

На правах рукописи



Горностаева Анастасия Александровна

**РЕКОНСТРУКЦИЯ КЛИМАТИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ
ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ЧЕРЕЗ ЗЕМНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ПО
ГЕОТЕРМИЧЕСКИМ ДАННЫМ**

Специальность 25.00.10 –
«Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург
2017

Работа выполнена в лаборатории геодинамики ФГБУН «Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук».

Научный руководитель:

Демежко Дмитрий Юрьевич,
доктор геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории геодинамики
ФГБУН Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича
Уральского отделения Российской академии наук

Официальные оппоненты:

Голованова Инесса Владимировна,
доктор физико-математических наук, главный научный
сотрудник ФГБУН Институт геологии Уфимского
научного центра РАН (Уфа)

Захаров Вячеслав Иосифович,
доктор физико-математических наук, заведующий
лабораторией физики климата и окружающей среды
Института естественных наук и математики ФГАОУ,
Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург)

Ведущая организация:

ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН (Новосибирск)

Защита диссертации состоится «26» июня 2017 г в 11-00 часов на заседании Диссертационного Совета Д 004.009.01 в ФГБУН Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН по адресу: 620016, Россия, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН и на сайте www.igeoph.net.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ваш отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью, просим направлять по адресу: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, ИГФ УрО РАН, учёному секретарю диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 004.009.01,
д.ф.-м.н., профессор

Хачай Ю.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Изучение палеоклимата Земли является весьма актуальной задачей современных климатических исследований. Вариации климата, происходившие в далеком прошлом, являются «нормой», характеризующей естественную изменчивость климата Земли, то есть поведение климатической системы в отсутствии человеческого фактора. Знание этой «нормы» чрезвычайно важно для определения соотношения естественных и антропогенных факторов в современном глобальном потеплении и для прогноза будущих климатических изменений.

При реконструкции палеоклимата чаще всего анализируется изменение температуры приземного воздуха или земной поверхности в глобальном или региональном масштабах. Однако в некоторых случаях температура не является достаточно информативным параметром. Например, при оценке климатической реакции на изменение внешнего радиационного воздействия, поскольку температурный отклик всегда происходит с задержкой.

Существует другая климатическая характеристика – дополнительный тепловой поток через земную поверхность, индуцированный внешней радиацией (SHF – surface heat flux). Этот тепловой поток определяет изменение теплосодержания океанов и литосферы, а они, в свою очередь, – долговременные климатические изменения. Поскольку тепловой поток, в отличие от температуры, является энергетической характеристикой климата (измеряемой в $\text{Вт}/\text{м}^2$), его можно напрямую сопоставлять с радиационными факторами – инсоляцией, солнечной радиацией, парниковым эффектом, также выражаемыми в $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Климатически обусловленный тепловой поток является разностью больших значений основных элементов теплового баланса земной поверхности (приходящей прямой радиации и уходящих явных и скрытых потоков тепла). По этой причине даже его современные значения оцениваются с большими погрешностями, не говоря уже об оценках теплового баланса в прошлом.

Уникальную возможность оценить вариации теплового потока через земную поверхность, происходившие в далеком прошлом, дает геотермический метод реконструкции палеоклимата, основанный на анализе данных скважинной термометрии. До недавнего времени этот метод использовался исключительно для реконструкции температурных историй земной поверхности (Cermak, 1971; Lachenbruch, Marshall, 1986; Beltrami, Mareschal, 1992; Harris, Chapman, 1995; Bodri, Cermak, 1995; Dahl-Jensen et al.,

1998; Pollack, Huang, 2000). На возможность реконструкции вариаций теплового потока через земную поверхность обратили внимание сравнительно недавно (Beltrami, 2000; 2002; Huang, 2006). Однако информационный потенциал геотермического метода применительно к данной климатической характеристики в полной мере до сих пор не раскрыт. Настоящая работа представляет собой попытку развития этого направления исследований за счет создания комплексного подхода к получению и интерпретации реконструкций теплового потока через земную поверхность по геотермическим данным.

