

УДК 550.360:551.583

## ОРБИТАЛЬНАЯ КОРРЕКТИРОВКА ГЕОТЕРМИЧЕСКИХ РЕКОНСТРУКЦИЙ ПАЛЕОКЛИМАТА

© 2017 г. Анастасия А. Горностаева, Александр Н. Антипин

*Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия  
e-mail: free\_ride\_@mail.ru*

Поступила в редакцию 09.07.2015 г.

**Аннотация.** Предложен новый метод повышения точности датировок геотермических реконструкций палеоклимата, основанный на совместной инверсии поверхностных палеотемператур и изменений теплового потока через земную поверхность и сопоставлении последних с вариациями внешнего радиационного воздействия на длинных временных шкалах. Разработанный алгоритм схож с методикой орбитальной подгонки для изотопных температурных хронологий, однако имеет существенное преимущество: для уточнения хронологий палеоклиматических реконструкций сопоставляются две энергетические характеристики, что способствует адекватному учету задержки температурной реакции на изменение внешнего радиационного воздействия. Методика наиболее применима к палеоклиматическим реконструкциям масштаба нескольких десятков тысяч лет. Алгоритм следует применять с осторожностью в районах древних оледенений. Методика реализована на примере реконструированной на Урале температурной истории земной поверхности за последние 35 тыс. лет. Применение орбитальной корректировки геотермических реконструкций позволило достичь корреляции 99% между изменениями теплового потока через земную поверхность и инсоляции в интервале 35–6 тыс. лет назад, оставаясь в рамках естественной изменчивости теплофизических параметров разреза.

**Ключевые слова:** скважинная геотермия, палеоклимат, температурная история земной поверхности, тепловой поток через земную поверхность, внешнее радиационное воздействие, корректировка временных шкал.

DOI: 10.7868/S0373244417030057

## ORBITAL TUNING OF PALEOCLIMATE GEOTHERMAL RECONSTRUCTIONS

Anastasiia A. Gornostaeva and Aleksandr N. Antipin

*Institute of Geophysics, Urals Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia  
e-mail: free\_ride\_@mail.ru*

Received July 9, 2015

**Abstract.** A new method is presented to increase the dating accuracy of geothermal paleoclimate reconstructions. The method is based on a simultaneous inversion of surface paleotemperatures and changes of ground surface heat flux, and on a comparison of the latter with external radiative forcing variations on long time scales. The developed algorithm is similar to the method of orbital tuning used for isotope temperature chronologies, but has a substantial advantage: for the revision of reconstructed paleoclimate chronologies, two energy characteristics are compared. It promotes adequate accounting the delay of the temperature reaction to changes in external radiative forcing. The presented method works best for the long-period paleoclimate reconstructions (some tens of thousands of years long). The algorithm should be used carefully for the former glaciation regions. The method was tested using ground surface temperature history reconstructed in the Urals for the past 35 kyr. The applying of the orbital tuning of geothermal paleoclimate reconstructions made it possible to achieve the 99% correlation between the ground surface heat flux and insolation changes in time interval of 35–6 kyr BP staying within the natural variability of the thermophysical properties of the rocks.

**Keywords:** borehole geothermics, paleoclimate, ground surface temperature history, ground surface heat flux, external radiative forcing, timescales synchronization.

**Введение.** Проблема получения точных датировок реконструируемых климатических событий в той или иной мере свойственна многим методам реконструкции палеоклимата. Неоднозначность палеоклиматических хронологий, восстановленных на основе анализа косвенных свидетельств климатических изменений (пыльца растений, донные отложения, изотопы ледовых кернов и пр.), зачастую обусловлена различными природными процессами, влияющими на скорость накопления индикатора, а также особенностями самого индикатора [1, 8, 9, 25].

