

РЕКОНСТРУКЦИИ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА В ОСНОВАНИЯХ ПОЗДНЕПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ ЛЕДНИКОВЫХ ЩИТОВ (ЛАВРЕНТИЙСКОГО, СКАНДИНАВСКОГО) ПО ДАННЫМ СКВАЖИННОЙ ТЕРМОМЕТРИИ

Демежко Д.Ю.¹, Горностаева А.А.¹, Антипин А.Н.¹

Выявление механизмов формирования, динамики и распада главных ледниковых покровов плейстоцена (Лаврентийского в Северной Америке и Скандинавского в Европе) дает ключ к пониманию глобальных климатических изменений прошлого и более надежных предсказаний будущих изменений. Особый интерес представляет тепловой режим в основании ледниковых щитов. Такую информацию могут предоставить реконструкции, основанные на анализе данных скважинной термометрии.

Несложно понять, как работает метод реконструкции. Если бы климат Земли не менялся, а вместе с ним сохранялась неизменной и температура земной поверхности, то температуры горных пород равномерно (приблизительно с постоянным геотермическим градиентом) увеличивались бы с глубиной. Колебания температуры земной поверхности вызывают аномалии, которые, постепенно затухая, распространяются вглубь и нарушают стационарное температурное поле Земли. Глубина проникновения аномалии зависит от времени, прошедшего с момента ее появления на поверхности, и коэффициента теплопроводности пород. Таким образом, анализируя современные геотермограммы, записанные в скважинах, можно реконструировать температурную историю земной поверхности. Для реконструкции долговременных колебаний температуры, охватывающих последние несколько десятков тысяч лет, необходимы температурные записи по скважинам глубиной 1,5–2 км, пробуренным в однородных породах без признаков гидрогеологической активности. Таких данных во всем мире немного. Те из них, что попадают на районы распространения позднеплейстоценовых ледниковых щитов, проанализированы в нашем докладе. На рис. 1 приведены пример термограммы, записанной в Онежской параметрической скважине, и реконструкция температуры за последние 40 тыс. лет [Demezhko et al., 2013]. В период максимума последнего оледенения (LGM)

¹ Демежко Д.Ю., Горностаева А.А., Антипин А.Н. – ИГФ УрО РАН, Екатеринбург.

18–25 тыс. л.н. температура земной поверхности здесь опускалась до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ – примерно на $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже современной среднегодовой температуры земной поверхности.

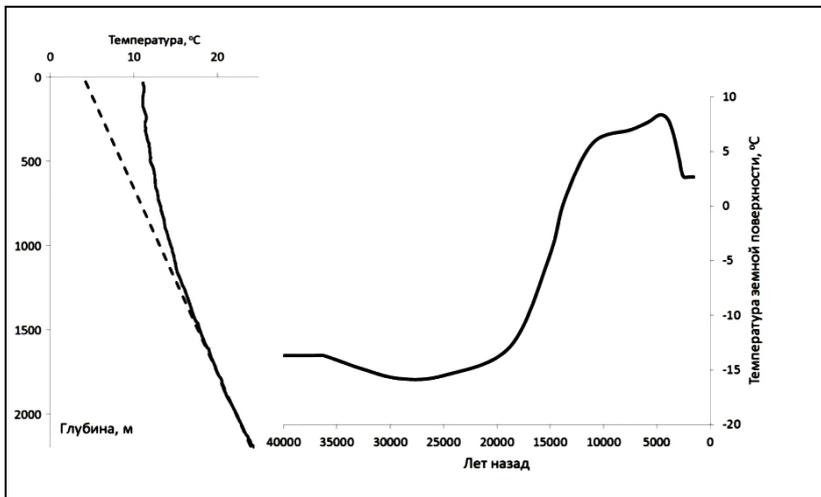


Рис. 1. Термограмма, измеренная в Онежской параметрической скважине (Онега, левый рисунок, сплошная линия), и реконструкции температурной истории (правый рисунок) [Demezhko et al., 2013]

Лаврентийский ледниковый щит являлся частью комплекса ледниковых щитов, покрывавших территорию Канады и север США в висконсине (65–12 тыс. л.н.). Его дегляциация началась ~ 19 тыс. л.н. и закончилась ~ 8 тыс. л.н. Нами здесь изучены 15 реконструкций температурных историй земной поверхности [Pickler et al., 2016, Demezhko et al., 2018] (рис. 2). Данные по близкорасположенным скважинам были усреднены, таким образом, итоговая выборка составила 9 температурных историй.

Средняя LGM температура в основании Лаврентийского ледникового щита составила $-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (стандартное отклонение $\pm 1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$). Отметим, что при высоте ледника 1 км давление в его основании равно ~ 9 Мпа, а температура плавления льда $-0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, при высоте 3 км – соответственно 27 Мпа и $-2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, на большей части изученной территории в период LGM в основании ледника присутствовала талая вода, что обеспечивало его значительную горизонтальную динамику. Лишь две северные скважины обнаружили вероятно мерзлое основание.

