РЕАКЦИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД НА АНОМАЛЬНОЕ ПРИПОВЕРХНОСТНОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ

М.М. Аржанов

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва
arzhanov@ifaran.ru

Аннотация. Оценено влияние anomalно высоких температур воздуха на характеристики термического режима пород для нарушенных участков криолитозоны Западной Сибири. Согласно данным наблюдений в районе Салехарда температура летом 2016 г. на три стандартных отклонения (около 3.6°C) превышала среднюю летнюю температуру за предыдущие 25 лет. Полученные оценки величины температурного отклика многолетнемерзлых пород на anomalное потепление в летний сезон составляют 1.5–2°C в активном слое до 2 м. Увеличение глубины сезонного протаивания при этом может составлять около 7 %, что сопоставимо с увеличением глубины протаивания в связи с ростом приповерхностной температуры за предыдущие 25 лет.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, anomalно высокая температура

Оценки современных и прогнозируемых изменений климата в арктическом регионе имеют особое значение для разработки стратегий социального и экономического развития региона. Увеличение объемов добычи нефти и газа на арктическом шельфе и континентальных месторождениях требует обеспечения безопасности объектов инфраструктуры и транспортных сетей, в том числе дорог, линий передач и трубопроводов, эксплуатируемых в условиях криолитозоны. Возможными экологическими последствиями экономического развития северных территорий могут быть нарушение растительного и почвенного покровов, принудительное удаление снега, что оказывает влияние на термический и гидрологический режимы многолетнемерзлых грунтов. Эти факторы необходимо учитывать при исследовании процессов взаимодействия в системе атмосфера – подстилающая поверхность – грунт, особенно в регионах распространения мерзлых пород, где наблюдаемые климатические изменения наиболее значительны. Рост приповерхностной температуры в высоких широтах Северного полушария за последние несколько десятилетий более чем в два раза опережал потепление в остальных регионах. Скорость роста температуры воздуха в регионах криолитозоны по данным наблюдений за период 1979–2014 гг. в 2.5 раза превышала глобальное потепление за этот период [1].

Рост приповерхностной температуры в высоких широтах Северного полушария происходит со значительным увеличением температуры в холодный период, что может быть связано с сокращением площади льдов и изменением сроков таяния и становления льда в Арктике, влияющими на изменение альбедо, влажности воздуха и облачности в этом

регионе. Наблюдаемое увеличение приповерхностной температуры в зимний период в четыре раза превосходит потепление летом [2]. Согласно данным наблюдений на метеостанции г. Салехарда (<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>) тренд среднегодовой приповерхностной температуры за последние 25 лет составил около 0.03 °C/год. При этом тренд температуры в зимний и осенний сезоны составлял 0.04 и 0.05 °C/год. Значения тренда весной за рассматриваемый период – около 0.02 °C/год. Тренд температуры в летний сезон менее 0.01 °C/год.

Повышение приповерхностной температуры приводит к росту температуры многолетнемерзлых грунтов. Так, по данным измерений в скважинах, заложенных на плоскобугристом торфянике на экспериментальной площадке надымского стационара (в 30 км к юго-востоку от г. Надым), за период 1972–2010 гг. температура грунта на нарушенном участке (с удаленным растительным покровом) на глубине 10 м увеличилась на 0.8°C [3]. Отмечается также, что наибольшие различия температуры грунта в естественных и нарушенных условиях для этого стационара получены на глубине 1 м. По данным метеостанции Надым тренд среднегодовой приповерхностной температуры составил 0.03 °C/год за 1970–2010 гг. Такие же значения характерны и для тренда температуры приповерхностных многолетнемерзлых грунтов (в верхних нескольких метрах) для Западной Сибири в конце XX – начале XXI вв. по данным наблюдений и результатам численного моделирования [4–6].