Разработанность темы исследований

Геотермический метод реконструкции палеоклимата изначально выделился как одно из направлений геотермии. Первые работы, посвященные реконструкции температуры земной поверхности (GST – ground surface temperature), относятся к 1930–1940 гг. (Hotchkiss and Ingersoll, 1934; Birch, 1948). Однако до середины 1980-х гг. наблюдаемые на многих термограммах палеоклиматические аномалии рассматривались геофизиками как неизбежные помехи, которые необходимо было учитывать при определении глубинного теплового потока. После того, как было накоплено значительное число термограмм в Северном полушарии, стало очевидно, что почти все они в верхней своей части имеют положительную аномалию, которую исследователи объяснили глобальным потеплением XX века. В работе (Lachenbruch, Marshall, 1986) стала отправной точкой для развития палеоклиматического анализа геотермических данных как отдельного направления исследований.

Развитие геотермического метода реконструкции палеоклимата происходило одновременно по нескольким основным направлениям.

- Разработка и совершенствование методов инверсии скважинных термограмм в температурные вариации прошлого (Lachenbruch, Marshall, 1986; Shen, Beck, 1991; Beltrami, Mareschal, 1992; Wang, 1992; Bodri, Cermak, 1995; 1997; Shen et al., 1996; Dahl-Jensen et al., 1998; Дмитриев и др., 1999; Демежко, 2001; Rath et al., 2002).

- Региональные реконструкции температурных историй (Beltrami, Mareschal, 1992; Harris, Chapman, 1995; Bodri, Cermak, 1995; Kukkonen et al., 1998; Сухорукова, Дучков, 1998; Huang et al., 2000; Pollack, Huang, 2000; Голованова и др., 2000; Majorowicz, Safanda, 2001; Демежко, 2001; Pollack et al., 2006) и их глобальные обобщения (Pollack, Huang, Shen, 1998; Huang et al., 2000; Majorowicz et al., 2002; Bodri, Cermak, 2007). Одной из самых значимых работ в этом направлении стала база данных имеющихся в мире скважинных температурных профилей и реконструированных на их основе температурных историй земной поверхности (Huang, Pollack, 1998). Эта база данных была размещена в открытом

доступе, и, таким образом, стала важным источником информации для исследователей во всем мире.

- Изучение влияния различных факторов неклиматической природы (распашка земель, обезлесение территорий, появление городских островов тепла, гидрогеологические явления и пр.) на тепловое поле разреза (Taniguchi et al., 1999; Ferguson, Beltrami, 2006; Демежко и др., 2006; Balobaev et al., 2008). Исследование соотношения между температурами земной поверхности и приземного воздуха, а также влияния снежного покрова на это соотношение (Gosnold et al., 1997; Schmidt et al., 2001; Beltrami, Kellman, 2003; Smerdon et al., 2004; 2006; Pollack et al., 2005).
- Появляются попытки интеграции скважинных реконструкций с температурными историями, полученными по косвенным свидетельствам (Huang, 2006; Демежко, Соломина, 2009).

В начале XXI века наметилось новое направление палеоклиматического анализа геотермических данных, связанное с оценками вариаций климатически обусловленного теплового потока через земную поверхность (SHF). В работах (Wang, Bras, 1998; 1999; Beltrami et al., 2000; Beltrami, 2001) была обозначена важность реконструкций SHF в контексте изучения энергетики климатических процессов и факторов, определяющих естественную и антропогенную составляющие климатической изменчивости. Однако существующими немногочисленными результатами информационный потенциал метода далеко не исчерпан.

Основной целью исследования является создание комплексного подхода к изучению вариаций теплового потока через земную поверхность в прошлом, включая обоснование возможности реконструкции, разработку методики восстановления палеоклиматических вариаций теплового потока по геотермическим данным, получение новых региональных реконструкций историй изменения температуры и потока, а также обоснование основных подходов к их интерпретации.

