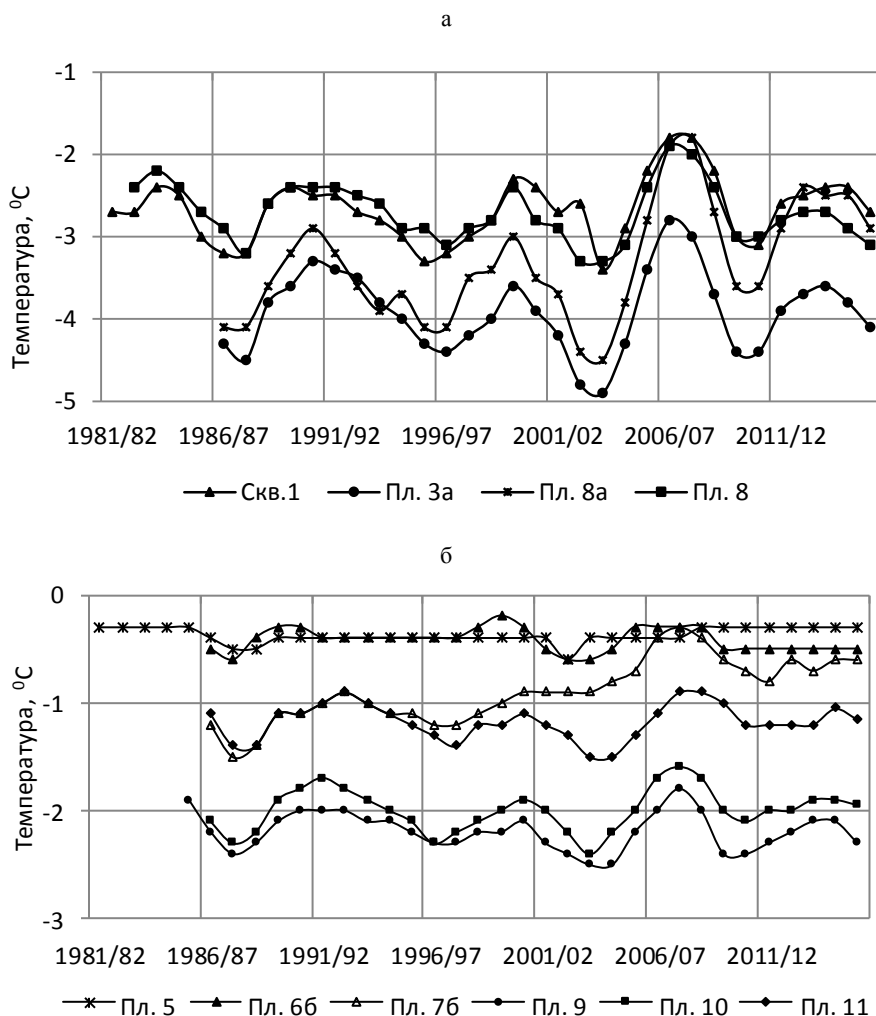


Рис. 3. Многолетняя изменчивость температуры грунтов слоя годовых теплооборотов на глубине 10 м в мелкодолинном (а) и склоновом (б) типах местности на стационаре «Чабьда»

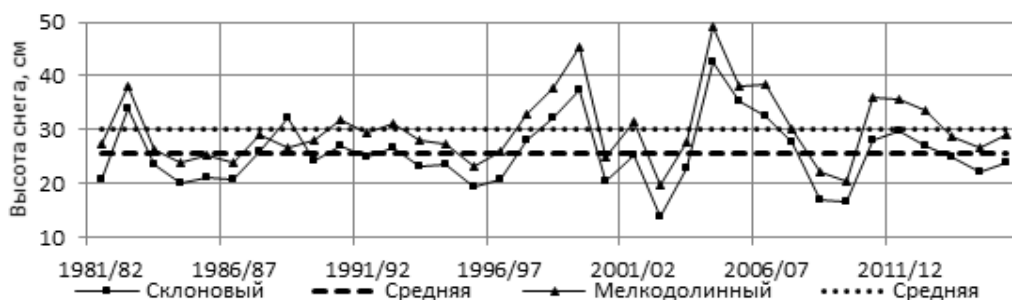


Рис. 4. Многолетняя изменчивость среднезимней высоты снежного покрова в склоновом и мелкодолинном типах местности на стационаре «Чабьда» (пунктирная и точечная линии – среднегодовое значения)

Зимы 2008/09 и 2009/10 гг. характеризовались как аномально малоснежные с поздними сроками образования устойчивого снежного покрова, поэтому грунты сильно охладились почти до уровня 2002/03 г., несмотря на аномально теплые годы.

