

ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 551.5(075.8)

DOI: 10.18384/2712-7621-2022-1-6-30

СОВРЕМЕННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА И РЕАКЦИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ (НА ПРИМЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ И ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА РОССИИ)

Шполянская Н. А.¹, Осадчая Г. Г.¹, Малкова Г. В.²

¹ Ухтинский государственный технический университет
169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, д. 13, Российская Федерация

² Институт криосферы Земли Тюменского научного центра,
Сибирское отделение Российской академии наук
625000, г. Тюмень, ул. Малыгина, д. 86, Российская Федерация

Аннотация

Цель. Исследование реакции криолитозоны в её ландшафтном разнообразии на современное потепление климата на севере европейской территории России и севере Западной Сибири.

Процедура и методы. На основании большого фактического материала наблюдений за динамикой температуры грунта и глубины сезонного протаивания-промерзания вслед за изменением температуры воздуха в XX–XXI вв. проводится сравнительный анализ двух областей криолитозоны, различающихся ландшафтными условиями – северных и южных районов криолитозоны.

Результаты. Выявлено, что реакция криолитозоны неодинакова в разных районах и связана с характером теплообмена в разных ландшафтах. Сделан вывод, что главные различия наблюдаются между северными и южными районами криолитозоны из-за разного характера наземных покровов. В северных районах при неразвитом растительном покрове температура грунтов обычно следует за изменением температуры воздуха, повышаясь и понижаясь вместе с ней. Одновременно увеличивается глубина сезонного промерзания-протаивания вплоть до образования в ряде случаев таликов. В южных районах криолитозоны при хорошо развитой растительности и нарастании в связи с потеплением торфа и мохового покрова с их охлаждающим свойством температура грунтов мало реагирует на повышение температуры воздуха, а в ряде случаев понижается, вызывая уменьшение глубины сезонного протаивания-промерзания и способствуя новообразованиям мерзлоты.

Теоретическая и/или практическая значимость. Предлагаемое исследование актуально, поскольку прогнозируемое таяние вечной мерзлоты вслед за потеплением климата нарушит хозяйственную деятельность в пределах криолитозоны. Анализ влияния разных

© СС ВУ Шполянская Н. А., Осадчая Г. Г., Малкова Г. В., 2022.

ландшафтов на реакцию вечной мерзлоты на потепление климата выявляет важные фундаментальные связи в теплообмене между грунтами и атмосферой.

Ключевые слова: криолитозона, сезонное протаивание-промерзание, ландшафт, потепление климата, температура воздуха, температура грунтов

MODERN CLIMATE CHANGE AND PERMAFROST REACTION (ON THE EXAMPLE OF WESTERN SIBERIA AND THE EUROPEAN NORTH OF RUSSIA)

N. Shpolyanskaya¹, G. Osadchay¹, G. Malkova²

¹ *Ukhta State Technical University*

Pervomayskaya ul. 13, Ukhta 169300, Komi Republic, Russian Federation

² *Earth's Cryosphere Institute of the Tyumen Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*

Malygina ul. 86, Tyumen 625000, Russian Federation

Abstract

Aim. The purpose of the paper is to study the reaction of the cryolithozone in its landscape diversity to the current climate warming. The analysis is carried out for the North of the European territory of Russia and the North of Western Siberia.

Methodology. Based on a large amount of factual material from observations of the dynamics of soil temperature and the depth of seasonal thawing/freezing following changes in air temperature in the 20th–21st centuries, we perform a comparative analysis of two regions of the permafrost zone, which differ in landscape conditions, i.e., the northern and southern regions of the permafrost zone.

Results. It is found that the reaction is not the same in different regions of the permafrost zone and is associated with the nature of heat exchange in different landscapes. It is concluded that the main differences are observed between the northern and southern regions of the permafrost zone, mainly due to the different nature of the ground cover. In the northern regions, with undeveloped vegetation cover, the soil temperature usually follows the change in air temperature, rising along with it. At the same time, the depth of seasonal freezing/thawing increases up to the formation of taliks in some cases. In the southern regions of the permafrost zone, with well-developed vegetation and warming increasing growth of peat and moss cover with their cooling property, the soil temperature reacts little to an increase in air temperature, and in some cases decreases, causing a decrease in the seasonal thawing/freezing depth and contributing to new formations of permafrost.

Research implications. The proposed study is relevant, since the predicted thawing of permafrost following climate warming will disrupt economic activity within the permafrost zone. At the same time, analysis of the impact of different landscapes on the permafrost response to climate warming reveals important fundamental relationships in heat exchange between soils and the atmosphere.

Keywords: permafrost zone, seasonal thawing/freezing, landscape, climate warming, air temperature, soil temperature

Введение

Современное изменение климата в сторону потепления не оставляет равнодушным население Земли. Предрекают разнообразные необратимые изменения природы, опасные для устоявшейся жизни людей. В России, где на 70% территории распространена вечная мерзлота (криолитозона), опасность видится ещё более серьёзной. Мерзлота – производная климата. Пространственно-временная динамика криолитозоны и процессы в ней являются прямым следствием динамики климата. Прогнозируются таяние мерзлоты и большие осложнения хозяйственной деятельности во многих районах, высвобождение метана из мёрзлых пород, эмиссия которого в атмосферу загрязнит её и усилит интенсивность потепления, и т. п. В связи с этим анализ реакции природы северных районов России на изменение климата является важной актуальной проблемой.

В основе данного исследования лежит анализ колебательного во времени характера климата (длиннопериодных циклических колебаний в четвертичный период и короткопериодных колебаний за последнее тысячелетие и в XX–XXI вв.), выявление тенденций его дальнейшего развития, формирования температуры грунтов под влиянием климата и ландшафтных условий, выявление особенностей их взаимодействия в разных физико-географических районах. В результате такого анализа выявляется свойственная каждому району современная направленность развития криолитозоны как реакция на современное потепление климата.

Климат Земли и его колебательный характер

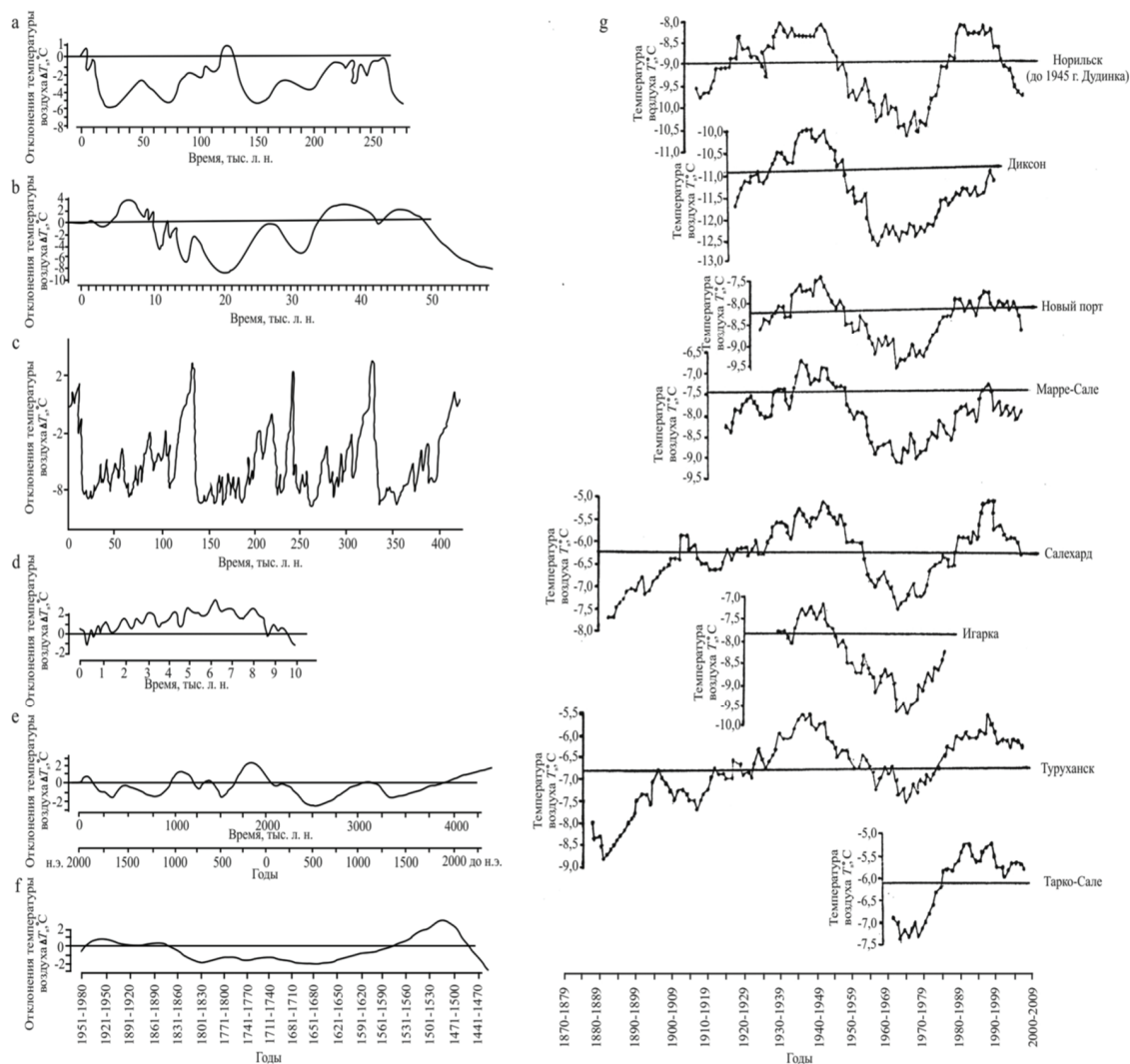
В климате Земли на протяжении всей её истории 4,5 млрд лет проявлялся колебательный характер. Эпохи потепления сменялись эпохами похолодания [31]. Для последних геологических этапов – плейстоцена и голоцена – такое чередование связано преимущественно с неравномерным поступлением тепла от Солнца – главного его источника для Земли. Циклические изменения элементов земной орбиты в ходе движения Земли вокруг Солнца (эксцентриситета Земли с периодом 92–106 тыс. лет, наклона земной оси к эклиптике с периодом 41 тыс. лет, и прецессии земной оси с периодом 19–26 тыс. лет [3; 11; 20]) обуславливают длиннопериодные циклические изменения климата Земли с периодами в тысячи, десятки и сотни тысяч лет (рис. 1а–ф). Меняющееся излучение самого Солнца формирует короткопериодные циклы – 11-летние, 22–24-летние, 30- и 60-летние, вековые в ~100 лет, 300-летние циклы (рис. 1г).