Задачи исследования:

- Теоретическое обоснование и разработка алгоритма реконструкции климатически обусловленных вариаций теплового потока через земную поверхность по данным об изменении температуры; его апробация на синтетических примерах, оценка точности реконструкции, сопоставление с существующими подходами.
- Теоретическое обоснование нового подхода к построению временной шкалы геотермических реконструкций на основе совместной реконструкции

температурной истории земной поверхности и вариаций теплового потока через поверхность. Разработка геотермической версии метода орбитальной корректировки временной шкалы (orbital tuning).

- Разработка основных подходов к палеоклиматической интерпретации получаемых реконструкций теплового потока и их верификации.
- Программная реализация разработанных алгоритмов оценки изменений теплового потока через земную поверхность и корректировки временной шкалы геотермических реконструкций.
- Получение новых геотермических реконструкций температуры и климатически обусловленного теплового потока и их палеоклиматическая интерпретация.

Теоретическая и практическая значимость

Геотермические реконструкции изменений теплового потока через земную поверхность существенно расширяют интерпретационные возможности палеоклиматических исследований и, в конечном итоге, способствуют лучшему пониманию функционирования климатической системы Земли.

Оценки климатически обусловленных изменений теплового потока могут быть полезны при разработке и совершенствовании моделей общей циркуляции атмосферы.

Разработанный алгоритм и программное обеспечение могут быть использованы не только для палеоклиматического анализа геотермических данных, но и при оценке вариаций потока тепла в суточном и годовом цикле по данным инструментальных температурных наблюдений. Непосредственное измерение этих потоков (с помощью тепломеров) весьма трудоемко.

Исследования в этой области важны и для понимания механизмов теплообмена между геосферами.

Методы исследований

В основе метода и алгоритма оценки SHF по имеющемуся температурному ряду лежат аналитические решения уравнения теплопроводности, связывающие тепловой поток и температуру на земной поверхности для простых моделей их изменений. Оценка точности алгоритма реконструкции SHF производилась с помощью синтетических (рассчитанных на основе известных теоретических решений) и экспериментальных данных.

Для оптимальной корректировки временной шкалы палеотемпературных реконструкций использовались статистические методы анализа (построение взаимной

корреляционной функции между изменениями теплового потока и внешнего радиационного воздействия).

Программная реализация алгоритма GST-SHF трансформации и орбитальной корректировки геотермических реконструкций палеоклимата осуществлялась средствами объектно-ориентированного программирования.

Интерпретация геотермических реконструкций теплового потока и температуры земной поверхности предполагает привлечение широкого круга палеоклиматических данных (как теоретических – данных об инсоляции, так и экспериментальных – информации о концентрации двуокиси углерода и вулканических сульфатов в атмосфере). Для количественной оценки относительного вклада различных факторов в реконструированный поток применялся множественный линейный регрессионный анализ. Вклад каждого регрессора определялся по соотношениям стандартизованных коэффициентов регрессии (бета-коэффициентов).

На защиту выносятся следующие положения:

1. Вариации климатически обусловленного теплового потока через земную поверхность в прошлом являются важным индикатором климатических процессов, позволяющим оценивать их энергетику и чувствительность климата Земли к внешним радиационным воздействиям. Реконструкции теплового потока через земную поверхность могут быть получены на основе анализа данных скважинной геотермии или ранее реконструированных изменений температуры земной поверхности.
2. Совместная реконструкция температурной истории земной поверхности и климатически обусловленных вариаций теплового потока позволяет обосновать временную шкалу геотермических реконструкций путем сопоставления теплового потока и изменений внешних радиационных факторов климата.
3. Полученные реконструкции изменений теплового потока через земную поверхность на Урале, в Карелии, в Канаде показали, что основным фактором, определяющим глобальные климатические изменения масштаба $n10^3$ - $n10^5$ лет в исследованных районах, является изменение солнечной радиации (инсоляции, солнечной активности). В вековых колебаниях климата значение солнечной радиации ослабевает.