Последующие зимы охарактеризовались близкими к среднегодовым значениям

средних зимних высот снежного покрова и поэтому средние годовые температуры грунтов на подошвах слоя сезонного протаивания и годовых теплооборотов были близки к среднегодовым значениям. Следует отметить, что корреляционная связь между температурами на подошве слоя сезонного протаивания и средними зимними высотами снежного покрова довольно

высокая (коэффициенты корреляции – 0,55–0,74).

По данным многолетних наблюдений тренды повышения среднегодовых температур слоя годовых теплооборотов выражены крайне слабо. Статистически значимые тренды повышения температуры отмечены лишь на двух площадках 7б (0,42 °С/10 лет) и 8а (0,26 °С/10 лет) (табл. 2). Во многом это было вызвано выше отмеченными аномально многоснежными зимами, а Пл. 8а в течение нескольких теплых сезонов затоплялась талыми водами. Кроме того, первые годы анализируемого периода (1986–1988 гг.) были достаточно холодными. Также следует отметить, что в этих типах местности на площадках 5, 8 и 9 наблюдаются тренды понижения T_0 . Это связано, в первую очередь, с увеличением затенения поверхности под пологом древостоя его кронами и подрастанием кустарникового и кустарничкового покровов.

По данным многолетних наблюдений экспериментально установлен тепловой эффект аномальных зим. Так, одна теплая и малоснежная зима может понизить температуру грунтов значительней, чем холодная и многоснежная. А аномально холодная зима способна произвести более сильный эффект, чем несколько следующих друг за другом аномально теплых [8].

Важнейший вывод из результатов многолетних наблюдений состоит в том, что температура грунтов, испытывая значительные межгодовые и короткопериодные колебания, связанные в основном с большой изменчивостью режима снегонакопления, имеет очень слабую тенденцию к повышению. На фоне значительных изменений среднегодовой температуры воздуха (в г. Якутске за период 1981–2016 гг. тренд повышения составил 0,073 °С/год) термическое состояние слоя годовых теплооборотов на площадках склонового типа местности стационара «Чабыда» остается стабильным.

Анализ многолетней изменчивости глубины сезонного протаивания грунтов. Как известно, глубина сезонного протаивания (ξ) зависит от механического состава грунтов, их влажности, характера растительного и напочвенного покровов. Наибольшая многолетняя межгодовая изменчивость $\Delta\xi$ характерна для грунтов мелкодолинного типа местности и составляет 13,8–37,7 % от их максимального экстремума. В склоновом типе местности $\Delta\xi$ изменяется в пределах 10,9–23,8 % (табл. 1 и рис. 5). Ранее считалось, что основными факторами, определяющими межгодовую изменчивость мощности сезонноталого слоя, являются сумма положительных температур воздуха и летние осадки. Однако последние разработки по этому вопросу показывают, что многолетние изменения глубины сезонного протаивания и сумм летних температур воздуха недостаточно четко коррелируют между собой [10].

Наибольшие значения ξ (3,63–4,11 м) отмечены на Пл. 6б (верхняя часть пологого песчаного склона), наименьшие (0,30–0,58 м) – на Пл. 3а (днище долины ручья с торфяным грунтом). На десяти площадках стационара в среднем максимальная мощность ξ (1,81 м) приходится на 1988–1989 и 2006–2008 гг.

Вероятнее всего, внутригрунтовые условия, а именно колебания влажности, могут быть одной из основных причин, влияющих на глубину протаивания. Анализ полученных данных на стационаре показывает, что наибольшие межгодовые изменения ξ свойственны ландшафтам мелкодолинного типа местности (до 80 см). На площадках в склоновом типе местности эти изменения составили 30 – 60 см (табл. 1).

В мелкодолинном типе местности на площадках 3а и 8 отмечено статистически значимое увеличение глубины сезонного протаивания. На площадках склонового типа местности (5, 6б, 9, 11) наблюдаются статически значимые тенден-

Т а б л и ц а 2

Тренды среднегодовой температуры грунтов на подошве слоя годовых теплооборотов (глубина 10 м)

Тип местности	Грунт, площадка (Пл.) и их номера	Термический тип	Период наблюдений	Тренды, °С/10 лет
Мелкодолинный	Песок (Пл. 8, Пл.1)	–3...–2	1981–2016	–0,08...0,01
	Торф, песок (Пл. 3а, 8а)	–5...–3	1986–2016	0,07...0,42
Склоновый	Песок (Пл. 5, 6б, 7б)	–1...0	1981–2016	–0,01...0,26
	Супесь, песок (Пл. 10, 11)	–2...–1	1986–2016	0,01...0,04
	Суглинок, супесь, песок (Пл.9)	–3...–2	1985–2016	–0,08