Температурные кривые (рис. 1) показывают:

1. однотипный циклический колебательный глобальный климатический ход на протяжении всего плейстоцена и для Северного, и для Южного полушарий;

2. тот факт, что в эпохи потепления температура воздуха превышала современную не более чем на 2–3°C, в эпохи похолодания была ниже современной на 9–10°C, и это указывает на направленное к современности похолодание;

3. современный климатический период находится на нисходящей ветви климатического макроцикла и направлен в сторону очередного ледникового периода.



a–f – отклонения температуры воздуха в прошлом от современных значений (ΔT_v) по разным авторам:

a – средний неоплейстоцен-голоцен (северная Атлантика) [Emiliani, 1970];

b – поздний неоплейстоцен-голоцен (Западная Сибирь) [Кинд, 1974];

c – средний неоплейстоцен-голоцен (Антарктида, ст. Восток) [Котляков, Лориус, 2000];

d – голоцен (Европейская территория России) [Хотинский и др., 1991];

e – за последние 4 тыс. лет (Европейская территория России) [Кинд, 1974; Климанов, 1988; Полозова, 1988];

f – за последние 500 лет (средние тридцатилетние) [Чернавская, 1988];

g – современный многолетний ход температуры воздуха (T_v) в рамках векового цикла по метеостанциям Западной Сибири за период от начала наблюдений до 2008 г. (скользящие средние десятилетия).

Рис. 1 / Fig. 1. Разнопериодные колебания климата / Multi-period climate fluctuations

Источник: составлено Н. А. Шполянской на основе [29; 30]

Нарастающее похолодание с увеличивающейся частотой колебаний температуры воздуха было показано и

В. Н. Конищевым [8] с помощью разработанного им криолитологического метода, устанавливающего прямую связь

между степенью криогенной переработки минерального вещества (коэффициент криогенной контрастности – ККК) и средней температурой (рис. 2).

Полученные таким образом палеотемпературные кривые для Северной Якутии и севера Европейской России показывают, что каждая из последую-

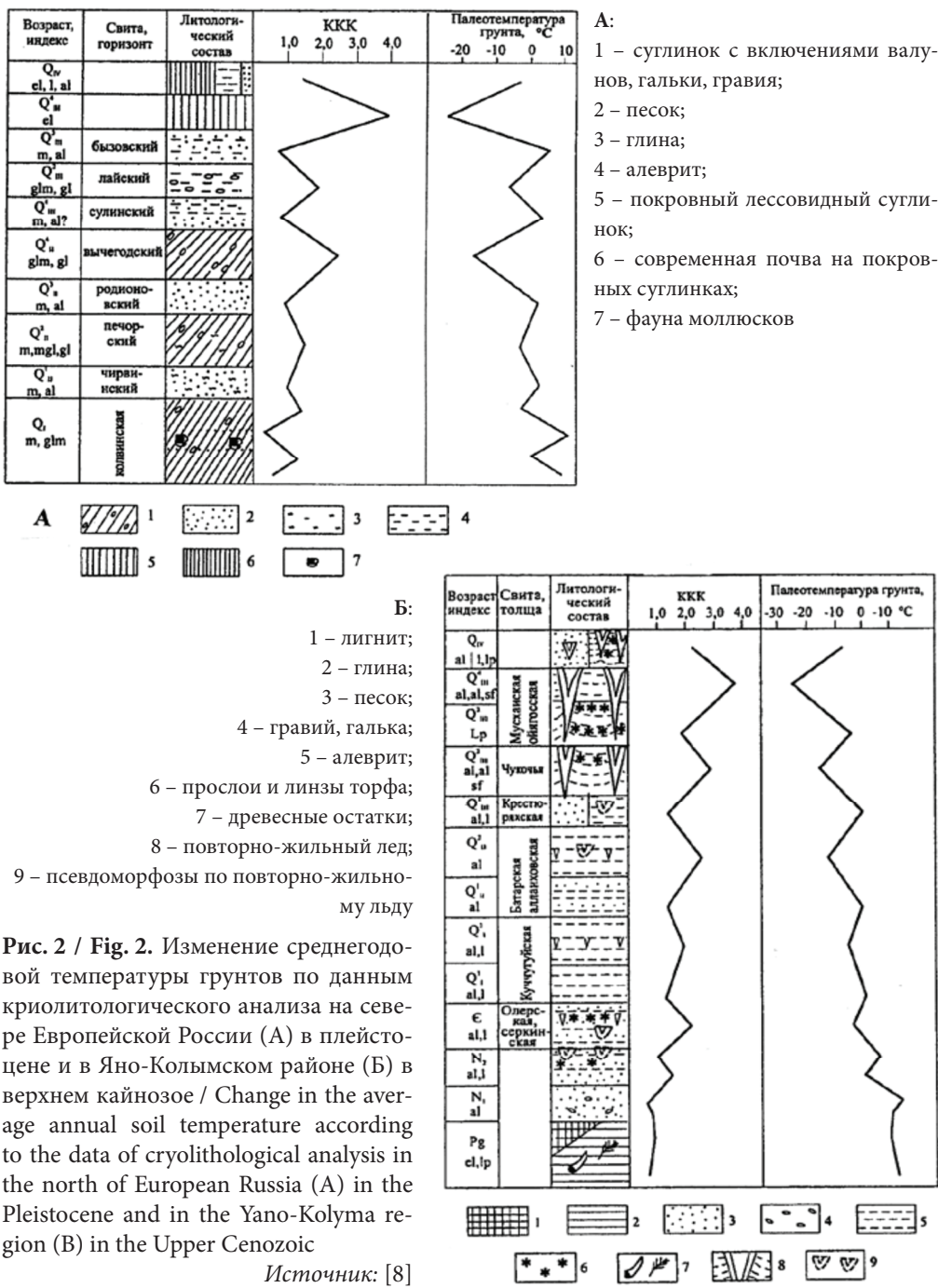


Рис. 2 / Fig. 2. Изменение среднегодовой температуры грунтов по данным криолитологического анализа на севере Европейской России (А) в плейстоцене и в Яно-Колымском районе (Б) в верхнем кайнозое / Change in the average annual soil temperature according to the data of cryolithological analysis in the north of European Russia (A) in the Pleistocene and in the Yano-Kolyma region (B) in the Upper Cenozoic

Источник: [8]

щих эпох похолоданий была более суровой, чем предыдущая, а каждая из последующих эпох потепления была менее тёплой, чем предыдущая.

В рамках всех этих циклов развивалась криолитозона Земли. Заметное похолодание в Северном полушарии прослеживается с позднего плиоцена [2; 7 и др.]. Около 3 млн л. н. в Гренландии и Исландии уже существовали первые континентальные ледниковые покровы [10], на северо-востоке России появляются признаки подземного оледенения, в западной и восточной Европе вымирают теплолюбивые виды растений. Начиная примерно с 2,5 млн л. н., наступает резкое устойчивое похолодание и переход к колебаниям «плейстоценового типа» [4].

В динамике криолитозоны прослеживаются те же ритмы, что и в климатическом ходе. В ледниковые периоды криолитозона расширялась, в межледниковые периоды – деградировала, а местами исчезала.

На фоне длиннопериодных колебаний климата происходят колебания с более короткими периодами. Так (рис. 1e и 1f), в середине I тысячелетия н. э. имело место похолодание («историческая стадия оледенения»), получившая в старинных документах название «века страшных зим». В конце I – начале II тысячелетия её сменила теплая «эпоха викингов» (900–1300 гг.), когда температура воздуха на широтах Балтийского моря была на 1,5–2°C, а в Гренландии – на 2–3°C выше современной. Норманны в 980 г. (под предводительством Эйрика Рауди «Рыжего») успешно осваивали её, развивали там животноводство. С XIII в. снова началось похолодание, в XVI–XVIII вв. наступил так называемый «малый ледниковый период»: средняя годовая температура воздуха понизилась на 1,5–2°C, увеличился ареал морских льдов, разрастались горные ледники. С конца XIX в. началось новое потепление, продолжающееся и сейчас (рис. 3).

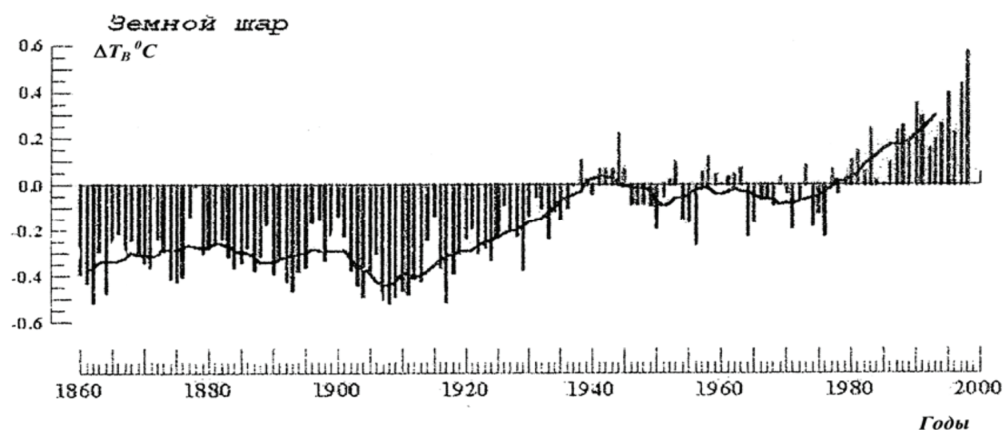


Рис. 3 / Fig. 3. Временные ряды аномалий средней годовой температуры приземного воздуха, осреднённой по территории земного шара. Аномалии вычислены как отклонения от средней за 1961–1999 гг. / Time series of anomalies of the surface air average annual temperature, averaged over the territory of the globe. Anomalies are calculated as deviations from the average for 1961–1999

Источник: [6]

Эта восходящая ветвь осложнена ещё более мелкими по амплитуде и длительности (примерно 30 и 60 лет) волнами (рис. 3 и 1g). Чередовались эпохи: потепления 1879 г., похолодания 1910 г., потепления 1930–40 гг., похолодания 1960–70 гг., потепления 1990–2000 гг., начало нового похолодания после 2000 г. Общая направленность к потеплению отражает продолжающийся выход из «малого ледникового периода».