Научная новизна

1. Теоретически обоснована возможность реконструкции новой палеоклиматической характеристики - изменений теплового потока через земную поверхность – и ее палеоклиматическая информативность.
2. Разработан и программно реализован алгоритм оценки изменений теплового потока через земную поверхность по данным об изменениях температуры поверхности. В сравнении с существующим алгоритмом (Beltrami et al., 2002) предложенный алгоритм более универсален и обеспечивает большую точность восстановления истории изменения теплового потока.
3. Предложен новый показатель климатической чувствительности Земли к внешним радиационным воздействиям, представляющий безразмерное отношение приращений тепловых потоков – через земную поверхность и внешнего потока радиации.
4. Впервые разработана и программно реализована методика построения временных шкал геотермических реконструкций температуры и потока, основанная на синхронизации теплового потока и изменений внешних радиационных факторов климата путем корректировки коэффициента эффективной температуропроводности пород. Методика представляет собой адаптированную версию орбитальной корректировки (*orbital tuning*) палеотемпературных кривых.
5. Впервые получены реконструкции климатически обусловленных изменений теплового потока через земную поверхность длительностью 30 тысяч лет (Урал, Карелия, Канада).
6. Впервые проведено сопоставление вариаций климатически обусловленного теплового потока с различными факторами внешнего радиационного воздействия, такими как изменение инсоляции, солнечной радиации, вариации концентрации двуокиси углерода CO₂ и вулканических сульфатов SO₄ в атмосфере. Основным фактором, определяющим глобальные климатические изменения масштаба $n10^3$ - $n10^5$ лет в исследованных районах, является изменение солнечной радиации (инсоляции, солнечной активности). В вековых колебаниях климата значение солнечной радиации ослабевает, и ведущую роль начинает играть изменения концентрации двуокиси углерода в атмосфере.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов представленной работы обеспечивается за счет использования аппарата математической физики, стандартных математических и статистических методов анализа данных, подтверждается результатами экспериментальных исследований, хорошим согласием с косвенными палеоклиматическими свидетельствами.

Апробация результатов работы

Основные результаты исследований по теме диссертации лично докладывались автором на 13 научных конференциях, в том числе 9 российских и 4 международные:

- Генеральная Ассамблея Европейского союза по наукам о Земле (EGU – 2014), Австрия, Вена;
- Совместная Ассамблея Международного союза по геодезии и геофизике IAHS-IAPSO-IASPEI «Knowledge for the future», 2013, Гетеборг, Швеция;
- Международная конференция “Climate variability and human impacts in Central and Eastern Europe during the last two millennia”, 2015, Гданьск, Польша;
- Международная конференция молодых ученых «Land-Ocean-Atmosphere interactions in the Changing World», 2011, Балтийск, Россия;
- Школа-конференция молодых ученых «Изменения климата и окружающей среды Северной Евразии: анализ, прогноз, адаптация», 2014, Кисловодск, Россия;
- Уральская молодежная научная школа по геофизике (2010, 2012, 2014, 2016 – Екатеринбург, 2011 – Пермь), Россия;
- Научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей (2011, 2013, 2015), Екатеринбург, Россия.

Результаты по теме работы также докладывались автором на совместном семинаре лаборатории эволюционной географии и отдела гляциологии Института географии РАН в г. Москва в 2014 году.

Связь с плановыми работами

Работа над диссертацией выполнялась в рамках плановой темы НИР Института геофизики УрО РАН «Геотермические и геодинамические исследования процессов взаимодействия геосфер на основе изучения теплового поля и полей концентрации

радиогенных газов» (№ ГР 01201263784), а также проектов РФФИ №13-05-00724-а, №14-05-31055 мол_а, №16-05-00086).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 33 работы, в том числе 7 публикаций в изданиях, входящих в перечень ВАК и/или международные системы цитирования Scopus и Web of Science, и 17 публикаций, входящих в РИНЦ.

Кроме того, на основе предложенных в работе методов и подходов создана и зарегистрирована программа для ЭВМ “PaleoTHF” (свидетельство о регистрации №2015660106 от 22.09.2015).

