

**ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА
ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА
НА СРЕДНЕГОДОВУЮ ТЕМПЕРАТУРУ
МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ЗАПАДНОГО ЯМАЛА
К СЕРЕДИНЕ XXI ВЕКА**

Никитин К.А.

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
г. Москва, Российская Федерация
Nikitin.kirill@yandex.ru*

Работа посвящена количественной оценке влияния снежного покрова на формирование среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород Западного Ямала. Задача решена для 2023-2050 гг. на основе результатов проекта взаимного сравнения моделей климатических сценариев (ScenarioMIP). На фоне повышения среднегодовой температуры воздуха и снижения средней зимней высоты снежного покрова зафиксировано медленное сокращение его утепляющего влияния на температуру пород, связанное с понижением уровня годовых теплооборотов в них на 9-24 %.

Ключевые слова: снежный покров, многолетнемерзлые породы, Западный Ямал.

Введение. При потеплении климата наблюдается изменение компонентов природной среды, влияющих на формирование температуры пород. В ходе наблюдаемых и прогнозируемых климатических изменений наиболее актуальной считается задача научного предсказания состояния геокриологической среды по В.А. Кудрявцеву и др. [6]. Точность прогноза в связи с эволюцией природной обстановки зависит от выбора и объема исходных параметров, методов расчета и периода прогнозирования [3].

Среди других естественных покровов широкого распространения снежный оказывает наиболее значительное влияние на температурное поле многолетнемерзлых пород (ММП) [5]. Снег в качестве теплоизолятора препятствует охлаждению пород в холодный период. Повышение среднегодовой температуры ММП относительно температуры дневной поверхности зависит от низких значений теплопроводности снега и сезонности его залегания [6].

Целью работы является исследование влияния снежного покрова на формирование среднегодовой температуры ММП Западного Ямала к середине века.

Материалы и методы исследований. Для достижения цели используется аналитический метод решения задачи промерзания-протаивания, устанавливающий зависимость между уровнем теплооборотов в породах, климатическими характеристиками, теплофизическими свойствами грунтов и естественных покровов [3, 5]. Одним из результатов решения задачи является количественная оценка влияния покровов на формирование среднегодовой температуры ММП. Расчет выполняется для каждого года отдельно.

Задача решается для территорий, на которых сезонно-талый слой сложен песчаными отложениями. Растительность отсутствует или представлена редким травяно-лишайниковым покровом, свойствами которого можно пренебречь. Ландшафтно-геоботанические и дистанционные исследования в районе метеостанции

Марре-Сале показали [10], что такие дренированные участки имеют широкое распространение и занимают значительные территории плоских и слабоволнистых водоразделов, межозерных и межхасырейных перемычек.

Среднемесячные данные о температуре приземного воздуха («near-surface air temperature») и высоте снежного покрова в 2023-2050 гг. извлечены из архива результатов проекта взаимного сравнения моделей климатических сценариев (ScenarioMIP – Scenario Model Intercomparison Project) в рамках 6-й фазы международного проекта сравнения связанных моделей климата CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project) [11, 14]. Данные извлечены из ячейки суши, координаты центра которой максимально приближены к метеостанции Марре-Сале.

Высота снежного покрова содержится в виде нескольких параметров, в том числе «snow depth» и «snow thickness» [14]. Первый представляет собой среднюю высоту снега в каждой ячейке для всей территории суши, в том числе и бесснежной. Второй параметр учитывает высоту снега только на участках, где он залегает. Наибольшие различия между указанными данными наблюдаются в начале и конце холодного периода, когда значения «snow depth» существенно ниже. Снежный покров в это время накапливается или задерживается, как правило, в овражно-балочной и озерно-хасырейной местностях, то есть параметр «snow thickness» характеризует снегонакопление на этих участках. Так как задача решается для возвышенных плоских участков с пониженным снегонакоплением в указанный период, используются значения параметра «snow depth».

Более ранние климатические модели учитывали пути изменения содержания парниковых газов и аэрозолей в атмосфере RCP (Representative Concentration Pathways), числовые индексы которых (1.9; 2.6; 3.4; 4.5; 6.0; 7.0 и 8.5) обозначают возможное радиационное воздействие к 2100 г. [12]. Прогнозные оценки проекта CMIP6 также учитывают это воздействие, но сценарии его достижения называются общими социально-экономическими путями SSP (Shared Socioeconomic Pathways), связанными с развитием землепользования и промышленности [9, 11]. В работе использованы климатические данные, достигаемые при четырех различных социально-экономических путях – SSP1 2.6; SSP2 4.5; SSP3 7.0 и SSP5 8.5. Используемые материалы имеют наиболее высокое пространственное разрешение 0,5° (рисунок 1).