Все отмеченные циклы хорошо совпадают с циклами солнечной активности, выражающейся в количестве пятен на Солнце (чисел Вольфа) и формирующей преимущественно 11-летние циклы (рис. 4)¹. В годы максимума солнечного цикла растёт активность Солнца, наблюдается увеличение количества пятен, растёт температура воздуха на Земле. В годы минимума активность Солнца затухает, уменьшается количество пятен, понижается температура воздуха. На рис. 4 хорошо видно, что примерно каждые 11 лет

количество солнечных пятен падает до нуля.

В 2008–2009 гг., по данным Лаборатории рентгеновской астрономии Солнца Физического института им. Лебедева РАН, пятна практически не появлялись². Это соответствует спаду температуры в Северном полушарии после 1998–2000 гг. (рис. 1g), что отмечено и в работе Б. Г. Шерстюкова и Р. С. Салугашвили [28]. Ряд исследователей отмечает², что в 2008–2009 гг. количество солнечных пятен сократилось до 100-летнего минимума, т. е. до минимума в начале векового солнечного цикла, начавшегося в начале XX в. и окончившегося в начале XXI в.

На рис. 4 показан ход чисел Вольфа за последние 400 лет. На графике чётко выделяется период с 1645 по 1715 гг., когда пятна практически отсутствовали. Этот период называется минимумом Маундера и по времени совпадает с малым ледниковым периодом. Затем похолодание сменилось потеплением, и чётко проявляются вековые ци-

¹ Что надо знать о солнечном цикле, 2011 [Электронный ресурс]. URL: www.othereal.ru/chto-nadopznat-o-solnechnom-cikle/ (дата обращения: 22.12.2018).

² Губарев В. Чем грозит Земле Солнце без пятен // Правда.ру: [сайт]. URL: www.pravda.ru/news/science/1353048-sun/ (дата обращения: 22.12.2018).

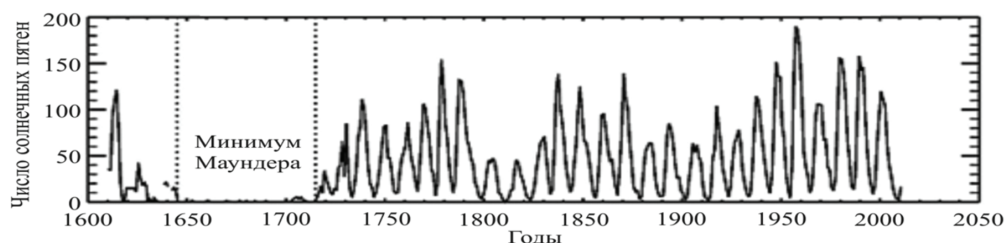


Рис. 4 / Fig. 4. Колебания солнечной активности: ход изменения количества пятен (чисел Вольфа) за 400 лет / Fluctuations in solar activity: the course of change in the number of spots (Wolff numbers) over 400 years

Источник: Что надо знать о солнечном цикле, 2011. URL: www.othereal.ru/chto-nadopznat-o-solnechnom-cikle/ (дата обращения: 22.12.2018)

клы солнечной активности (примерно 1720–1820, 1820–1910, 1910–2010 гг.). Этот последний минимум совпадает со спадом температуры в 2008–2009 гг. (рис. 1g). Хорошо прослеживается рост солнечной активности от цикла к циклу, что вполне соответствует разогреву атмосферы и современному потеплению после малого ледникового периода. Современное потепление является естественным выходом из малого ледникового периода XVI–XIX вв.

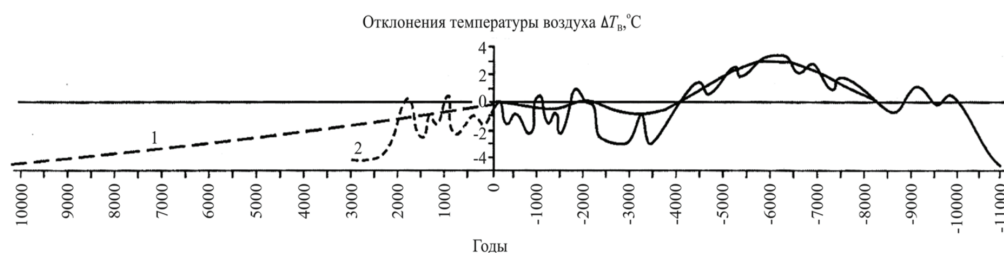
Особенностью короткопериодных колебаний является их малая амплитуда. Для северных районов (рис. 1g) периоды потепления не выходят за рамки отрицательных температур.

Весь приведённый материал говорит о том, что колебательный характер – это естественное свойство развития климата, поэтому он сохранится и в будущем. Сохранится и всё разнообразие климатических циклов. Можно сделать некоторые прогнозные предположения.

Глобальный климат Земли сейчас развивается в рамках упомянутого выше 41-тыс. летнего цикла и находится примерно в его середине. Последнее

похолодание было 18–20 тыс. л. н., следовательно, примерно через 40 тыс. л. после этого (примерно через 20 тыс. л. от сегодняшнего дня) должен наступить новый ледниковый период. Пик потепления цикла уже прошёл. Это – голоценовый оптимум. Так что современный климат развивается по нисходящей ветви (рис. 5). Все колебания климата более коротких периодов будут проходить на фоне снижающихся температур.

Что касается выявления тренда современных короткопериодных колебаний климата, то дело обстоит сложнее. Как видно из рис. 1g, колебания температуры воздуха в XX в. указывают тоже на снижение температуры. Начавшийся спад температуры после пика 1998–1999 гг. отмечается многими исследователями [9; 28]: за 6 лет (с 2004 по 2009 гг.) отрицательные тренды температуры охватили более половины территории северного полушария Земли. Однако данные метеостанций вплоть до 2021 г. показали новое повышение температуры воздуха после 2009 г. (рис. 6). Если вернуться к рис. 4, то видно, что в 2008–2009 гг. за-



- 1 – предполагаемая нисходящая ветвь колебаний температуры 41 тыс. летнего цикла;
- 2 – предполагаемые короткопериодные колебания температуры (как продолжение колебаний в исторический период)

Рис. 5 / Fig. 5. Отклонения температуры воздуха ($\Delta T_{\text{в}}$) от современных значений за последние 10 000 лет и прогноз ее дальнейшего хода / Deviations of air temperature (ΔT_{air}) from the current values for the last 10,000 years and a forecast of its further course

Источник: [30]

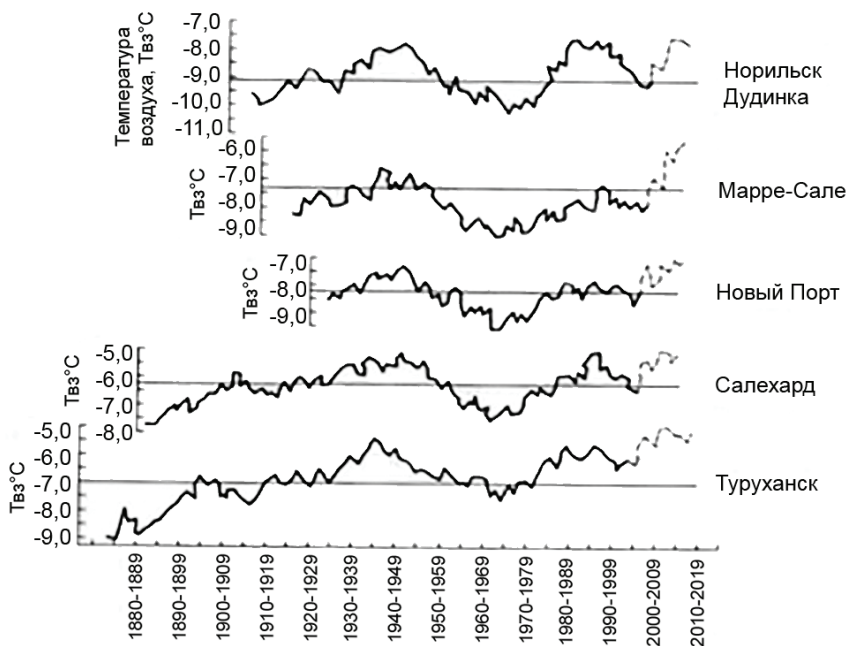


Рис. 6 / Fig. 6. Короткопериодные колебания температуры воздуха в XX–XXI вв. Западная Сибирь (продолжение рис. 1g с 2009 до 2021 г. – пунктирные линии) / Short-term fluctuations in air temperature in the 20–21 century. Western Siberia (continuation of fig 1g from 2009 to 2021 – dashed lines)

Источник: составлено Н. А. Шполянской

кончился очередной вековой цикл солнечной активности. Следовательно, начавшееся повышение температуры воздуха – это начало нового солнечного векового цикла. Подъём температуры воздуха после 2008 г. аналогичен такому в 1900–1910 гг.

Надо сказать, что вековые колебания температуры воздуха, связанные с вековыми солнечными циклами, относятся к наиболее устойчивым циклам и чётко прослеживаются инструментальными наблюдениями, начиная с XVII в. (рис. 7).

Отмеченные вековые циклы колебания температуры (рис. 1 e, 1 f, 7) находятся на восходящей оси более длинного цикла потепления (примерно, 300-летнего), начавшегося в конце

малого ледникового периода. Можно предвидеть в ближайшем будущем короткий цикл потепления с ростом температуры воздуха. Но он должен быть небольшим, как и из-за того, что он находится на нисходящей оси 41 тыс. летнего цикла, так и из-за ожидаемого окончания 300-летнего цикла колебаний температуры. Заметного влияния на развитие криолитозоны, инертной в тепловом отношении системы, он, скорее всего, не окажет.