Значительная погрешность датировки реконструируемых климатических событий свойственна и геотермическим реконструкциям палеоклимата, основанным на анализе данных температурных измерений в глубоких скважинах [3, 15]. Временная привязка в данном методе определяется скоростью распространения тепловых волн в геологической среде, зависящей от значения теплопроводности пород. В реальной среде эта скорость может отличаться от той, что рассчитана с помощью коэффициента температуропроводности, определенного по лабораторным образцам. Это связано с присутствием ряда некондуктивных факторов теплопереноса, таких как замерзание и оттаивание поровой влаги, фильтрация подземных вод. В связи с этим временная шкала геотермических палеоклиматических реконструкций может искажаться.

Одним из методов уточнения палеоклиматических хронологий является, так называемая, методика орбитальной подгонки (*orbital tuning*) [10, 30, 31, 35]. Суть ее заключается в синхронизации изотопных ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) палеотемпературных хронологий с орбитальными инсоляционными кривыми в предположении о том, что главным фактором изменений температуры земной поверхности являлось внешнее радиационное воздействие [23, 30]. Однако в реальности температурная реакция на изменение потока приходящего к поверхности тепла всегда происходит с некоторой задержкой [19, 20, 22, 32, 33], которую не всегда можно определить и учесть при орбитальной подгонке, что вносит соответствующую погрешность в получаемую хронологию.

Возможность более корректного применения методики орбитальной подгонки открывается при рассмотрении геотермических реконструкций палеоклимата. Данные скважинной термометрии позволяют одновременно реконструировать два независимых климатических параметра – изменение температуры земной поверхности (*GST – ground surface temperature*) [6, 16–18, 26, 28, 29, 34]

и климатически обусловленные вариации теплового потока через земную поверхность (*SHF – surface heat flux*). SHF, по сути, представляет собой тепловой дисбаланс, возникающий на земной поверхности как разность между потоком приходящей солнечной радиации и явным и скрытым потоками тепла от поверхности [4, 11, 12, 19, 27].

Одновременная реконструкция двух характеристик на единой временной шкале существенно расширяет возможности корректировки этой шкалы. Так как тепловой поток является энергетической характеристикой, то его можно непосредственно сравнивать с изменением внешнего радиационного воздействия, полагая, что временной сдвиг между ними отсутствует. Это позволяет корректировать временную шкалу геотермических реконструкций, сопоставляя тепловую историю (историю SHF) с данными об изменении приходящей радиации аналогично процедуре орбитальной подгонки. При этом одновременно меняется и хронология температурной реконструкции, а также вносится необходимый сдвиг между внешним тепловым воздействием и температурной реакцией на него.

**Методика уточнения хронологий геотермических реконструкций.** Предлагаемая нами методика корректировки временных шкал геотермических реконструкций палеоклимата основана на сопоставлении истории изменения теплового потока через земную поверхность SHF с данными о внешнем радиационном воздействии (*RF – radiative forcing*) на длинных временных шкалах.

Синхронизация сводится к совмещению кривых SHF и RF путем варьирования коэффициента температуропроводности от исходного. Критерием оптимального совмещения является максимальное значение взаимной корреляционной функции кривых, характеризующее искомую степень растяжения либо сжатия временной шкалы SHF и связанной с ней шкалы температур.

В общем виде предлагаемый алгоритм корректировки можно представить следующим образом.

1. На первом этапе производится реконструкция историй изменения температуры и теплового потока по скважинной термограмме для некоторого исходного значения температуропроводности (например,  $a = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ). Тепловой поток удобнее рассчитать непосредственно по реконструированной температурной истории. Алгоритмы расчета изменений SHF по известным вариациям GST первоначально были предложены в работах [13, 36] и, более точный, – в [2, 19].

2. Прямое сопоставление кривых SHF и RF не вполне корректно: временное разрешение RF постоянно, а разрешение SHF падает по мере удаления в прошлое. Минимально разрешимый интервал геотермической реконструкции приблизительно равен  $2 \cdot t^*/3$ , где  $t^*$  – время, отсчитываемое назад от момента измерения температуры в скважине [21]. Поэтому для приведения кривой внешнего радиационного воздействия к общему виду с кривой изменения теплового потока необходимо сгладить ее в скользящих окнах переменной ширины [7].