В 2023-2050 гг. при четырех социально-экономических путях отмечается тенденция постепенного увеличения среднегодовой температуры воздуха и связанных с ней климатических характеристик – суммы положительных и отрицательных градусо-часов на дневной поверхности, продолжительности теплого периода (таблица). Прогнозные оценки высоты снега за холодный период (среднезимней) превышают осредненные за 1981-2010 гг. данные в 2,5 раза, однако в течение 2023-2050 гг. фиксируется медленное сокращение показателя.

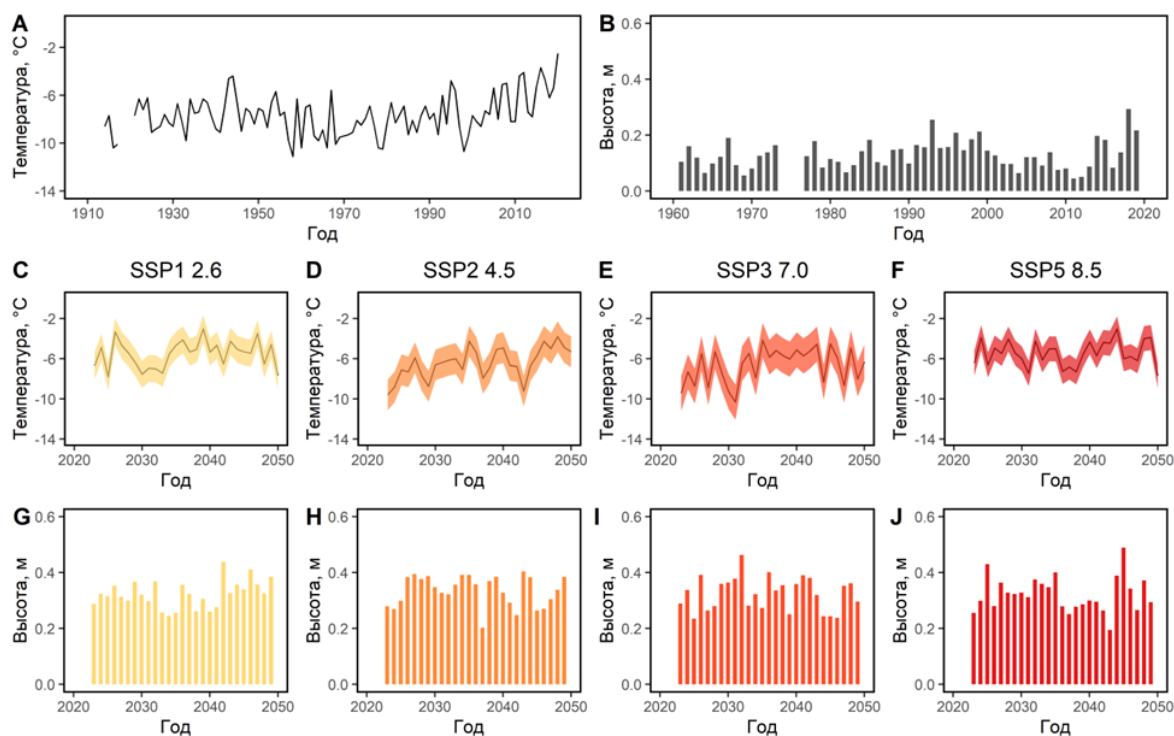


Рисунок 1 – Среднегодовая температура воздуха (А) и высота снега за холодный период (В) на Западном Ямале (по данным метеостанции Марре-Сале [13]), прогнозные оценки среднегодовой температуры воздуха (С-Ф) и высоты снега за холодный период (G-J) до 2050 г.

Диапазон возможных значений соответствует \pm стандартному отклонению

Таблица – Сопоставление прогнозных значений температуры, градусо-часов, продолжительности теплого периода и высоты снега в 2023-2050 гг. с их значениями в 1981-2010 гг.