Формирование температуры грунтов как основы ландшафтной системы

Формирование температуры грунтов происходит путём проникновения в них температурных колебаний возду-

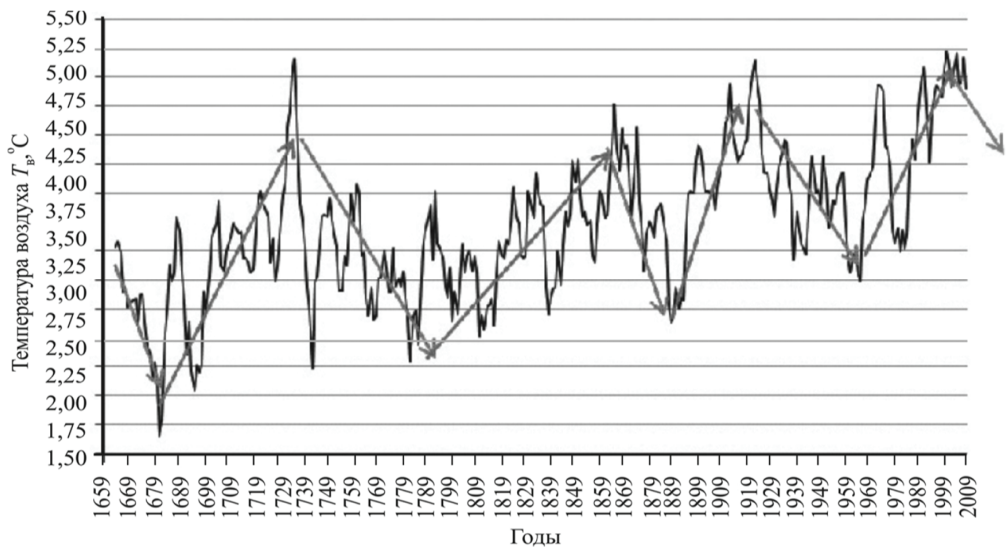


Рис. 7 / Fig. 7. Температура в центральной Англии зимой (°C). Скользящие по 7-летиям сглаженные значения и условные фазы роста и падения температуры / Temperature in central England in winter (°C). Smoothed values sliding over 7 years and conditional phases of temperature rise and fall

Источник: [28]

ха. Такое проникновение происходит по определённым физическим законам (законам Фурье), согласно которым колебания температуры воздуха проникают на некоторую глубину и затухают. При

этом амплитуда колебания с глубиной постепенно уменьшается. Поэтому чем больше длина периода и амплитуда колебания, тем на большую глубину проникает температура воздуха (табл. 1–2).

Таблица 1 / Table 1

Зависимость глубины (Z) проникновения короткопериодных колебаний температуры от длины периода (τ) и амплитуды A_0 / Dependence of the depth (Z) of penetration of short-period temperature fluctuations on the length of the period (τ) and amplitude A_0

Период колебаний, τ лет	3	5	6	10	12	25	35
A_0 , °C	2 3	2 3	2 3	2 3	2 3	2 3	2 3
Z, м	10 11	13 14	14 16	18 21	20 22	29 31	34 37

Источник: [30]

Таблица 2 / Table 2

Зависимость глубины (Z) проникновения средне- и длиннопериодных колебаний температуры от длины периода (τ) и амплитуды A_0 / Dependence of the depth (Z) of penetration of medium- and long-period temperature fluctuations on the length of the period (τ) and amplitude A_0

Период колебаний, τ , лет	100	500	1000	2000	3000	5000
A_0 , °C	5 8	2 5 8	2 5 8	2 8	2 5 8	2 5 8
Z, м	74 83	127 165 185	180 234 263	331 371	311 405 455	400 523 586

Источник: [30]

Видно, что короткопериодные колебания (а это и есть колебания XX–XXI вв.) затронут лишь самую верхнюю часть мёрзлой толщи. Это, с одной стороны, сохраняет благоприятные условия для существования самой толщи мёрзлых пород и снимает все «страшилки» из-за таяния мерзлоты, с другой стороны, указывает на нестабильность в слое, с которым связана основная хозяйственная деятельность людей.

Влияние современных короткопериодных колебаний климата на тепловой режим грунтов в ландшафтной системе

Тепловой режим верхнего слоя грунтов определяет тип ландшафта, поэтому изменение климата нарушает ландшафтную структуру, а вместе с ней и характер теплообмена между грунтом и атмосферой. Меняется температура грунтов, глубина их оттаивания и промерзания, их свойства и характер криогенных процессов. Оценка современного изменения температуры грунтов и тенденций будущего изменения – важная задача.

Имеющиеся материалы показывают, что нет прямой связи между потеплением климата и повышением темпера-

туры грунтов. Ландшафт как посредник в теплообмене между грунтами и атмосферой может изменить влияние климата на прямо противоположное. В этом отношении различается влияние ландшафтов Крайнего Севера с мало-развитой растительностью и ландшафтов южных районов криолитозоны с хорошо развитой растительностью.

Ландшафты Крайнего Севера. Режимные наблюдения на Русском Севере в течение многих лет проводились А. В. Павловым и ныне продолжаются Г. В. Малковой из Института криосферы Земли СО РАН. На Европейском Севере и на севере Западной Сибири ими проводились измерения температуры воздуха и температуры грунтов на глубине 3 м и 10 м. Наблюдения показали, что хорошо прослеживается затухание колебаний температуры с глубиной (рис. 8)

Выявилась неодинаковая в разных районах и разных ландшафтах реакция температуры грунтов на изменение температуры воздуха. На стационаре мыс Болванский (устье р. Печоры) при среднегодовой температуре воздуха $-4,7^\circ\text{C}$ и сплошной вечной мерзлоте за период 1984–2001 гг. температурный ход в грунтах на глубине 10 м практи-

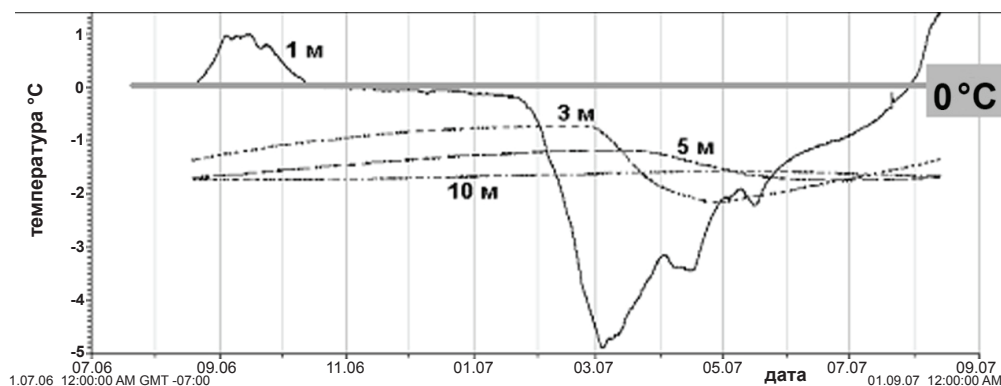


Рис. 8 / Fig. 8. Изменение температурного режима пород с глубиной. Мыс Болванский / Change in the temperature regime of rocks with depth. Cape Bolvansky

Источник: составлено Малковой Г. В.

чески не отвечал температурному ходу в атмосфере (рис. 9) [12].

Последующие наблюдения [24] объяснили этот феномен и показали, что примерно до 1998–2000 гг. температура воздуха сама практически не менялась, колеблясь около -5°C , имевшиеся же небольшие колебания затухали к глубине 9–10 м. Только после 1999 г. началось заметное повышение темпе-

ратуры воздуха (рис. 10). Оно уже отразилось на температуре грунтов [33].

В табл. 3 показано изменение температуры грунтов на глубине 10 м в разных ландшафтах на участке Болванский. Ландшафты на повышенных элементах рельефа, близкие к оголённым поверхностям, представленные обычно пятнистой лишайниковой тундрой имеют более низкую темпера-

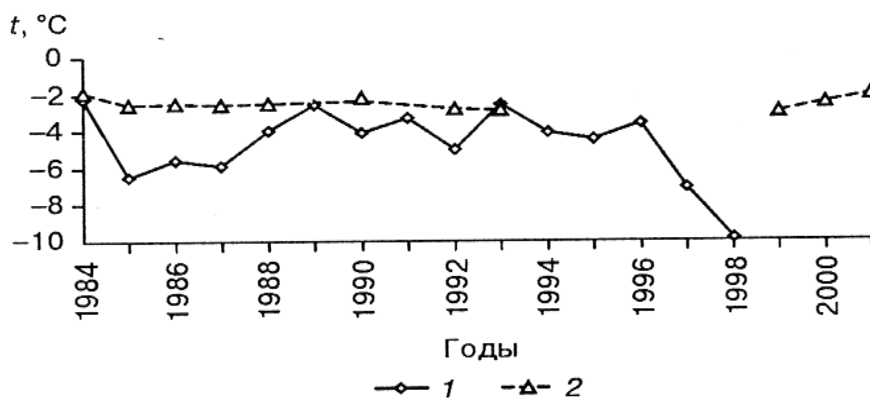


Рис. 9 / Fig. 9. Ход температуры воздуха (1) на метеостанции Болванский мыс и температуры грунтов на глубине 10 м в скважине 59 (2) / Variation in air temperature (1) at the Bolvansky Cape meteorological station and soil temperatures at a depth of 10 m in borehole 59 (2)

Источник: [12]

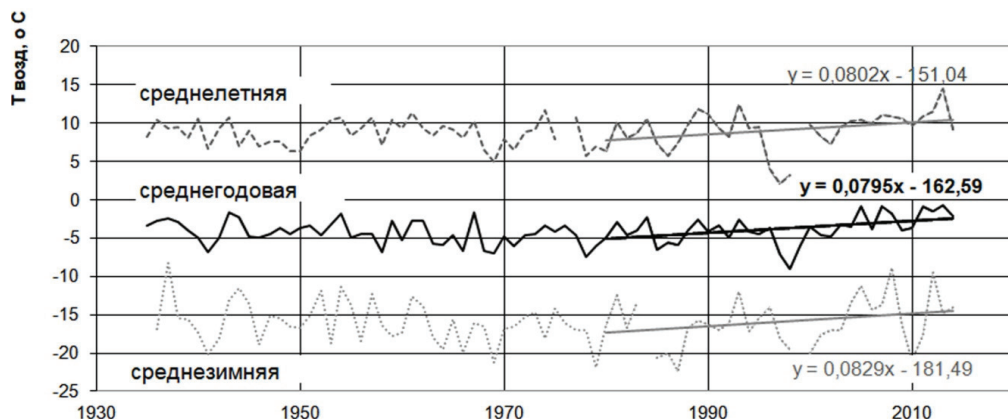


Рис. 10 / Fig. 10. Многолетние изменения температуры воздуха, мыс Болванский / Long-term changes in air temperature, Cape Bolvansky