Увеличение глобальной приповерхностной температуры сопровождается ростом числа экстремальных событий, в том числе периодов с anomalно высокой температурой воздуха. Так, на метеостан-

ции г. Салехарда температура летом 2016 г. оказалась самой высокой за весь период инструментальных наблюдений с 1882 г. Приповерхностная температура летом 2016 г. составляла 16.03°C (на 3.6°C выше средней летней температуры за предыдущие 25 лет) и превышала 3 стандартных отклонения средней летней температуры за 1991–2015 гг. Такая аномально высокая температура воздуха, особенно в теплый период, может оказывать влияние на термический режим и характеристики сезонного протаивания мерзлых грунтов. В настоящее время влияние подобных событий на экосистемы криолитозоны не достаточно изучено. Для оценки влияния аномально высоких температур воздуха на характеристики термического режима мерзлых пород использовалась разработанная в ИФА РАН модель процессов теплопереноса в грунте [7; 8]. В проведенных расчетах тип грунта соответствовал суглинку. Для исследования внешнего воздействия на нарушенные природные экосистемы арктических регионов в расчетах предполагалось отсутствие растительного покрова и снега. В локально-одномерной постановке задачи участок грунта обменивается с окружающей средой теплом (см. например, [9]). Температура окружающей среды меняется по периодическому закону. Чтобы исключить влияние межгодовых флуктуаций, на основе среднемесячных значений приповерхностной температуры метеостанции г. Салехарда (<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>) за последние 25 лет, были сформированы три временных ряда входных данных: 1) на основе климатологии – контрольный эксперимент CTL; 2) то же, что CTL, но с наблюдаемыми сезонными трендами (см. выше) – эксперимент OBS; 3) то же, что OBS с учетом аномально высокой температуры (на 3.6°C выше чем в OBS согласно данным наблюдений) в летний сезон 22-го модельного года – эксперимент EXT. На рис. 1а приведен временной ход приповерхностной температуры, используемой в качестве верхнего граничного условия в модели теплопереноса в трех экспериментах для последних трех лет расчета. Глубина расчетной области в грунте составляла 800 м. На нижней границе, расположенной ниже толщи многолетнемерзлых пород в данном регионе, задавался геотермальный поток тепла 0.06 Вт/м^2 . Температура фазовых переходов вода-лед в грунте принималась равной 0°C . Для каждого эксперимента проводилась «раскрутка» модели с первым модельным годом до установления стационарно периодического распределения температуры грунта.

Рассчитанное температурное поле в верхних 3 м грунта в эксперименте CTL для последних трех лет расчета приведено на рис. 1б. Из рисунка видно, что в эксперименте CTL температурное поле становится

полностью периодическим, температурные волны оказывают наибольшее влияние на распределение температуры вблизи верхней границы, амплитуда температурных колебаний убывает с глубиной. В эксперименте OBS тренд температуры грунта на глубине 0.5 м получен равным 0.03°C/год и соответствует тренду среднегодовой приповерхностной температуры в данном эксперименте. На глубине 3 м модельный тренд уменьшается до 0.02°C/год .

Глубина нулевой изотермы для заданной температуры фазовых переходов соответствует глубине слоя сезонного протаивания. В контрольном эксперименте CTL максимальная глубина протаивания составляет 1.67 м и достигается в августе (см. рис. 1б).

Максимальные за год значения глубины протаивания в трех экспериментах для последних 10 лет расчета приведены на рис. 1в. Увеличение глубины протаивания к концу расчетного периода в эксперименте OBS по сравнению с контрольным экспериментом составляет около 5 %. Рассчитанный тренд максимальной глубины протаивания (0.3 см/год) меньше оцененного по данным наблюдений для конца XX века (0.5 см/год [10]), что может быть связано с отсутствием в данной постановке задачи отепляющего влияния снежного покрова, увеличивающегося с ростом осадков и с замедлением темпов потепления в Арктике с середины 1990-х годов [11]. При аномально теплом летнем сезоне в эксперименте EXT отмечается рост глубины талого слоя относительно эксперимента OBS на 10–12 см (около 7 %). В последующие годы, когда приповерхностная температура в экспериментах EXT и OBS становится одинаковой (см. рис. 1а), разность между глубиной протаивания в экспериментах EXT и OBS уменьшается (рис. 1в). Отклик термического режима грунта на аномальную летнюю температуру воздуха представлен в виде разности температуры грунта в экспериментах EXT и OBS на рис. 1 г. Наибольшие различия температуры (около $1.5\text{--}2^{\circ}\text{C}$) получены в активном слое (верхние 1.7–2.0 м) в летние месяцы. Температурный отклик уменьшается с глубиной до величины 0.5°C на 2–5 м. Максимум температуры на этой глубине достигается осенью из-за тепловой инерции. На протяжении следующего модельного года разность температуры грунта в экспериментах EXT и OBS уменьшается до 0.1°C .