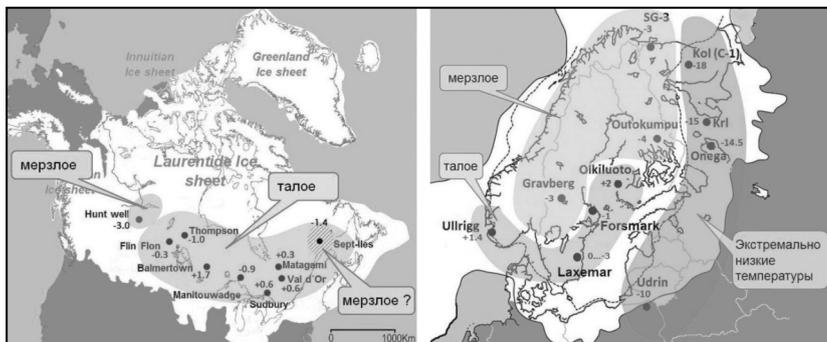


Рис. 2. Лаврентийский (левый рисунок) и Скандинавский (правый) ледниковые щиты в период максимума последнего оледенения (LGM, около 20 тыс. л.н.).

Черные кружки – изученные скважины, подписи у скважин – среднегодовая LGM температура земной поверхности. На правом рисунке пунктиром обозначены пределы распространения согласно минимальной [Siegert et al., 2001], белым цветом – согласно максимальной [Svendsen et al., 2004] моделей

Скандинавский ледниковый щит. Несмотря на более чем столетнюю историю его изучения, мнения о границах распространения ледника, его высоте и хронологии дегляциации до сих пор различаются. Часть исследователей придерживается гипотезы минимального распространения Скандинавского щита [Siegert et al., 2001], другие настаивают на значительно более широком распространении единого ледникового покрова [Svendsen et al., 2004], объединявшего Скандинавский с Баренцево-Карским ледниковым щитом на востоке, достигающего до Британских островов на западе, до северной части Белоруссии и Польши – на юге (рис. 2).

Всего по геотермическим данным здесь было получено 11 оценок LGM температур в основании ледника [Kukkonen et al., 1998, 2011, 2015, Glaznev et al, 2004, Rath and Mottaghy, 2007, Demezhko et al., 2013, Rath et al. – в печати, реконструкция по скважине Ullrigg была выполнена нами по данным, приведенным в Maystrenko et al., 2016]. Скандинавский ледниковый щит демонстрирует значительно более высокую изменчивость температурных режимов, чем Лаврентийский. Оценки, полученные за пределами границы минимального распространения ледникового щита (восточная часть Кольского п-ва, Карелия, Северная Польша), указывают на экстремально низкие LGM температуры земной поверхности: от -10 до -18°C . Такой температурный режим земной поверхности мог реализоваться лишь при отсутствии ледника либо при незначительном времени его су-

существования. LGM температуры в пределах границы минимального распространения, напротив, существенно выше и близки к точке плавления льда (от -4 до $+2^{\circ}\text{C}$).

Разделение исследуемой территории на «ледниковую» и «внеледниковую» части становится более наглядным, если сопоставить реконструированные LGM температуры с оценками «нормальных» температур земной поверхности для этого периода. «Нормальные», т.е. характеризующие тепловой режим земной поверхности при отсутствии ледникового покрова температуры, можно оценить с помощью модели пространственного распределения амплитуд плейстоцен/голоценового потепления в Северной Евразии [Demezhko et al., 2007]. Достаточно вычесть амплитуды потепления из современной среднегодовой температуры земной поверхности. Согласно этой модели, полученной на основе анализа геотермических данных, амплитуда потепления уменьшалась обратно пропорционально расстоянию от центра, расположенного в Северной Атлантике (рис. 3). Сопоставление реконструированных T_{LGM} и «нормальных» T_{LGM}^m температур показало, что температурный режим за пределами ледника совпадает с «нормальным», а оценки, полученные в пределах ледника, образуют компактную группу вблизи фазовой границы лед/вода.

И все же нельзя утверждать, что геотермические оценки однозначно поддерживают гипотезу минимального распространения Скандинавского щита в период LGM. Возможно, тепловой след «внеледниковой» части просто не сохранился из-за незначительного времени пребывания здесь ледника и/или его малой мощности

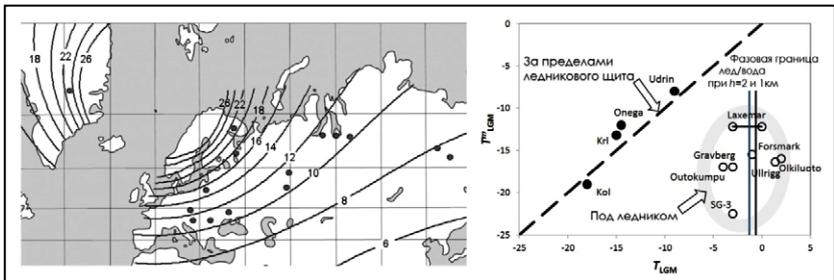


Рис. 3. Слева – распределение амплитуд плейстоцен/ голоценового потепления T , $^{\circ}\text{C}$ в Северной Евразии согласно модели [Demezhko et al., 2007]. Справа – сопоставление реконструированных LGM температур земной поверхности T_{LGM} с модельными «нормальными» температурами T_{LGM}^m , характеризующими температурный режим при отсутствии ледникового щита. Пунктирная линия соответствует соотношению $T_{\text{LGM}} = T_{\text{LGM}}^m$