Источник: [24]

Таблица 3 / Table 3

Осреднённая за десятилетия среднегодовая температура ММП в скважинах (на глубине 10 м) / Average annual permafrost temperature averaged over decades in boreholes (at a depth of 10 m)

Болванский, № скв.	Ландшафтное описание	Средняя за десятилетие температура ММП, °С			
		1981–1990	1991–2000	2001–2010	2011–2020
Скв. 54	Склон увала, пятнистая кустарничково-лишайниковая тундра	-2,1	-2,3	-2,0	-1,4
Скв. 55	Межхолмовая седловина, полигональный торфяник	-1,7	-1,8	-1,4	-1,0
Скв. 56	Останец на бровке хасырея, дренированная кустарничково-мохово-лишайниковая тундра	-0,9	-1,0	-0,6	-0,6
Скв. 59	Вершина увала, пятнисто-медальонная тундра	-2,3	-2,4	-1,8	-1,3
Скв. 65	Склон холма, кустарничково-мохово-лишайниковая тундра	-1,6	-1,5	-1,3	-0,9
Скв. 83	Вершина увала, дренированная кустарничково-мохово-лишайниковая тундра	-2,3	-2,4	-2,1	-1,4

Источник: составлено Г. В. Малковой

туру и на глубине 10 м. Так, при среднегодовой температуре воздуха -5°C температура на глубине 10 м от $-2,0$ до $-2,4^{\circ}\text{C}$. На пониженных участках с более развитой растительностью – кустарниково-мохово-лишайниковой тундрой или на торфяниках, температура на глубине 10 м заметно более высокая – от $-0,9$ до $-1,6^{\circ}\text{C}$ или от $-0,6$ до $-1,0^{\circ}\text{C}$. При этом в низкотемпературных ландшафтах даже на глубине 10 м прослеживается повышение температуры на $0,6^{\circ}\text{C}$ вслед за температурой воздуха, а на высокотемпературных – всего на $0,2\text{--}0,4^{\circ}\text{C}$ [5; 24].

Там же многолетний мониторинг показывает, что в южной тундре в зоне сплошного распространения ММП вслед за увеличением глубины протавивания и повышения среднегодовой температуры ММП на водоразделах начали формироваться несквозные талики мощностью от 2 до 5–6 м и мёрзлые толщи несливающегося типа [24]. Тем не менее надо отметить, что некоторые особенности рельефа – широко распространенный в тундровых районах Европейского Севера блочный мезорельеф – формирует ландшафты, нарушающие отмеченную закономерность: на контакте с межблочными понижениями формируются температуры, близкие к 0°C , и эти участки оказываются достаточно стабильными по отношению к меняющемуся климату [16].

По мере продвижения к востоку и приближения к г. Воркуте с более низкой температурой воздуха ($-6,5^{\circ}\text{C}$) реакция грунтов на потепление становится более заметной. За 1950–1996 гг. на стационарах в районе г. Воркуты температура грунтов повысилась на $1,5^{\circ}\text{C}$ на глубине 3 м и на $0,5^{\circ}\text{C}$ – на глубине 10 м [22].

На севере Западной Сибири наблюдается та же закономерность: в низкотемпературных ландшафтах изменение температуры грунта вслед за повышением температуры воздуха более заметно, чем в «тёплых» ландшафтах [12], на стационаре Марре-Сале [21] при среднегодовой температуре воздуха -8°C и сплошной вечной мерзлоте температура грунтов более заметно реагирует на изменение температуры воздуха. За 1978–2000 гг. в первый период (1978–1995), когда температура воздуха повышалась, температура грунтов на глубине 10 м повысилась в среднем на $0,9^{\circ}\text{C}$ (при возрастании температуры воздуха на $3,2^{\circ}\text{C}$). При этом в пределах ландшафтов с низкой температурой, от -5 до -7°C , её среднее повышение составило $2,2^{\circ}\text{C}$ на глубине 3 м, и $1,3^{\circ}\text{C}$ – на глубине 10 м. В пределах же ландшафтов с более высокой температурой, $-3\text{--}4^{\circ}\text{C}$, её повышение составило всего $0,7^{\circ}\text{C}$ на глубине 10 м. В последующий период (1996–2000) вслед за понижением температуры воздуха температура грунта на глубине 10 м снизилась на $0,6^{\circ}\text{C}$. В XXI в. во всех ландшафтах наблюдается постепенное повышение среднегодовой температуры грунтов вслед за потеплением климата (рис. 11) [33].

На Уренгойском месторождении при температуре воздуха -9°C и сплошной мерзлоте повышение температуры грунтов на глубине 10 м за период 1975–1999 гг. было примерно 1°C . А на Надымском стационаре при среднегодовой температуре воздуха $-5,9^{\circ}\text{C}$ и островной мерзлоте температура грунтов на глубине 10 м за период 1972–2001 гг. повысилась всего на $0,2\text{--}0,8^{\circ}\text{C}$, а на бугристых торфяниках – на $0,4^{\circ}\text{C}$ [22; 33].

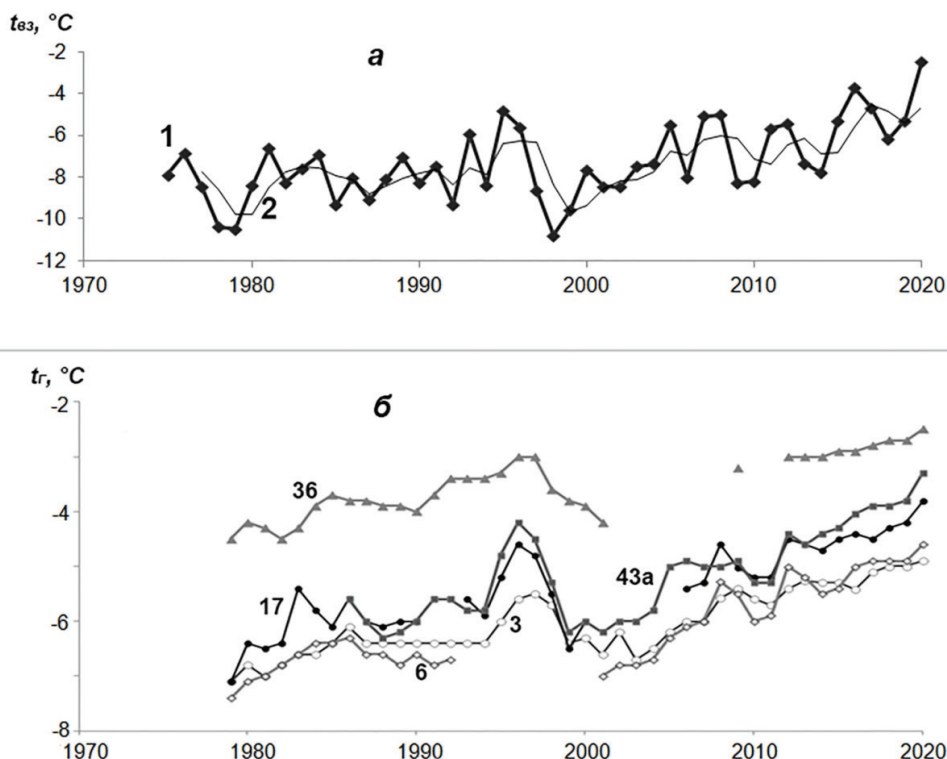


Рис. 11 / Fig. 11. Изменение среднегодовых (1) и средних трехлетних скользящих (2) значений температуры воздуха $t_{вз}$ (а) и температуры мерзлых грунтов t_r на глубине 10 м (б) на стационаре Марре-Сале. 3, 6, 17, 36, 43а – номера экспериментальных площадок [21] с дополнениями Г. В. Малковой / Changes in the average annual (1) and average three-year sliding (2) values of air temperature t_{air} (a) and temperature of frozen soils t_s at a depth of 10 m (b) at the Marre-Sale station. 3, 6, 17, 36, 43a – are numbers of experimental sites [21] with additions by Malkova G. V.

Источник: [21] с дополнениями Г. В. Малковой

Из всего приведённого материала А. В. Павлов делает вывод, и это подтверждается последующими наблюдениями, что в северных районах температура верхних горизонтов грунтов всегда следовала за малейшими изменениями температуры воздуха, повышаясь и понижаясь вместе с ней. При этом реакция на изменение климата более заметна в грунтах с низкой температурой и менее заметна в грунтах с высокой температурой [22].

Многолетние режимные наблюдения за сезонным промерзанием-оттаиванием грунтов показывают ту же закономерность, что и с температурой грунта – тесная связь с типом ландшафта. Исследователи отмечают, что мощность сезонного слоя (СТС) практически не реагирует на современное потепление климата [22; 23]. Но в последние 2 десятилетия изменение мощности этого слоя стало проявляться более отчётливо.

Наблюдения на площадках мониторинга на Европейском Севере, стационарах Болванский (CALM R24) и Кашин (CALM R24A) свидетельствуют об увеличении мощности слоя сезонного протаивания пород (рис. 12). При выраженном потеплении климата в различных природных зонах Севера и даже в пределах локальных участков проявляются различные тенденции современных изменений мощности СТС. Среднемноголетний тренд увеличения глубины протаивания на площадке Болванский (рис. 12-R24) составляет 0,3 см/год. Т. е. динамика СТС не обнаруживает заметного тренда, средняя мощность СТС в пределах наблюдательной площадки испытывает лишь ежегодные колебания в пределах 10–25 см. На о. Кашин, расположенном в дельте р. Печора, ряд наблюдений короче, но здесь отмечается более высокий тренд протаивания (3,7 см/год) за счёт азональных ландшафтных условий в дельте р. Печора [5].

В литологическом отношении эти 2 площадки тоже различны. На площадке Болванский повсеместно с поверхности залегает супесь и суглинок, на локальных участках перекрытый торфом мощностью не более 10 см. Площадка Кашин сложена песком, но на половине её площади песок перекрыт торфом мощностью до 30 см и более. В 2020 г. на этих площадках CALM зафиксирован аномальный прирост глубины протаивания по сравнению с предыдущими годами. Этому способствовали тёплое лето 2020 г. и многоснежная зима 2019/2020 гг.