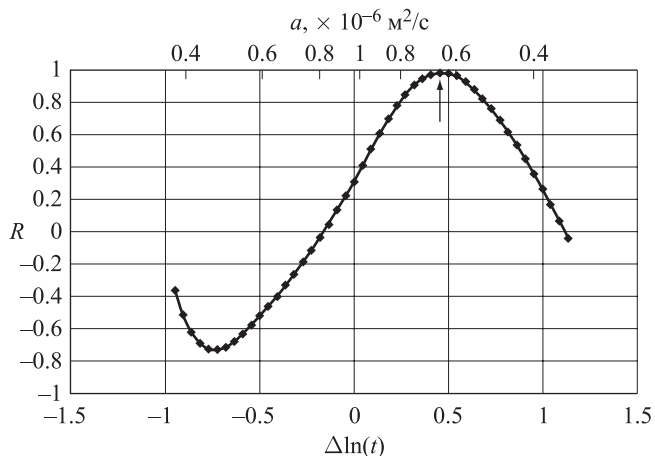
3. Т.к. изменение температуропроводности сжимает или растягивает временную шкалу относительно момента получения термограммы, удобно перевести реконструированные ряды GST, SHF и ряд осредненных значений RF в логарифмическую шкалу. Тогда совмещение можно осуществить простым сдвигом кривой SHF относительно ряда RF.

4. Далее происходит построение взаимной корреляционной функции между кривыми изменения SHF и RF, по максимуму которой оценивается оптимальное значение температуропроводности и, соответственно, необходимая степень растяжения или сжатия временной шкалы от принятой за исходную. После этого производится трансформация временных шкал реконструированных изменений температуры и теплового потока.

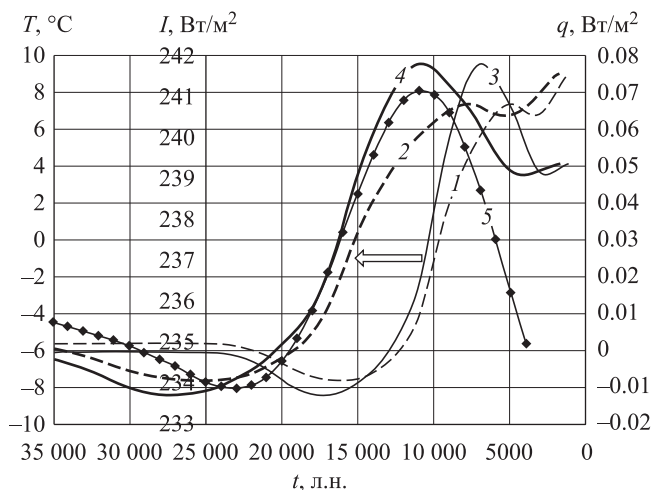
Процедура корректировки временных шкал геотермических палеоклиматических реконструкций была реализована в виде компьютерной программы PaleoTHF (свидетельство о гос. регистрации № 2015660106 от 22.09.2015).

**Пример применения методики синхронизации.** Предложенный алгоритм корректировки геотермических хронологий был реализован на примере термограммы Уральской сверхглубокой скважины СГ-4. Значительная глубина скважины (6 км) позволила реконструировать истории изменения GST и SHF длительностью 35 тыс. лет. Для столь значительного временного интервала в качестве характеристики внешнего радиационного воздействия было выбрано теоретически рассчитанное изменение инсоляции  $I$  на широте  $60^\circ$  с.ш. [14]. Оно неотягощено ошибками реконструкции, что позволяет осуществить точную временную привязку.

Реконструкция изменений GST проводилась с использованием значения температуропроводности  $a = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  [21]. Максимум взаимной корреляционной функции  $R = 0.99$  дос-



**Рис. 1.** Зависимость коэффициента взаимной корреляции  $R$  между тепловым потоком и инсоляцией от величины сдвига  $\Delta \ln(t)$  кривой SHF на логарифмической временной шкале. Вверху – соответствующая шкала изменения эффективной температуропроводности  $a$ .