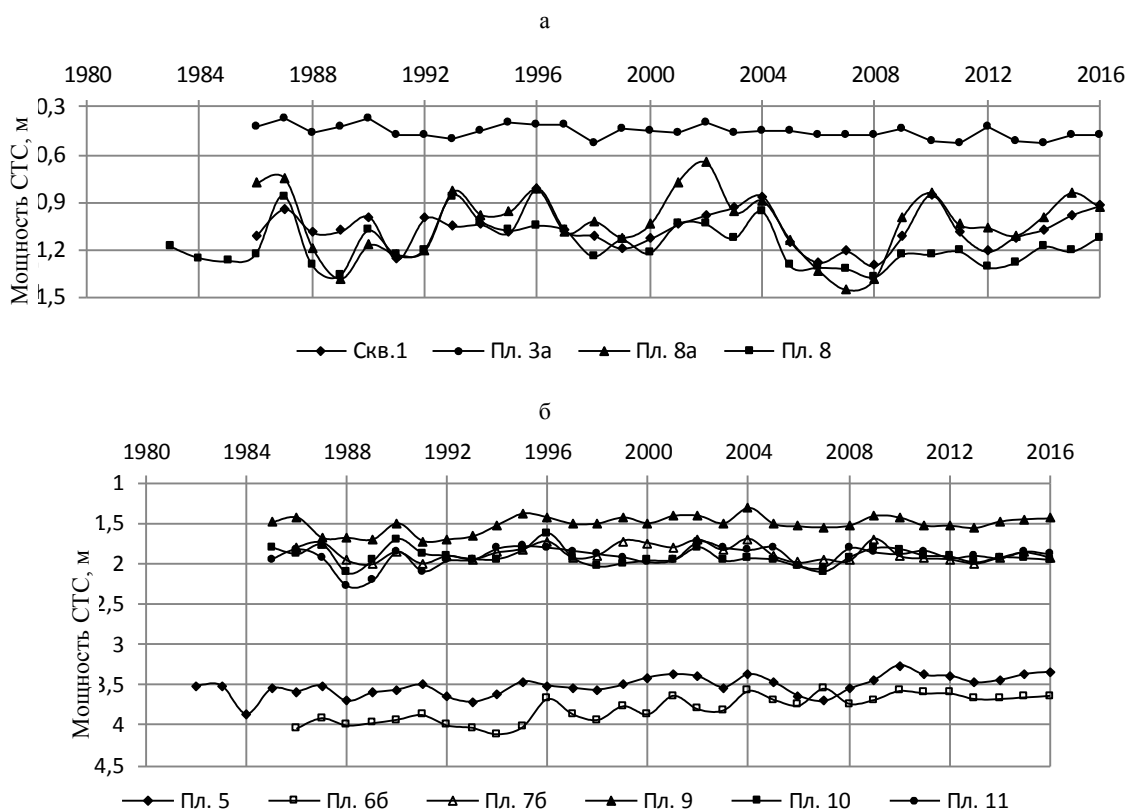


Рис. 5. Многолетняя изменчивость мощности сезонноталого слоя в мелкодолинном (а) и склоновом (б) типах местностей на стационаре «Чабыда»

ции ее понижения. И если на водораздельном участке (Пл. 9) это уменьшение можно связать с интенсивным произрастанием кустарничкового напочвенного покрова, то на площадках 5 и 6б, вероятней всего, существенную роль играют колебания уровня надмерзлотных вод сезонноталого слоя. На остальных площадках (7б, 10) при значительных межгодовых изменениях глубины сезонного протаивания наблюдаются статистически незначимые тенденции ее роста (табл. 3).

Максимальные глубины сезонного протаивания на отдельных площадках наблюдались в разные годы. В мелкодолинном типе местности (площадки 1, 3а, 8, 8а) они отмечены в 2007–2008 годы. В склоновом типе местности максимумы ξ выявлены в следующие годы: Пл.5 – 1984 г., Пл.6б – 1995 г., Пл.7б – 1989 г., Пл.9 – 1991 г., Пл.10 и 11 – 1988 г.

Таким образом, при потеплении климата даже в пределах локальных ненарушенных участков может обнаруживаться противоположная направленность в современных изменениях глубины сезонного протаивания грунтов. Это служит веским доказательством того, что мощность сезонноталого слоя не является чувствительным индикатором современных изменений климата.