Характеристика	Период				
	1981-2010 гг. [13]	2023-2050 гг.			
		SSP 1	SSP 2	SSP 3	SSP 5
Температура воздуха					
Среднегодовая температура воздуха, °C	-7,6	-5,5	-6,4	-6,7	-5,5
$\Omega_{д}^n$, град.-час.	15668	20985	17850	16614	20180
$\Omega_{з}^n$, град.-час.	-82453	-69384	-73908	-74920	-68093
$\tau_{д}$, ч	3123	3434	3197	3146	3412
Высота снега					
Высота снега за холодный период, м	0,13	0,32	0,34	0,32	0,32

Термическое сопротивление снежного покрова, представляющее отношение его среднезимней высоты к среднезимней теплопроводности, определено для каждого года. Теплопроводность снежной толщи рассчитана по методике из действующих российских нормативных документов [8] с учетом ее среднезимней плотности, определенной в районе полярной станции Марре-Сале в 2008-2018 гг. [13]. За этот период не отмечается направленного изменения показателя, поэтому в дальнейших расчетах его значение, осредненное за 2008-2018 гг., постоянно.

Теплопроводность и теплоемкость пород определены для каждого года. Теплопроводность пород рассчитана с учетом влажности и плотности сухого грунта [7]. Средняя весовая влажность пород сезонно-талого слоя определялась в конце теплого периода в рамках программы многолетнего мониторинга Института криосферы Земли ТЮМНЦ СО РАН в районе Марре-Сале [4]. По результатам исследований установлено, что на фоне потепления климата в отдельных дренированных ландшафтах содержание влаги в сезонно-талом слое почти не изменяется или медленно сокращается. В данной работе принимается, что на рассматриваемых участках происходит постепенное сокращение влажности сезонно-талого слоя. В ходе обработки результатов получена экспоненциальная формула снижения показателя во времени, используемая на период прогноза.

Значения теплоемкости пород получены расчетным методом с учетом их влажности, удельной теплоемкости и плотности скелета грунта [2]. Содержание замерзшей влаги, значения теплоемкости и плотности скелета взяты из опубликованных результатов изучения криогенной толщи на территории Бованенковского НГКМ [1].

Результаты и их обсуждение. Результаты расчетов представлены на рисунке 2.

В 2023-2050 гг. наблюдается тенденция медленного сокращения термического влияния снега при четырех сценариях, наиболее активно проявляющаяся при SSP 2 и 5. Наибольшее среднее из рассчитанных значений отмечается при сценарии SSP 1 – до 3,8 °С, наименьшее при сценарии SSP 3 – до 3,5 °С. На период прогноза амплитуда полученных данных увеличивается от 2,0 °С при сценарии SSP 1 до 2,8 °С при SSP 2. Влияние снежного покрова на среднегодовую температуру ММП с 2023 г. к середине века увеличится на 1,3 °С, что может быть достигнуто при сценарии SSP 3. В остальных изменение термического воздействия слабо выражено и составляет 0,1 °С.

Медленное уменьшение термического влияния снежного покрова происходит при сокращении его среднезимней высоты, понижении влажности сезонно-талого слоя на 17 %, значений теплоты фазовых переходов на 22 %, наиболее сильно влияющих [5] на снижение величины годовых теплооборотов на 9-24 %.