Полученные результаты показывают, что аномально высокие температуры воздуха в летний сезон оказывают влияние на термический режим многолетнемерзлых грунтов. Температурный отклик многолетнемерзлых пород наиболее значителен в активном слое. Увеличение максимальной глубины сезонного протаивания под воздействием

аномально высокой приповерхностной температуры в летний сезон сопоставимо с ростом глубины про-

таивания в связи с положительным трендом приповерхностной температуры за предыдущие 25 лет.

Рис. 1. Входная приповерхностная температура в экспериментах CTL (сплошная линия), OBS (точки) и EXT (пунктир) (а); рассчитанная температура грунта в эксперименте CTL (заливка) и нулевая изотерма (пунктир) (б); максимальная за год глубина сезонного протаивания грунта в экспериментах CTL (сплошная линия), OBS (точки) и EXT (пунктир) (в); разность температуры грунта в экспериментах EXT и OBS (г).

Работа выполнена в рамках проектов РФФИ 16-07-01205, 17-05-00561) Оценка изменений приповерхностной температуры поддержана РНФ № 14-17-00647.

Список литературы

1. Guo D., Li D., Hua W. Quantifying air temperature evolution in the permafrost region from 1901 to 2014 // Int. J. Clim. 2018. Vol. 38. pp. 66–76.
2. Bintanja R., and E.C. van der Linden The changing seasonal climate in the Arctic // Sci. Rep. 2013. Vol. 1556. N. 3. pp. 1–8. doi: 10.1038/srep01556.
3. Москаленко Н.Г. Изменения криогенных ландшафтов северной тайги Западной Сибири в условиях меняющегося климата и техногенеза // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 2. с. 38–42.
4. Павлов А.В., Малкова Г.В. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. №. 4. с. 32–39
5. Аржанов М.М., Мохов И.И. Температурные тренды в многолетнемерзлых грунтах Северного полушария: сравнение модельных расчетов с данными наблюдений // Доклады АН. 2013. Т. 449. № 1. с. 87–92.
6. Аржанов М.М., Казанцев В.С. Оценки термического состояния многолетнемерзлых грунтов: результаты моделирования и данные наблюдений // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 23. с. 41–43.
7. Аржанов М.М., Демченко П.Ф., Елисеев А.В., Мохов И.И. Воспроизведение характеристик температурного и гидрологического режимов почвы в равновесных численных экспериментах с моделью климата промежуточной сложности // Изв.РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 5. с. 591–610.
8. Arzhanov M.M., Eliseev A. V., Mokhov I.I. A global climate model based, Bayesian climate projection for northern extra-tropical land areas // Glob. Planet. Change. 2012. Vol. 86–87. pp. 57–65.

9. *Атманских М.Б., Рило И.П., Татосов А.В.* Температурные волны в грунте вблизи основания тепловыделяющего сооружения // Вестник ТГУ. 2013. № 7. с. 146–153.
10. *Pavlov A. V.* Active layer monitoring in northern West Siberia / In: A. G. Lewkowicz and M. Allard, eds., Proceedings of the Seventh International Conference on
1. Permafrost, Quebec, Canada: University Laval, 1998, pp. 875–881.
11. *Мельников В.П., Скворцов А.Г., Малкова Г.В., Дроздов Д.С., Пономарева О.Е., Садуртдинов М.Р., Царев А.М., Дубровин В.А.* Результаты изучения геокриологических условий арктических территорий с помощью сейсмических методов // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 1. с. 171–180.