Проявление связи между изменением глубины сезонного промерзания (СМС – при отсутствии вечной мерзлоты) и потеплением климата для «холодных» ландшафтов на северо-востоке Европейской России отмечает и Н. Оберман [32]. Он выявил уменьшение глубины промерзания на 0,5 м за время последнего 25-летнего потепления.

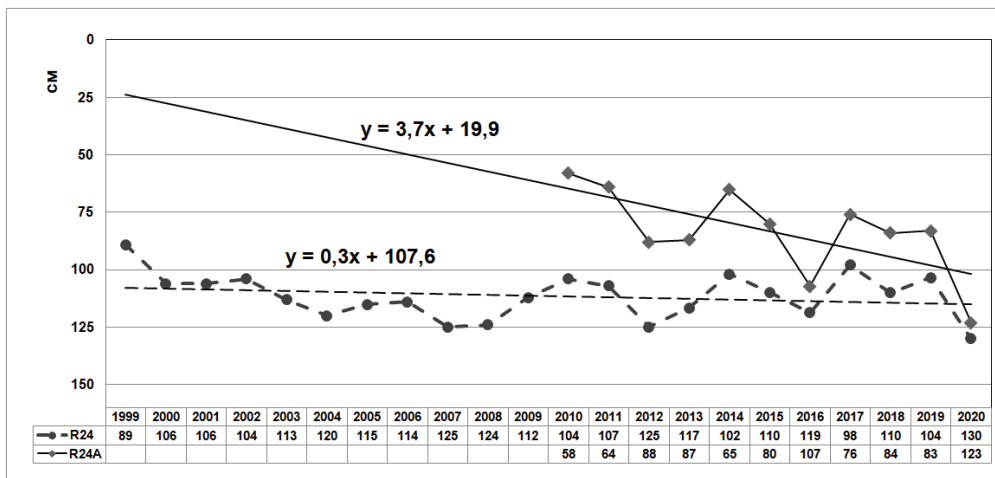


Рис. 12 / Fig. 12. Многолетние изменения мощности СТС на площадках CALM / Long-term changes in the STS thickness at the CALM sites

Источник: составлено Г. В. Малковой

Ландшафты южной области криолитозоны. В южных районах Европейского Севера России связь теплового режима ландшафтов с климатом более сложная и не всегда прямая. При общем потеплении климата имеются многочисленные факты нарастания мерзлоты либо её стабильного состояния. В связи с этим утверждение о том, что деградация мёрзлых пород начнётся с юга криолитозоны справедливо лишь отчасти.

В южных районах криолитозоны следует различать ландшафты на органических и на минеральных грунтах.

Южная мерзлота (массивно-островного и островного распространения) развита преимущественно в торфяниках (плоско- и выпуклобугристых), как правило, высокольдистых, что делает эти ландшафты инертными и относительно устойчивыми (на фазовые превращения лёд–вода затрачивается много тепла, и это резко замедляет процесс нагревания–охлаждения грунта). В них, несмотря на общее потепление климата, происходит увеличение площади мерзлоты, во-первых, за счёт её новообразования на талых участках выпуклобугристых торфяников, а во-вторых, за счёт постепенного осушения части осоково-моховых и топяных болот и перехода их в выпуклобугристые торфяники [15; 16; 17; 19; 26].

Этот процесс вполне объясним. Именно с потеплением связан интенсивный «прирост» торфяного горизонта и осушение болот. Охлаждающая же роль торфа известна: сухой торф изолирует грунты от тёплой атмосферы, влажный торф охлаждает грунты за счёт больших потерь тепла на испарение, мёрзлый торф охлаждает грунты за счёт высокой теплопроводности. В резуль-

тате по мере нарастания торфа уменьшается глубина сезонного оттаивания грунтов и возникают перелетки (не оттаявшая нижняя часть предыдущего промёрзшего слоя), переходящие со временем в вечную мерзлоту.

Важным показателем «обратной» реакции вечной мерзлоты в южных районах криолитозоны является движение южной границы криолитозоны во времени. На Европейском Севере, как и в Западной Сибири, граница криолитозоны обусловлена южной границей распространения выпукло-бугристых торфяников. Современное потепление, начавшееся в конце XIX – начале XX вв. как выход из малого ледникового периода должно было бы привести к перемещению этой границы на север, но этого не произошло. Ландшафты с мёрзлыми органическими грунтами и некоторые участки с мерзлотой в минеральных грунтах продвинулись к югу.

Так, в пределах болотных экосистем на территории Большого Усинского болота (ныне – комплексный Усинский заказник), расположенного на левобережье р. Печора в районе впадения в неё р. Усы, в 1928 г. крупнобугристых болот не было обнаружено [27]. А при проведении геодезических съёмок в середине XX в. в пределах болота уже зафиксированы и закартографированы участки с выпуклобугристыми формами, сложенными вечномерзлыми грунтами [1]. Описан и сфотографирован крупный массив выпуклобугристых растущих торфяников, возникший на месте травяно-осокового болота. На обновлённых современных топографических картах площади с крупнобугристыми формами увеличились. Одновременно зафиксировано формирование массивов выпуклобугристых

торфяников на месте топяных болот восточной части Большеземельской тундры на южной границе криолитозоны, южнее г. Инта [19].

Все это является свидетельством продвижения южной границы криолитозоны к югу. Современные новообразования вечной мерзлоты в торфах фиксируются очень широко в районах от прерывистого до островного её распространения. Вне зависимости от климатической фазы формируется мощность СТС, характерная в целом для торфяных грунтов региона: 0,4–0,7 м – на задернованных участках, до 0,8 м – на незадернованных. Кроме того, в северной лесотундре сохраняются редкие блоки ультрамаломощной мерзлоты в пределах плоских кочковатых болот с травяно-моховой и кустарничково-травяно-моховой растительностью со стабильными значениями мощности СТС (0,5–0,8 м) [16; 18].

Что касается «южной» мерзлоты в минеральных грунтах, то её современного новообразования не зафиксировано, зато отмечены многочисленные случаи её стабильного состояния, несмотря на общее потепление климата. Так, в пределах всей лесотундры на плоско-волнистых междуречьях с ерничково-ивняково-моховыми ассоциациями и единичными деревьями на оторфованных участках с сухими напочвенными покровами существует ультрамаломощная мерзлота. В верхней части разреза грунта оторфованы (в среднем 5–10 см торфа), а наземный покров представлен сухими листостебельными мхами (в основном плеуроциум и политрихум) в комбинации с лишайниками, которые, как и вышеописанный торф, обладают охлаждающим свойством. Этот двойной

изолирующий эффект обеспечивает стабильность мерзлоты, поддерживая мощность сезонноталого слоя в пределах многолетних значений для района 0,4–0,7 м [14; 18].

Обращает на себя внимание стабильность ультрамаломощной мерзлоты (1,5–4,0 м). В начале 70-х гг. XX в., когда началось активное изучение вечной мерзлоты в центральной части Большеземельской тундры, мерзлота мощностью 1,5 м воспринималась как сезонномёрзлый слой СМС. Однако неоднократные мерзлотные исследования нередко на одном и том же участке (например, инженерно-геологическое бурение на Харьгагинских месторождениях с массивно-островным и прерывистым распространением вечной мерзлоты в середине 70-х и 90-х гг. XX в. и в 2015 г.) установили, что это – слой вечной мерзлоты со стабильной подошвой и кровлей. СТС составляет 0,4–0,7 м [13; 16].

Надо отметить неглубокое, но длительное, многолетнее промерзание на осушающихся, деградирующих хасырях (котловинах спущенных озёр) с ерничково-багульничково-лишайниковой растительностью на буграх и осоково-разнотравной на днищах. Новообразование мерзлоты происходит даже на переувлажнённых участках – в хасырях и термокарстовых понижениях [13].

Наблюдается частичное сохранение вечной мерзлоты и в лесных массивах лесотундровой зоны в пределах массивно-островного и прерывистого распространения мерзлоты (преимущественно в березово-еловых и елово-березовых лесах с кустарничково-моховыми и мохово-лишайниковыми ассоциациями). Это непотаявшие до

конца со времени малого ледникового периода и сохранившиеся в виде несливающейся мерзлоты участки на склонах рек и крупных ручьёв (кровля на глубине 4–6 м, подошва – 8–10 м), а также вытянутые в плане поперек склона мёрзлые участки со сливающейся мерзлотой в привершинных частях водоразделов и прибровочных частях долин рек. Они устойчивы во времени (обнаружены в 1979 г. и существуют поныне), температура близка к 0 °С, грунт по всему разрезу представлен преимущественно суглинком. Мощность СТС колеблется в пределах 0,75–0,85 м, хотя в 2015 г. на Северо-Возейском месторождении увеличилась до 1 м. Чаще всего это участки с сухими мохово-лишайниковыми покровами толщиной 0,1–0,2 м (мхи плетучиевые), реже – с особо мощными моховыми подушками (0,4–0,5 м сфагнового мха с очёсом). Это ещё одно свидетельство отсутствия прямой связи «потепление климата – деградация мерзлоты» [25].

Всё это указывает на важную стабилизирующую роль мхов в сохранении вечной мерзлоты в минеральных грунтах южной криолитозоны, несмотря на потепление климата. Среди наземных покровов в Большеземельской тундре доминируют мхи, распространённые практически повсеместно, и их толщина варьируется от 5–15 см на севере, где их теплоизолирующая роль невелика, до 15–40 см и более на юге, где их влияние на теплообмен в ландшафтах становится преобладающим. В связи с этим в южных районах криолитозоны не прослеживается закономерного уменьшения глубины сезонного слоя в направлении с юга на север. В южной лесотундре на участках, сло-

женных с поверхности минеральными заторфованными грунтами, она может быть меньше (до 0,5 м), чем в тундре (1,0–1,2 м и более) [13].

Заключение

1. Развитие глобального климата Земли направлено в сторону похолодания, в сторону очередного ледникового периода. При этом в ближайшем будущем, по-видимому, продолжится потепление климата как продолжающийся выход из малого ледникового периода.

2. Реакция криолитозоны (производной климата) на потепление неодинакова в разных районах, поскольку теплообмен горных пород с атмосферой осуществляется при участии мощного теплового посредника – наземных покровов, формирующих специфические типы ландшафтов.