**Рис. 2.** Синхронизация временных шкал геотермических реконструкций палеоклимата на Урале. (1, 3) – GST и SHF, соответственно, реконструированные при  $a = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  ( $E = 2500 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{с}^{-1/2}$ ); (2, 4) – GST и SHF, соответственно, после процедуры синхронизации для оптимального  $a = 0.64 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; (5) – изменение инсоляции  $I$  на широте  $60^\circ$  с.ш. [10].

тигается при сдвиге кривой изменений SHF на логарифмической шкале  $\Delta \ln(t) = 0.453$  относительно инсоляционной кривой (рис. 1), т.е. при растяжении исходной временной шкалы в 1.4 раза. Скорректированные хронологии реконструированных GST и SHF представлены на рис. 2.

**Обсуждение результатов.** В результате проведенного исследования был разработан и реализован новый алгоритм корректировки временных шкал геотермических реконструкций палеоклимата. Предложенный алгоритм имеет существенное

преимущество по сравнению с каноническим применением методики орбитальной подгонки: для синхронизации производится сопоставление двух энергетических параметров (потоков тепла), за счет чего автоматически вносится необходимый сдвиг между внешним тепловым воздействием и температурной реакцией на него.

Алгоритм был протестирован на примере реконструкции температурной истории земной поверхности на Урале за последние 35 тыс. лет. Применение алгоритма позволило достичь корреляции в 99% между кривыми теплового потока и инсоляции в интервале 35–6 тыс. л.н. (см. рис. 2), варьируя значение теплопроводности в пределах ее естественной изменчивости [24].

Описанная методика, безусловно, не универсальна. Ее использование основано на предположении синхронности изменений теплового потока через земную поверхность и внешнего радиационного воздействия. Такое допущение в большей степени применимо к долговременным климатическим изменениям – порядка десятков тысяч лет. В климатических вариациях меньшего временного масштаба может присутствовать сопоставимое с длительностью временной шкалы запаздывание реакции теплового потока на изменения внешнего радиационного воздействия [5]. В последнем случае синхронизация неизбежно приведет к унификации всех имеющихся температурных историй и осреднению временных неоднородностей климатических изменений.

Кроме того, предложенный алгоритм уточнения геотермических хронологий следует применять с осторожностью к палеоклиматическим реконструкциям в районах древнейших оледенений, где предположение о мгновенной реакции теплового поля на изменение потока внешней радиации весьма неочевидно. В таких случаях для верификации полученных палеохронологий необходимо использовать дополнительные источники информации о динамике дегляциации, либо иные косвенные свидетельства и маркеры для временной привязки восстановленных климатических событий.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность д.г.-м.н. Д. Ю. Демежко за предложенную идею исследований.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проектов № 14-05-31055 мол\_а и № 16\_05\_00086а (частично).