Т а б л и ц а 3
Тренды глубины сезонного протаивания грунтов стационара «Чабыда»

Тип местности	Грунт, площадка (Пл.) и их номера	Период наблюдений	Тренды, см/10 лет
Мелкодолинный	Торф (Пл. 3а)	1986–2016	2,4
	Песок (Пл. 1, 8)	1981–2016	0,6...2,4
	Торф, песок (Пл. 8а)	1986–2016	0,0
Склоновый	Песок (Пл. 5, 6б)	1981–2016, 1986–2016	-6,6...-15,1
	Песок, супесь (Пл. 7б)	1986–2016	1,4
	Суглинок, супесь (Пл. 9)	1985–2016	-5,0
	Супесь, песок (Пл. 10, 11)	1986–2016	2,3...-3,4

Анализ большого объема экспериментальных данных подтвердил вывод о слабом отклике глубины сезонного протаивания на современные изменения климата [11]. Наблюдения убедительно показывают, что в условиях современного потепления климата не всегда происходит увеличение глубины сезонного протаивания грунтов. Максимумы и минимумы этой величины на различных площадках

стационара наблюдаются чаще всего в разные годы. Это свидетельствует о том, что глубина сезонного протаивания зависит не только от многолетних изменений температуры воздуха в теплый период, но и от других метеорологических факторов.

Выводы

Еще в конце прошлого века нами был сделан вывод об устойчивости термического режима многолетнемерзлых грунтов и их слабой реакции на изменчивость климатических факторов [12]. Последующие годы подтвердили этот тезис.

По итогам анализа 35-летнего мониторинга сделаны главные выводы:

1. Многолетняя динамика теплового состояния слоя годовых теплооборотов при потеплении климата свидетельствует о термической устойчивости как высокотемпературных, так и низкотемпературных мерзлых пород. Основным регулирующим фактором динамики теплового состояния грунтов мерзлотных ландшафтов является режим снегонакопления.

2. Глубина сезонного протаивания, несмотря на значительные межгодовые колебания, слабо реагирует на потепление климата и не имеет значимых тенденций.

3. Результаты исследований теплового режима грунтов можно распространить на однотипные ландшафты Центральной Якутии.

4. Практическая ценность материалов, полученных на стационаре «Чабыда», состоит еще в том, что проектируемая трасса железной дороги до г. Якутска должна пройти в непосредственной близости от района исследований и в связи с этим результаты наблюдений могут быть использованы при моделировании процессов теплообмена в естественных ландшафтах.

Литература

1. Скачков Ю.Б. Тенденции изменения климата Центральной Якутии на рубеже XX–XXI вв. // Материалы Международной научной конференции. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2012. Т.1. С. 236–238.

2. Павлов А.В. Современное состояние мониторинга криолитозоны России и проблемы его

развития // Материалы Первой конференции геокриологов России. Книга 3. М.: Изд-во МГУ, 1996. С. 327–336.

3. Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2008. 229 с.

4. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Электронный ресурс, код доступа: http://downloads.igce.ru/publications/OD_2_2014/v2014/htm/.

5. Шестое национальное сообщение Российской Федерации. Электронный ресурс, код доступа: http://downloads.igce.ru/publications/nac_soobs/nc_2014.pdf.

6. Варламов С.П. Температурный режим грунтов мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии / С.П. Варламов, Ю.Б. Скачков, П.Н. Скрябин. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002. 218 с.

7. Скрябин П.Н. Межгодовая изменчивость теплового режима грунтов района Якутска / П.Н. Скрябин, С.П. Варламов, Ю.Б. Скачков. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. 143 с.

8. Скачков Ю.Б. Аномальные зимы и их роль в формировании термического режима грунтов // Материалы Третьей конференции геокриологов России. М.: Изд-во МГУ, 2005, Т. 3. С. 239–244.

9. Скачков Ю.Б. Современное потепление климата в Якутии // VIII научное совещание географов Сибири и Дальнего Востока: Материалы Российской конференции. Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2007. Т. 1. С. 92–93.

10. Павлов А.В. Взаимосвязь между многолетними изменениями глубины сезонного протаивания грунтов и метеорологическими факторами / А.В. Павлов, Ю.Б. Скачков, Н.Б. Какунов // Криосфера Земли. 2004. Т. VIII, № 4. С. 3–11.

11. Павлов А.В. Мониторинг сезонноталого слоя и температуры мерзлого грунта на севере России / А.В. Павлов, Г.В. Ананьева, Д.С. Дроздов и др. // Криосфера Земли. 2002. Т. VI, № 4. С. 30–39.

12. Скрябин П.Н. Потепление климата и мониторинг теплового состояния грунтов в Центральной Якутии / П.Н. Скрябин, С.П. Варламов, Ю.Б. Скачков // Проблемы геокриологии. Якутск: Изд-во СО РАН, 1998. С. 31–39.

Поступила в редакцию 30.03.2017