Пространственное распределение LGM температур в исследованных районах хорошо воспроизводит современную зональность температур земной поверхности в Гренландии [MacGregor et al., 2016]. Районы с мерзлым основанием сосредоточены здесь лишь вблизи ледоразделов. В периферийных частях ледника присутствуют обширные зоны с талым основанием. Вне ледникового щита в северной части Гренландии среднегодовые температуры земной поверхности значительно ниже нуля: -6 в Pituffik, $-8,4^{\circ}\text{C}$ в Danmarkshavn, $-12,1^{\circ}\text{C}$ в Bliss Bugt. Таким образом, современный Гренландский ледниковый щит можно считать близким аналогом ледниковых щитов позднего плейстоцена. С другой стороны, учитывая, что геотермические оценки характеризуют тепловой режим за длительный период (например, для LGM с центром ок. 18 тыс. л.н. реконструкции дают среднюю температуру за период 18 ± 6 тыс.л.), наличие обширных талых зон в Гренландии не является признаком неустойчивого состояния ледника.

Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ (грант №16-05-00086).

Литература

- [8] *Demezhko D.Yu., Ryvkin D.G., Outkin V.I., Duchkov A.D. and Balobaev V.T.* Spatial distribution of Pleistocene/Holocene warming amplitudes in Northern Eurasia inferred from geothermal data. *Climate of the Past*, 3, 559–568, 2007.
- [9] *Demezhko D.Yu., Gornostaeva A.A., Tarkhanov G.V. and Esipko O.A.*, 30,000 years of ground surface temperature and heat flux changes in Karelia reconstructed from borehole temperature data, *Bulletin of Geography. Physical Geography Series*, vol.6(1). – P. 7–25, 2013.
- [10] *Demezhko D., Gornostaeva A., Majorowicz J., & Šafanda J.*, Temperature and heat flux changes at the base of Laurentide ice sheet inferred from geothermal data (evidence from province of Alberta, Canada), *International Journal of Earth Sciences*, vol. 107(1). – P. 113–121, 2018.
- [11] *Glaznev V. N., Kukkonen I. T., Raevskii A. B., & Jokinen J.*, New data on thermal flow in the central part of the Kola Peninsula, *Doklady Earth Sciences*, vol. 396. – P. 512–514, 2004.
- [12] *Kukkonen I.T., Gosnold W.D., Šafanda J.*, Anomalously low heat flow density in eastern Karelia, Baltic Shield: a possible paleoclimate signature, *Tectonophysics*, vol. 291. – P. 235–249, 1998.
- [13] *Kukkonen I. T., Rath V., Kivekäs L., Šafanda J., & Čermak V.*, Geothermal studies of the Outokumpu Deep Drill Hole, Finland: Vertical variation

- in heat flow and palaeoclimatic implications, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 188(1–2). – P. 9–25, 2011.
- [14] *Kukkonen I. T., Rath V., Korpisalo A.*, Paleoclimatic Inversion of Ground Surface Temperature History from Geothermal Data on the Olkiluoto Drill Hole OL-KR56, Working Report no 2015–49, Helsinki, 64 pp., 2015.
- [15] *MacGregor J. A., Fahnstock M. A., Catania G. A., et al.* A synthesis of the basal thermal state of the Greenland Ice Sheet, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, vol. 121(7). – P. 1328–1350, 2016.
- [16] *Maystrenko Y.P., Slagstad T., Elvebakk H.K., Olesen O., Ganerød G.V., & Rønning J.S.*, New heat flow data from three boreholes near Bergen, Stavanger and Moss, southern Norway, *Geothermics*, vol. 56. – P. 79–92, 2015.
- [17] *Pickler C., Beltrami H., Mareschal J.-C.*, Laurentide Ice Sheet basal temperatures during the last glacial cycle as inferred from borehole data, *Climate of the Past*, vol. 12 (1). – P. 115–127, 2016.
- [18] *Rath V., Mottaghy D.*, Smooth inversion for ground surface temperature histories: estimating the optimum regularization parameter by generalized cross-validation, *Geophysical Journal International*, vol. 171(3). – P. 1440–1448, 2007.
- [19] *Rath V., Sundberg J., Näslund J.O.*, Claesson Liljedahl L. in press. Paleoclimatic inversion of temperature profiles from deep boreholes at Forsmark and Laxemar. SKB TR-18-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [20] *Siegert M.J., Dowdeswell J. A., Hald M., & Svendsen J.I.*, Modelling the Eurasian Ice Sheet through a full (Weichselian) glacial cycle, *Global and Planetary Change*, vol.31(1–4). – P. 367–385, 2001.
- [21] *Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I., et al.* Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia // *Quaternary Science Reviews*, vol. 23(11–13). – P. 1229–1271, 2004.