**Acknowledgements.** The authors express their gratitude to Dr. D. Yu. Demezhko for the proposed idea of research.

The study is supported by the Russian Foundation for Basic Research, projects nos. 14-05-31055 mol\_a and 16-05-00086-a (partially).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков Ю.В., Тартаковский В.А. Алгоритм синхронизации хронологических рядов // Изв. Томского политехнического университета. 2009. Т. 315. № 5. С. 61–64.
2. Горностаева А.А. Алгоритм расчета изменений теплового потока через земную поверхность по данным об изменениях температуры земной поверхности // Уральский геофизический вестник. 2014. № 1. С. 37–45.
3. Демежко Д. Ю. Геотермический метод реконструкции палеоклимата (на примере Урала). Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 143 с.
4. Демежко Д.Ю., Горностаева А.А. Реконструкция долговременных изменений теплового потока через земную поверхность по данным геотермии глубоких скважин // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 12. С. 1841–1846.
5. Демежко Д.Ю., Горностаева А.А. Реконструкция изменений теплового потока через земную поверхность на Урале по геотермическим и метеоданным // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13. № 4. С. 21–40.
6. Демежко Д.Ю., Горностаева А.А., Тарханов Г.В., Есипко О.А. Реконструкция температурной истории земной поверхности за последние 30 000 лет по данным термометрии Онежской параметрической скважины // Геофизические исследования. 2013. Т. 14. № 2. С. 38–48.
7. Демежко Д.Ю., Соломина О.Н. Изменения температуры земной поверхности на о. Кунашир за последние 400 лет по геотермическим и древесно-кольцевым данным // Доклады Академии наук. 2009. Т. 426. № 2. С. 240–243.
8. Методы палеогеографических реконструкций: Методическое пособие / Колл. авторов: Блюм Н.С., Болиховская Н.С., Большаков В.А., Глушанкова Н.И., Каплин П.А., Кловиткина Т.С., Маркова А.К., Николаев С.Д., Новичкова Е.А., Полякова Е.И., Поротов А.В., Свиточ А.А., Судакова Н.Г., Талденкова Е.Е., Фаустов С.С., Янина Т.А. / Под ред. П.А. Каплина, Т.А. Яниной. М.: Географический факультет Моск. гос. ун-та, 2010. 430 с.
9. Сидорова О.В., Наурузбаев М.М., Ваганов Е.А. Динамика климата позднего голоцена севера Евразии по данным ледниковых кернов Гренландии и длительных древесно-кольцевых хронологий // Изв. РАН. Сер. геогр. 2007. № 1. С. 95–106.
10. Bender M.L. Orbital tuning chronology for the Vostok climate record supported by trapped gas