3. В северных районах криолитозоны при низких температурах грунтов, сплошном распространении вечной мерзлоты и неразвитом растительном покрове температура грунтов в верхних 9–10 м и глубина сезонного протаивания-промерзания в основном следуют за температурой воздуха, повышаясь или понижаясь вместе с ней. В ряде случаев современное потепление вызывает образование несквозных таликов.

4. В южных районах криолитозоны при высоких отрицательных температурах грунтов, несплошном распространении вечной мерзлоты и хорошо развитом растительном покрове тепловое влияние ландшафта может оказаться главенствующим. Активное нарастание торфа и мохового покрова из-за потепления климата усиливает их охлаждающую роль в теплообмене

грунтов с атмосферой и это обуславливает охлаждение грунтов: уменьшение глубины сезонного промерзания-протаивания, понижение температуры

грунта и в ряде случаев новообразования вечной мерзлоты.

Статья поступила в редакцию 29.12.2021

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеева Р. Н., Оксанен П. О. Растительность и стратиграфия Усинского болота (Республика Коми) // Ботанический журнал. 2005. Т. 90. № 4. С. 536–543.
2. Архангелов А. А., Конищев В. Н., Розенбаум Г. Э. Приморско-Новосибирский район // Региональная криолитология. М.: Издательство МГУ, 1989. С. 128–151.
3. Большаков В. А. Новая концепция орбитальной теории палеоклимата. М.: Издательство Московского университета, 2003. 256 с.
4. Борзенкова И. И. Изменение климата в кайнозой. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 247 с.
5. Геокриологические последствия современных климатических изменений – результаты комплексного мониторинга на геокриологических стационарах в Ненецком автономном округе / Г. В. Малкова, Ю. В. Коростелев, А. Г. Скворцов, М. С. Судакова, А. М. Царев // Материалы всероссийской научно-техн. конференции «Комплексное изучение и освоение недр Европейского Севера России» / под ред. Р. В. Агиней. Ухта : УГТУ, 2021. С. 167–173.
6. Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Мониторинг климата и оценка климатической изменчивости по данным наблюдений // Глобальные изменения климата и их последствия для России / под ред. Г. С. Голицына, Ю. А. Израэля. М., 2002. С. 9–39.
7. Зубаков В. А., Борзенкова И. И. Палеоклиматы позднего кайнозоя. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 215 с.
8. Конищев В. Н. Криосфера в истории Земли // Вестник Московского университета. Серия: География. 2005. № 1. С. 65–74.
9. Кононова Н. К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому. М.: Воентехиздат, 2009. 235 с.
10. Лаврушин Ю. А., Алексеев М. Н. Арктические районы // Изменение климата и ландшафтов за последние 65 миллионов лет / ред. А. А. Величко. М.: ГЕОС, 1999. С. 21–42.
11. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.; Л.: ГОНТИ, 1939. 207 с.
12. Мониторинг сезонноталого слоя и температуры мерзлого грунта на севере России / А. В. Павлов, Г. В. Ананьева, Д. С. Дроздов, Н. Г. Москаленко и др. // Криосфера Земли. 2002. № 4. Т. VI. С. 30–39.
13. Осадчая Г. Г. Стабилизирующие реакции мерзлотных ландшафтов на изменение климатических условий // Криосфера Земли. 2003. Т. VII. № 4. С. 21–27.
14. Осадчая Г. Г. Особые случаи формирования многолетнемерзлых пород в Большеземельской тундре // Материалы Международной конференции «Приоритетные направления в изучении криосферы Земли» (25–28 мая 2005 г.). Пущино, 2005. С. 40–41.
15. Осадчая Г. Г. Торфяники криолитозоны европейского северо-востока: зональные особенности развития // Материалы Международной научно-практической конференции «Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике» / под ред. В. П. Мельникова и М. Р. Садуртдинова. Салехард, 8–12 ноября 2021 г. Салехард, 2021. С. 327–330.
16. Осадчая Г. Г., Тумель Н. В. Локальные ландшафты как индикаторы геокриологической зональности (на примере Европейского Северо-Востока) // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 3. С. 62–71.

17. Осадчая Г. Г., Тумель Н. В., Королева А. М. Криогенные процессы на органогенных грунтах как индикатор инженерно-геологических ограничений к природопользованию (на примере Большеземельской тундры) // Проблемы региональной экологии. 2015. № 2. С. 89–94.
18. Осадчая Г. Г., Шполянская Н. А. Географические особенности изменчивости геокриологических характеристик Большеземельской тундры // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 2-1 (104). Ч. 1. С. 124–131.
19. Осадчий В. В., Осадчая Г. Г. Современная мерзлота южной криолитозоны Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции // Материалы международной конференции «Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения». Тюмень, 21–24 апреля 2008 г. Тюмень, 2008. С. 258–261.
20. О характере и причинах изменений климата Земли / З. М. Гудкович, В. П. Карклин, В. М. Смоляницкий, И. Е. Фролов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 1 (81). С. 15–23.
21. Павлов А. В. Теплоперенос в природных комплексах севера России // Криосфера Земли. 2000. Т. 4. № 4. С. 22–31.
22. Павлов А. В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: ГЕО, 2008. 230 с.
23. Павлов А. В., Скачков Ю. Б., Какунов Н. Б. Взаимосвязь между многолетними изменениями глубины сезонного протаивания грунтов и метеорологическими факторами // Криосфера Земли. 2004. № 4. Т. VIII. С. 3–11.
24. Температурный режим верхних горизонтов пород в нарушенных и ненарушенных криогенных ландшафтах европейского севера / Г. В. Малкова, М. Р. Садуртдинов, А. Г. Скворцов, А. М. Царев // Материалы V конференции геокриологов России. Ч. 6: Динамическая геокриология. Москва, 14–17 июня 2016 г. Сумы: Университетская книга, 2016. С. 63–69.
25. Тумель Н. В., Осадчая Г. Г. Значение криогенных процессов при оценке климатических изменений в Большеземельской тундре // Материалы международной конференции «Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз её изменения». Т. 1. Тюмень, 29–31 мая 2006 г. Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2006. С. 298–300.
26. Тумель Н. В., Осадчая Г. Г. Возможности промышленного природопользования в пределах болотных ландшафтов и торфяников криолитозоны Большеземельской тундры // Труды X международной конференции по мерзлотоведению «Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире». Т. 3. Салехард, 25–29 июня 2012 г. Салехард: Печатник, 2012. С. 381–384.
27. Цинзерлинг Ю. Д. Очерк растительности болот по среднему течению р. Печоры // Известия главного ботанического сада. 1929. Т. 28. Вып. 1–2. С. 95–126.
28. Шерстюков Б. Г., Салугашвили Р. С. Новые тенденции в изменениях климата Северного полушария Земли в последнее десятилетие // Труды Всероссийского научно-иссл. института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных. 2010. Вып. 175. С. 43–51.
29. Шполянская Н. А. Вечная мерзлота и глобальные изменения климата. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2010. 198 с.
30. Шполянская Н. А. Климат и его динамика в плейстоцене-голоцене как основа для возникновения разнообразных рисков при освоении районов криолитозоны // Геориск. 2019. Т. XIII. № 1. С. 5–24.
31. Frakes L. A. Climates throughout geologic time. Amsterdam; New York: Elsevier, 1979. 310 p.

32. Oberman N. G., Mazhitova G. G. Permafrost dynamic in the north-east of European Russia at the end of the 20th century // *Norsk geografisk tidsskrift*. 2001. Vol. 55. P. 241–244.
33. Spatial and Temporal Variability of Permafrost in the Western Part of the Russian Arctic / G. Malkova, D. Drozdov, A. Vasilie, A. Gravis, G. Kraev, Y. Korostelev, K. Nikitin, P. Orekhov, O. Ponomareva, V. Romanovsky, M. Sadurtdinov, A. Shein, A. Skvortsov, M. Sudakova, A. Tsarev // *Energies*. 2022. № 15 (7). DOI: 10.3390/en15072311

REFERENCES

1. Alekseeva R. N., Oksanen P. O. [Vegetation and stratigraphy of the Usinsky swamp (Komi Republic)]. In: *Botanicheskii zhurnal* [Botanical Journal], 2005, vol. 90, no. 4, pp. 536–543.
2. Arkhangelov A. A., Konishchev V. N., Rozenbaum G. E. [Primorsko-Novosibirsk region]. In: *Regionalnaya kriolitologiya* [Regional cryolithology]. Moscow, Izdatelstvo MGU Publ., 1989, pp. 128–151.
3. Bolshakov V. A. *Novaya kontseptsiya orbital'noi teorii paleoklimata* [A new concept of the orbital theory of paleoclimate]. Moscow, Izdatelstvo Moskovskogo universiteta Publ., 2003. 256 p.
4. Borzenkova I. I. *Izmenenie klimata v kainozoe* [Climate change in the Cenozoic]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1992. 247 p.
5. Malkova G. V., Korostelev Yu. V., Skvortsov A. G., Sudakova M. S., Tsarev A. M. [Geocryological consequences of modern climatic changes – results of complex monitoring at geocryological hospitals in the Nenets Autonomous Okrug]. In: Aginey R. V., ed. *Materialy vserossiiskoi nauchno-tekhn. konferentsii «Kompleksnoe izuchenie i osvoenie nedr Evropeiskogo Severa Rossii»* [Materials of the All-Russian Scientific and Technical conference «Complex study and development of the subsoil of the European North of Russia»]. Ukhta, UGTU Publ., 2021, pp. 167–173.
6. Gruza G. V., Rankova E. Ya. [Climate monitoring and assessment of climate variability from observational data]. In: Golitsyna G. S., Izraeliya Yu. A., eds. *Globalnye izmeneniya klimata i ikh posledstviya dlya Rossii* [Global climate changes and their consequences for Russia]. Moscow, 2002, pp. 9–39.
7. Zubakov V. A., Borzenkova I. I. *Paleoklimaty pozdnego kainozoya* [Paleoclimates of the Late Cenozoic]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1983. 215 p.
8. Konishchev V. N. [The cryosphere in the history of the Earth]. In: *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya: Geografiya* [Moscow University bulletin. Series 5, Geography], 2005, no. 1, pp. 65–74.
9. Kononova N. K. *Klassifikatsiya tsirkulyatsionnykh mekhanizmov Severnogo polushariya po B. L. Dzerdzeevskomu* [Classification of the circulation mechanisms of the Northern Hemisphere according to B. L. Dzerdzeevsky]. Moscow, Voentekhnizdat Publ., 2009. 235 p.
10. Lavrushin Yu. A., Alekseev M. N. [Arctic regions]. In: Velichko A. A., ed. *Izmenenie klimata i landshaftov za poslednie 65 millionov let* [Changes in climate and landscapes over the past 65 million years]. Moscow, GEOS Publ., 1999, pp. 21–42.
11. Milankovich M. *Matematicheskaya klimatologiya i astronomicheskaya teoriya kolebanii klimata* [Mathematical climatology and astronomical theory of climate fluctuations]. Moscow; Leningrad, GONTI Publ., 1939. 207 p.
12. Pavlov A. V., Ananyeva G. V., Drozdov D. S., Moskalenko N. G. [Monitoring of the seasonally thawed layer and temperature of frozen soil in northern Russia]. In: *Kriosfera Zemli* [Cryosphere of the Earth], 2002, no. 4, vol. VI, pp. 30–39.
13. Osadchaya G. G. [Stabilizing reactions of permafrost landscapes to changing climatic conditions]. In: *Kriosfera Zemli* [Cryosphere of the Earth], 2003, vol. VII, no. 4, pp. 21–27.