THE PERMAFROST RESPONSE ON HIGH-TEMPERATURE SURFACE WARMING

M.M. Arzhanov

A.M.Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences

arzhanov@ifaran.ru

Abstract. Impact of high-temperature anomalies on permafrost thermal state for the human-damaged cryogenic ecosystems of Western Siberia was estimated. According to observations data near Salekhard the air temperature in the summer of 2016 on three standard deviations (about 3.6°C) exceeded summer mean temperature for the last 25 years. The maximum of a temperature response of permafrost to high-temperature anomalies during a summer season is 1.5–2°C in the active layer up to 2 m. Increase of the seasonal thaw depth at the same time can make about 7 % that is comparable to increase in connection with growth of near-surface temperature for the last 25 years.

Keywords: permafrost, high-temperature anomalies

References

1. Guo D., Li D., Hua W. Quantifying air temperature evolution in the permafrost region from 1901 to 2014 // *Int. J. Clim.* 2018. Vol. 38. pp. 66–76. (In English).
2. Bintanja R., and E.C. van der Linden The changing seasonal climate in the Arctic // *Sci. Rep.* 2013. Vol. 1556(3). pp. 1–8. doi: 10.1038/srep01556. (In English).
3. Moskalenko N.G. Cryogenic landscape changes in the West Siberian northern taiga in the conditions of climate change and human-induced disturbances // *Earth's Cryosphere.* 2012. Vol. XVI. N. 2. pp. 38–42. (In Russian).
4. Pavlov A.V., Malkova G.V. Small-scale mapping of trends of the contemporary ground temperature changes in the Russian North // *Earth's Cryosphere.* 2009. Vol. XIII. N. 4. pp. 32–39. (In Russian).
5. Arzhanov M.M., Mokhov I.I. Temperature trends in the permafrost of the Northern Hemisphere: comparison of model calculations with observations // *Doklady Earth Sciences.* 2013. Vol. 449. Part 1. pp. 319–323. (In English).
6. Arzhanov M.M., Kazantsev V.S. Evaluation of permafrost thermal state: model calculations and observations // *International Research Journal.* 2014. Vol. 23. pp. 41–43. (In Russian).
7. Arzhanov M.M., Demchenko P.F., Eliseev A.V., Mokhov I.I. Simulation of Characteristics of Thermal and Hydrologic Soil Regimes in Equilibrium Numerical Experiments with a Climate Model of Intermediate Complexity // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics.* 2008. Vol. 44. N. 5. pp. 548–566. (In English).
8. Arzhanov M.M., Eliseev A.V., Mokhov I.I. A global climate model based, Bayesian climate projection for northern extra-tropical land areas // *Glob. Planet. Change.* 2012. Vol. 86–87. pp. 57–65. (In English).
9. Atmanskih M.B., Rilo I.P., Tatosov A.V. Temperaturnye volny v grunte vblizi osnovaniya teplovydelyayushhego sooruzheniya [Soil heat waves near the heatallocating construction] // *Vestnik TGU.* 2013. Vol. 7. pp. 146–153. (In Russian).
10. Pavlov A.V. Active layer monitoring in northern West Siberia / in: A. G. Lewkowicz and M. Allard, eds., *Proceedings of the Seventh International Conference on*
12. *Permafrost*, Quebec, Canada: Universite Laval, 1998, pp. 875–881. (In English).
11. Melnikov V.P., Skvortsov A.G., Malkova G.V., Drozdov D.S., Ponomareva O.E., Sadurtdinov M.R., Tsarev A.M., and V.A. Dubrovin Seismic studies of frozen ground in Arctic areas // *Geology and Geophysics.* 2010. Vol. 51. N.1. pp. 171–180. (In Russian).