- composition // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 204, 2002. P. 275–289.
11. *Bennett W.B., Wang J., and Bras R.L.* Estimation of global ground heat flux // *J. of Hydrometeorology*. 2008. Vol. 9 (4). P. 744–759.
  12. *Beltrami H.* Surface heat flux histories from inversion of geothermal data: Energy balance at the Earth's surface // *J. of Geophys. Res.: Solid Earth*. 2001. Vol. 106. № B10. P. 21979–21993.
  13. *Beltrami H., Smerdon J.E., Pollack H.N., and Huang S.* Continental heat gain in the global climate system // *Geophys. Res. Lett.* 2002. Vol. 29. № 8. P. 8–1–8–3.
  14. *Berger A. and Loutre M.F.* Insolation values for the climate of the last 10 million of years // *Quaternary Sciences Review*. 1991. Vol. 10. № 4. P. 297–317. [http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD\\_EARTH\\_LAND\\_NGDC\\_PALEOCLIM\\_INSOL.html](http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD_EARTH_LAND_NGDC_PALEOCLIM_INSOL.html).
  15. *Bodri L. and Cermak V.* Borehole climatology. A new method on how to reconstruct climate. Elsevier Science, 2007. 352 pp.
  16. *Cermak V.* Underground temperature and inferred climatic temperature of the past millennium // *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.* 1971. № 10. P. 1–19.
  17. *Dahl-Jensen D., Mosegaard K., Gundestrup N., Clow G.D., Johnsen S.J., Hansen A.W., and Balling N.* Past temperatures directly from the Greenland Ice Sheet // *Science*. 1998. № 282. P. 268–271.
  18. *Demezhko D. Yu. and Golovanova I.V.* Climatic changes in the Urals over the past millennium – an analysis of geothermal and meteorological data // *Climate of the Past*. 2007. № 3. P. 237–242.
  19. *Demezhko D.Y. and Gornostaeva A.A.* Late Pleistocene–Holocene ground surface heat flux changes reconstructed from borehole temperature data (the Urals, Russia) // *Climate of the Past*. 2015. № 11. P. 647–652. doi:10.5194/cp-11-647-2015.
  20. *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*. 2013. № 6. P. 7–25.
  21. *Demezhko D. Yu. and Shchapov V.A.* 80.000 years ground surface temperature history inferred from the temperature-depth log measured in the superdeep hole SG-4 (the Urals, Russia) // *Global and Planetary Change*. Vol. 29. № 1–2. 2001. P. 219–230.
  22. *Douglass D. H. and Knox R. S.* Ocean heat content and Earth's radiation imbalance. II. Relation to climate shifts // *Physics Letters A*. 2012. Vol. 376. № 14. P. 1226–1229.
  23. *Dreyfus G.B., Parrenin F., Lemieux-Dudon B., Durand G., Masson-Delmotte V., Jouzel J., Barnola J.-M., Panno L., Spahni R., Tisserand A., Siegenthaler U., and Leuenberger M.* Anomalous flow below 2700m in the EPICA Dome C ice core detected using  $18\text{O}$  of atmospheric oxygen measurements // *Climate of the Past*. 2007. Vol. 3. P. 341–353.
  24. *Durham W.B., Mirkovich V.V., and Heard H. C.* Thermal diffusivity of igneous rocks at elevated pressure and temperature // *J. Geophys. Res. Solid Earth* (1978–2012). 1987. № 92. P. 11615–11634.
  25. *Fudge T.J., Waddington E. D., Conway H., Lundin J.M.D., and Taylor K.* Interpolation methods for Antarctic ice-core timescales: application to Byrd, Siple Dome and Law Dome ice cores // *Climate of the Past*. 2014. № 10. P. 1195–1209. doi:10.5194/cp-10-1195-2014.
  26. *Gornostaeva A.A. and Demezhko D. Yu.* Recovery from the Little Ice Age in the Urals and Eastern Europe: Geothermal evidences // *Geography, Environment, Sustainability*. 2013. Vol. 6. № 1. P. 29–36.
  27. *Huang S.* 1851–2004 annual heat budget of the continental landmasses // *Geophys. Res. Lett.* 2006. № 33. L04707. doi:10.1029/2005GL025300.
  28. *Huang S., Pollack H. N., and Shen P.-Y.* Temperature trends over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures // *Nature*. 2000. Vol. 403. P. 756–758.
  29. *Lachenbruch A.H. and Marshall B. V.* Changing climate: Geothermal evidence from permafrost in the Alaska Arctic // *Science*. 1986. Vol. 234. P. 689–696.
  30. *Martinson D.G., Pisias N. G., Hays J. D., Imbrie J., Moore T. C., and Shackleton N.J.* Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0–300000 years chronostratigraphy // *Quat. Res.* 1987. Vol. 27. P. 1–30.
  31. *Parrenin F., Barnola J.-M., Beer J., Blunier T., Castellano E., Chappellaz J., Dreyfus G., Fische H., Fujita S., Jouzel J., Kawamura K., Lemieux-Dudon B., Loulergue L., Masson-Delmotte V., Narcisi B., Petit J.-R., Raisbeck G., Raynaud D., Ruth U., Schwander J., Severi M., Spahni R., Steffensen J. P., Svensson A., Udisti R., Waelbroeck C., and Wolff E.* The EDC3 chronology for the EPICA Dome C ice core // *Climate of the Past*. 2007. № 3. P. 485–497. doi:10.5194/cp-3-485-2007.
  32. *Peixoto J.P. and Oort A.H.* Physics of climate // *Rev. Mod. Phys.* 1984. Vol. 56. № 3. P. 365–429.
  33. *Pielke Sr.R.A.* Heat storage within the Earth system // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2003. Vol. 84. № 3. P. 331–335.
  34. *Pollack H.N., Huang S., and Smerdon J.E.* Five centuries of climate change in Australia: The view from underground // *J. of Quaternary Sci.* 2006. Vol. 21 (7). P. 701–706.
  35. *Shackleton N.* The 100.000-year ice-age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity // *Science*. Vol. 289. 2000. P. 1897–1902.
  36. *Wang J. and Bras R. L.* Ground heat flux estimated from surface soil temperature // *J. Hydrol.* 1999. Vol. 216. P. 214–226.