14. Osadchaya G. G. [Special cases of permafrost formation in the Bolshezemelskaya tundra]. In: *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii "Prioritetnye napravleniya v izuchenii kriosfery Zemli"* (25–28 maya 2005 g.) [Proceedings of the International Conference «Priorities in the Study of the Earth's Cryosphere» (May 25–28, 2005)]. Puschino, 2005, pp. 40–41.
15. Osadchaya G. G. [Peatlands of the European northeast cryolithozones: zonal features of development]. In: Melnikov V. P., Sadurtdinov M. R., eds. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennye issledovaniya transformatsii kriosfery i voprosy geotekhnicheskoi bezopasnosti sooruzhenii v Arktike»*. Salekhard, 8–12 noyabrya 2021 g. [Materials of International Conference «Cryosphere Transformation and Geotechnical Safety in the Arctic». Salekhard, November 8–12, 2021]. Salekhard, 2021, pp. 327–330.
16. Osadchaya G. G., Tumel N. V. [Local landscapes as indicators of geocryological zoning (on the example of the European North-East)]. In: *Kriosfera Zemli* [Cryosphere of the Earth], 2012, vol. XVI, no.3, pp. 62–71.
17. Osadchaya G. G., Tumel N. V., Koroleva A. M. [Cryogenic processes on organogenic soils as an indicator of engineering and geological restrictions on nature management (on the example of the Bolshezemelskaya tundra)]. In: *Problemy regionalnoi ekologii* [Problems of regional ecology], 2015, no. 2, pp. 89–94.
18. Osadchaya G. G., Shpolyanskaya N. A. [Geographic features of the variability of geocryological characteristics of the Bolshezemelskaya tundra]. In: *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal* [International Research Journal], 2021, no. 2-1 (104), vol. 1, pp. 124–131.
19. Osadchiy V. V., Osadchaya G. G. [Modern permafrost of the southern permafrost zone of the Timan-Pechora oil and gas province]. In: *Materialy mezhdunarodnoi konferentsii "Kriogennyye resursy polyarnykh i gornykh regionov. Sostoyaniye i perspektivy inzhenernogo merzlotovedeniya"*. Tyumen, 21–24 aprelya 2008 g. [Proceedings of the international conference "Cryogenic resources of polar and mountainous regions. State and prospects of engineering permafrost". Tyumen, April 21–24, 2008]. Tyumen, 2008, pp. 258–261.
20. Gudkovich Z. M., Karklin V. P., Smolyanitsky V. M., Frolov I. E. [On the nature and causes of climate change on Earth]. In: *Problemy Arktiki i Antarktiki* [Arctic and Antarctic Challenges], 2009, no. 1 (81), pp. 15–23.
21. Pavlov A. V. [Heat transfer in natural complexes of the north of Russia]. In: *Kriosfera Zemli* [Earth's cryosphere], 2000, vol. 4, no. 4, pp. 22–31.
22. Pavlov A. V. *Monitoring kriolitozony* [Permafrost monitoring]. Novosibirsk, GEO Publ., 2008. 230 p.
23. Pavlov A. V., Skachkov Yu. B., Kakunov N. B. [Relationship between long-term changes in the depth of seasonal thawing of soils and meteorological factors]. In: *Kriosfera Zemli* [Earth's cryosphere], 2004, no. 4, vol. VIII, pp. 3–11.
24. Malkova G. V., Sadurtdinov M. R., Skvortsov A. G., Tsarev A. M., eds. [Temperature regime of upper rock horizons in disturbed and undisturbed cryogenic landscapes of the European North]. In: *Materialy V konferentsii geokriologov Rossii. Ch. 6: Dinamicheskaya geokriologiya. Moskva, 14–17 iyunya 2016 g.* [Proceedings of the 5th conference of geocryologists of Russia. Part 6: Dynamic geocryology. Moscow, June 14–17, 2016]. Sumy, Universitetskaya kniga Publ., 2016, pp. 63–69.
25. Tumel N. V., Osadchaya G. G. [The Significance of Cryogenic Processes in Assessing Climate Change in the Bolshezemelskaya Tundra]. In: *Materialy mezhdunarodnoi konferentsii "Teoriya i praktika otsenki sostoyaniya kriosfery Zemli i prognoz ee izmeneniya"*. T. 1. Tyumen', 29–31 maya 2006 g. [Proceedings of the international conference "Theory and practice of assessing the state of the Earth's cryosphere and predicting its change". Vol. 1.

- Tyumen, May 29–31, 2006]. Tyumen, Tyumen State Oil and Gas University Publ., 2006, pp. 298–300.
26. Tumel N. V., Osadchaya G. G. [Possibilities of industrial nature management within the marsh landscapes and peat bogs of the permafrost zone of the Bolshezemelskaya tundra]. In: *Trudy X mezhdunarodnoi konferentsii po merzlotovedeniyu "Resursy i riski regionov s vechnoi merzlotoi v menyayushchemsya mire"*. T. 3. Salekhard, 25–29 iyunya 2012 g. [Proceedings of the 10th International Conference on Permafrost "Resources and Risks of Permafrost Regions in a Changing World". Vol. 3. Salekhard, June 25–29, 2012]. Salekhard, Pechatnik Publ., 2012, pp. 381–384.
27. Tsinzerling Yu. D. [Essay on the vegetation of swamps along the middle course of the river]. In: *Izvestiya glavnogo botanicheskogo sada* [Proceedings of the main botanical garden], 1929, vol. 28, iss. 1–2, pp. 95–126.
28. Sherstyukov B. G., Salugashvili R. S. [New Trends in Climate Changes in the Northern Hemisphere of the Earth in the Last Decade]. In: *Trudy Vserossiiskogo nauchno-issl. instituta gidrometeorologicheskoi informatsii – Mirovogo tsentra dannykh* [Works of the All-Russian Scientific Research. Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center], 2010, no. 175, pp. 43–51.
29. Shpolyanskaya N. A. *Vechnaya merzlota i global'nye izmeneniya klimata* [Permafrost and global climate change]. Moscow; Izhevsk, Institut kompyuternykh issledovaniy Publ., 2010. 198 p.
30. Shpolyanskaya N. A. [Climate and its dynamics in the Pleistocene-Holocene as the basis for the emergence of various risks in the development of permafrost areas]. In: *Georisk* [Georisk], 2019, vol. XIII, no. 1, pp. 5–24.
31. Frakes L. A. *Climates throughout geologic time*. Amsterdam; New York, Elsevier, 1979. 310 p.
32. Oberman N. G., Mazhitova G. G. Permafrost dynamic in the north-east of European Russia at the end of the 20th century. In: *Norsk geografisk tidsskrift*, 2001, vol. 55, pp. 241–244.
33. Malkova G., Drozdov D., Vasilie A., Gravis A., Kraev G., Korostev Y., Nikitin K., Orekhov P., Ponomareva O., Romanovsky V., Sadurtdinov M., Shein A., Skvortsov A., Sudakova M., Tsarev A. Spatial and Temporal Variability of Permafrost in the Western Part of the Russian Arctic. In: *Energies*, 2022, no. 15 (7). DOI: 10.3390/en15072311

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шполянская Нелла Александровна – доктор географических наук, профессор кафедры экологии, землеустройства и природопользования технологического факультета Ухтинского государственного технического университета;
e-mail: nellashpol@yandex.ru

Осадчая Галина Григорьевна – доктор географических наук, профессор кафедры экологии, землеустройства и природопользования технологического факультета Ухтинского государственного технического университета;
e-mail: galgriosa@yandex.ru

Малкова Галина Владимировна – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией картографического моделирования и прогноза состояния геосистем криолитозоны Института криосферы Земли Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук;
e-mail: galina_malk@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nella A. Shpolyanskaya – Dr. Sci. (Geography), Prof., Department of Ecology, Land Management and Nature Management, Ukhta State Technical University;
e-mail: nellashpol@yandex.ru

Galina G. Osadchaya – Dr. Sci. (Geography), Prof., Department of Ecology, Land Management and Nature Management, Ukhta State Technical University;
e-mail: galgriosa@yandex.ru

Galina V. Malkova – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Head of the Laboratory of Cartographic Modeling and Forecasting of the State of Cryolithozone Geosystems, Earth's Cryosphere, Earth's Cryosphere Institute of the Tyumen Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences;
e-mail: galina_malk@mail.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Шполянская Н. А., Осадчая Г. Г., Малкова Г. В. Современное изменение климата и реакция криолитозоны (на примере Западной Сибири и Европейского Севера России) // Географическая среда и живые системы. 2022. № 1. С. 6–30.
DOI: 10.18384/2712-7621-2022-1-6-30

FOR CITATION

Shpolyanskaya N. A., Osadchaya G. G., Malkova G. V. Modern climate change and permafrost reaction (on the example of Western Siberia and the European North of Russia). In: *Geographical Environment and Living Systems*, 2022, no. 1, pp. 6–30.
DOI: 10.18384/2712-7621-2022-1-6-30