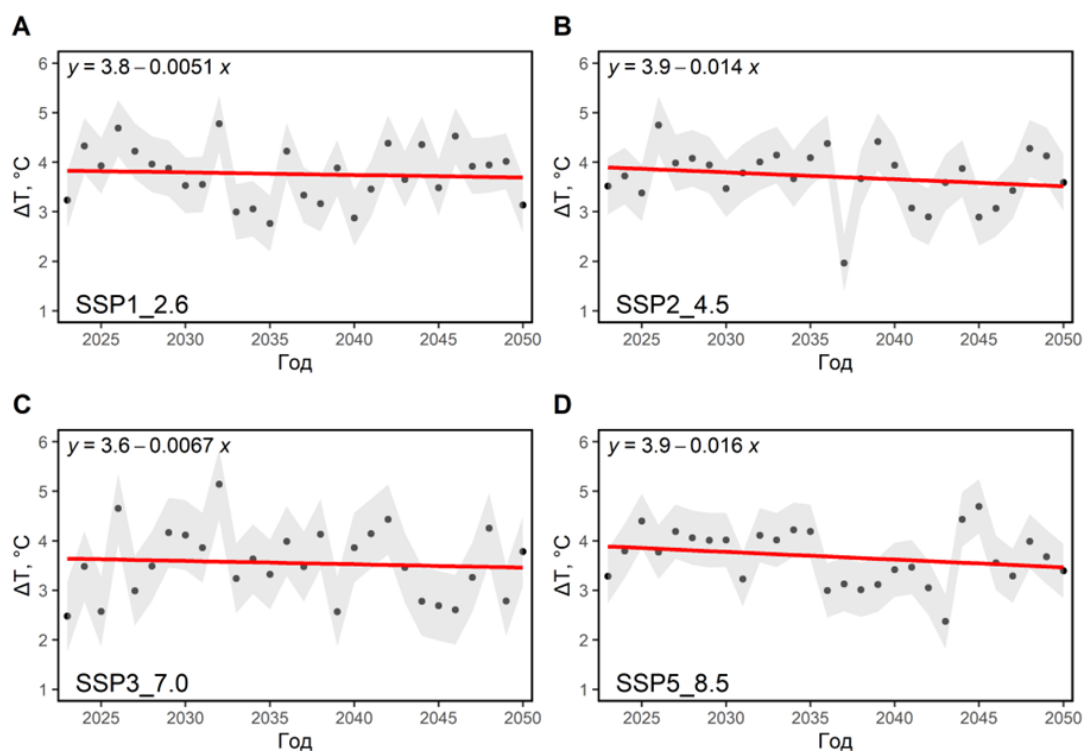


Рисунок 2 – Влияние снежного покрова на среднегодовую температуру ММП (ΔT) в 2023-2050 гг.

Диапазон возможных значений соответствует \pm стандартному отклонению.
Красная линия – график линейного тренда.

Заключение. Выявленные тенденции показывают относительно неизменное влияние снега на формирование температуры мерзлых пород при повышении среднегодовой температуры воздуха на 0,9-2,1 °C до 2050 г. Результаты изучения долгосрочного взаимодействия между многолетнемерзлыми породами и снежным покровом могут уменьшить неопределенность в отношении ММП в условиях климатических изменений.

Библиографические ссылки

1. Баду, Ю.Б., Подборный, Е.Е. Теплофизические свойства грунтов // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: Монография. В 3 т. Т. 2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения. М.: «Газпром экспо», 2013. С. 229-242.
2. Балобаев, В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. – Новосибирск: Наука, 1991. С. 105-114.
3. Булдович, С.Н. Методика приближенной оценки и прогнозирования геокриологических характеристик – среднегодовой температуры и глубины сезонного оттаивания (промерзания) пород // Основы геокриологии. Ч. 6. М.: Изд-во МГУ, 2008. С. 140-169.
4. Васильев, А.А., Облогов, Г.Е., Широков, Р.С. Результаты долговременного мониторинга сезонного протаивания в типичных тундрах Западного Ямала // Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне» с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. МГУ имени М.В. Ломоносова, 14-17 июня 2022 г. – М.: «КДУ», «Добросвет», 2022. С. 221-227.
5. Ершов, Э.Д. Методы геокриологических исследований. М.: Изд-во МГУ, 2004. С. 264-271, 296-301.
6. Кудрявцев, В.А. и др. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. М.: Геоинфо, 2016. С. 172-183.
7. Павлов, А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. С. 176-188.

8. СП 25.13330.2020 «СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах». Введ. 2021-07-01. М.: Минстрой России, 2020. С. 87-93.
9. Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., Taylor, K.E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // *Geosci. Model Dev.* 2016. Vol. 9. P. 1937-1958.
10. Oblogov, G.E., Vasiliev, A.A., Streletskaya, I.D., Zadorozhnaya, N.A., Kuznetsova, A.O., Kanevskiy, M.Z., Semenov, P.B. Methane content and emission in the permafrost landscapes of Western Yamal, Russian Arctic // *Geosciences.* 2020. Vol. 10, № 10: 412.
11. O'Neill, B.C., Tebaldi, C., van Vuuren, D.P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G.A., Moss, R., Riahi, K., Sanderson, B.M. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6 // *Geosci. Model Dev.* 2016. Vol. 9. P. 3461-3482.
12. Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A. An overview of CMIP5 and the experiment design // *Bulletin of the American Meteorological Society.* 2012. Vol. 93. P. 485-498.
13. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://meteo.ru>.
14. World Climate Research Programme (WCRP) Coupled Model Intercomparison Project (Phase 6): Datasets from CMIP6 simulations [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://aims2.llnl.gov/search>.