## REFERENCES

1. Volkov Yu.V., Tartakovsky V.A. The algorithm of chronological series synchronization. *Izv. Tomsk. Politeh. Univ.*, 2009, vol. 315, no. 5, pp. 61–64. (In Russ.)
2. Gornostaeva A.A. The calculation algorithm of ground surface heat flux changes from ground surface temperature changes. *Ural'skij Geophys. Vestn.*, 2014, no. 1, pp. 37–45. (In Russ.)
3. Demezhko D. Yu. *Geotermicheskii metod rekonstruktsii paleoklimata (na primere Urala)* (Geothermal Method for Paleoclimate Reconstruction (Case Studies from the Urals, Russia). Yekaterinburg: UB RAS, 2001.
4. Demezhko D.Y., Gornostaeva A.A. Reconstructions of long-term ground surface heat flux changes from deep-borehole data. *Russ. Geol. Geophys.*, 2014, vol. 55, no. 12, pp. 1841–1846. (In Russ.)
5. Demezhko D. Yu., Gornostaeva A.A. Reconstruction of ground surface heat flux history in the Urals from geothermal and meteorological data. *Geophys. Proces. Biosphere*, 2014, vol. 13, no. 4, pp. 21–40. (In Russ.)
6. Demezhko D. Yu., Gornostaeva A.A., Tarkhanov G.V., Esipko O.A. Ground surface temperature reconstruction over the last 30,000 from Onega parametric borehole temperature data. *Geophys. Res.*, 2013, vol. 14, no. 2, pp. 38–48. (In Russ.)
7. Demezhko D.Y., Solomina O.N. Ground surface temperature variations on Kunashir Island in the last 400 years inferred from borehole temperature data and tree-ring records. *Dokl. Earth Sci.*, 2009, vol. 426, no. 2, pp. 240–243. (In Russ.)
8. *Metody paleogeograficheskikh rekonstruktsii* (Methods of Paleogeographic Reconstructions), Kaplin P.A., Yanina T.A., Ed. Moscow: Moscow State Univ., 2010.
9. Sidorova O.V., Naurzbaev M.M., Vaganov E.A. The dynamics of late Holocene climate in the North Eurasia from Greenland ice cores data and long-term tree-ring chronologies. *Izv. Ross. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2007, no. 1, pp. 95–106. (In Russ.)
10. Bender M.L. Orbital tuning chronology for the Vostok climate record supported by trapped gas composition. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2002, no. 204, pp. 275–289.
11. Bennett W.B., Wang J., and Bras R.L. Estimation of global ground heat flux. *J. Hydrometeorol.*, 2008, vol. 9, no. 4, pp. 744–759.
12. Beltrami H. Surface heat flux histories from inversion of geothermal data: Energy balance at the Earth's surface. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2001, vol. 106, no. B10, pp. 21979–21993.
13. Beltrami H., Smerdon J.E., Pollack H.N., and Huang S. Continental heat gain in the global climate system. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, vol. 29, no. 8, pp. 81–83.
14. Berger A., Loutre M.F. Insolation values for the climate of the last 10 million of years. *Quat. Sci. Rev.*, 1991, vol. 10, no. 4, pp. 297–317. [http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD\\_EARTH\\_LAND\\_NGDC\\_PALEOCLIM\\_INSOL.html](http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD_EARTH_LAND_NGDC_PALEOCLIM_INSOL.html).
15. Bodri L., Cermak V. *Borehole climatology. A new method on how to reconstruct climate*. Elsevier Science, 2007.
16. Cermak V. Underground temperature and inferred climatic temperature of the past millennium. *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.*, 1971, no. 10, pp. 1–19.
17. Dahl-Jensen D., Mosegaard K., Gundestrup N., Clow G.D., Johnsen S.J., Hansen A.W., and Balling N. Past temperatures directly from the Greenland Ice Sheet. *Science*, 1998, no. 282, pp. 268–271.
18. Demezhko D. Yu., Golovanova I.V. Climatic changes in the Urals over the past millennium – an analysis of geothermal and meteorological data. *Climate of the Past*, 2007, no. 3, pp. 237–242.
19. Demezhko D.Y., Gornostaeva A.A. Late Pleistocene–Holocene ground surface heat flux changes reconstructed from borehole temperature data (the Urals, Russia). *Climate of the Past*, 2015, no. 11, pp. 647–652.
20. Demezhko D. Yu., Gornostaeva A.A., Tarkhanov G.V., and Esipko O.A. 30000 years of ground surface temperature and heat flux changes in Karelia reconstructed from borehole temperature data. *Bull. Geogr.*, 2013, no. 6, pp. 7–25.
21. Demezhko D. Yu., Shchapov V.A. 80000 years ground surface temperature history inferred from the temperature-depth log measured in the superdeep hole SG-4 (the Urals, Russia). *Global and Planetary Change*, 2001, vol. 29, no. 1–2, pp. 219–230.
22. Douglass D.H., Knox R.S. Ocean heat content and Earth's radiation imbalance. II. Relation to climate shifts. *Phys. Lett. A*, 2012, vol. 376, no. 14, pp. 1226–1229.
23. Dreyfus G.B., Parrenin F., Lemieux-Dudon B., Durand G., Masson-Delmotte V., Jouzel J., Barnola J.-M., Panno L., Spahni R., Tisserand A., Siegenthaler U., and Leuenberger M. Anomalous flow below 2700m in the EPICA Dome C ice core detected using 18O of atmospheric oxygen measurements. *Climate of the Past*, 2007, no. 3, pp. 341–353.
24. Durham W.B., Mirkovich V.V., and Heard H.C. Thermal diffusivity of igneous rocks at elevated pressure and temperature. *J. Geophys. Res. Solid Earth* (1978–2012), 1987, no. 92, pp. 11615–11634.
25. Fudge T.J., Waddington E.D., Conway H., Lundin J.M.D., and Taylor K. Interpolation methods for Antarctic ice-core timescales: application to Byrd, Siple Dome and Law Dome ice cores. *Climate of the Past*, 2014, no. 10, pp. 1195–1209, doi:10.5194/cp-10-1195-2014.
26. Gornostaeva A.A., Demezhko D. Yu. Recovery from the Little Ice Age in the Urals and Eastern Europe: Geothermal evidences. *Geogr., Env., Sustainability*, 2013, vol. 6, no. 01, pp. 29–36.
27. Huang S. 1851–2004 annual heat budget of the continental landmasses. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, no. 33, L04707, doi:10.1029/2005GL025300.
28. Huang S., Pollack H.N., and Shen P.-Y. Temperature trends over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures. *Nature*, 2000, vol. 403, pp. 756–758.

29. Lachenbruch A.H., Marshall B.V. Changing climate: Geothermal evidence from permafrost in the Alaska Arctic. *Science*, 1986, vol. 234, pp. 689–696.
30. Martinson D.G., Pisias N.G., Hays J.D., Imbrie J., Moore T.C., and Shackleton N.J. Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0–300000 years chronostratigraphy. *Quat. Res.*, 1987, vol. 27, pp. 1–30.
31. Parrenin F., Barnola J.-M., Beer J., Blunier T., Castellano E., Chappellaz J., Dreyfus G., Fische H., Fujita S., Jouzel J., Kawamura K., Lemieux-Dudon B., Loulergue L., Masson-Delmotte V., Narcisi B., Petit J. R., Raisbeck G., Raynaud D., Ruth U., Schwander J., Severi M., Spahni R., Steffensen J.P., Svensson A., Udisti R., Waelbroeck C., and Wolff E. The EDC3 chronology for the EPICA Dome C ice core. *Climate of the Past*, 2007, no. 3, pp. 485–497. doi:10.5194/cp-3-485-2007.
32. Peixóto J.P., Oort A.H. Physics of climate. *Rev. Mod. Phys.*, 1984, vol. 56, no. 3, pp. 365–429.
33. Pielke Sr.R.A. Heat storage within the Earth system. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 2003, vol. 84, no. 3, pp. 331–335.
34. Pollack H.N., Huang S., and Smerdon J.E. Five centuries of climate change in Australia: The view from underground. *J. of Quat. Sci.*, 2006, vol. 21, no. 7, pp. 701–706.
35. Shackleton N. The 100,000-year ice-age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity. *Science*, 2000, vol. 289, pp. 1897–1902.
36. Wang J., Bras R.L. Ground heat flux estimated from surface soil temperature. *J. Hydrol.*, 1999, vol. 216, pp. 214–226.