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключается в:

- создании алгоритмов трансформации изменений температуры земной поверхности в изменения теплового потока;
- создании методики орбитальной корректировки временных шкал геотермических реконструкций палеоклимата (в рамках проекта РФФИ №14-05-31055 мол_а, руководитель – А.А. Горностаева);
- разработке и написании программы для ЭВМ, реализующей вышеназванные процедуры, в соавторстве с А.Н. Антипиным (вклады соавторов равны);
- получении ряда длительных реконструкций историй изменения теплового потока через земную поверхность на Урале, в Карелии и в Канаде (самостоятельно) и их палеоклиматической интерпретации (совместно с Д.Ю. Демежко, Я. Майоровичем, Я. Шафандой);

В статьях, написанных в соавторстве, вклад авторов одинаков.

Объем и структура диссертации

Общий объем диссертации 127 страниц. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 180 наименование. Работа включает 32 рисунка, 5 таблиц.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю д.г.-м.н. Д.Ю. Демежко за предложенную идею исследований. Тесное сотрудничество автора с Д.Ю. Демежко началось еще в период обучения в Уральском государственном университете им. А.М. Горького и во многом определило дальнейшую специализацию автора. Особую благодарность автор выражает м.н., профессору Ю.В. Хачаю за методическую помощь в период начального знакомства с геофизикой, а также за полезные замечания и рекомендации на разных этапах работы. Автор также признателен А.Н. Антипину, в соавторстве с которым была создана компьютерная программа для проведения исследований по теме диссертации, сотрудникам лаборатории геодинамики ИГФ УрО РАН, а также коллегам, принимавшим участие в обсуждении результатов исследований – И.В. Головановой, О.Н. Соломиной, М.Д. Хуторскому, В.Н. Михаленко, Ю.А. Попову, J. Safanda, J. Majorowicz, V. Cermak, S. Huang, V. Rath, V. Hamza, L. von Gunten и др.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** раскрывается актуальность работы, разработанность темы исследований, теоретическая и практическая значимость, научная новизна, формулируются цели и задачи исследования и защищаемые положения.

Первое защищаемое положение раскрывается в Главах 1, 2 и 3.

Глава 1 посвящена вопросу формирования теплового поля верхней части земной коры, которое зависит от распределения источников тепла в земной коре, условий теплопередачи в горных породах, а также режима теплообмена на земной поверхности и вблизи нее.

На земной поверхности приток тепла вследствие поглощения солнечной и атмосферной радиации, отдача тепла путем собственного излучения и нерадиационный теплообмен между атмосферой, земной поверхностью и нижележащими слоями почвы должны уравновешиваться. Однако при рассмотрении многолетних трендов тепловой баланс земной поверхности не будет нулевым вследствие изменений условий на поверхности (влияния климата, изменения альбедо Земли и пр.). Разница между приходящей радиацией и уходящими потоками явного и скрытого тепла идет на изменение теплосодержания верхней части земной коры.

Поступление тепла к поверхности Земли обеспечивается не только приходящим солнечным излучением, но и потоком тепла из внутренних оболочек Земли. Внутренние источники тепла формируют стационарное тепловое поле верхней части земной коры. Однако длительное существование стационарного теплового режима возможно только при постоянстве температуры земной поверхности или теплового потока через поверхность. Изменение климата нарушает постоянство граничных условий, формируя нестационарную компоненту теплового поля разреза. Кроме климатических изменений в формировании теплового режима верхней части земной коры участвуют гидрогеологические явления, рельеф земной поверхности, процессы таяния и замерзания поровой влаги, локальные аномалии температуры поверхности. Процесс бурения и промывки скважины также нарушает стационарный тепловой режим разреза.

В Главе 2 описываются принципы и методы реконструкции температурной и тепловой истории земной поверхности по геотермическим данным.

Реконструкция палеотемператур по скважинным термограммам основана на решении обратной задачи теплопроводности относительно параметров граничных условий, в качестве которых выступают изменения GST и невозмущенного геотермического градиента на глубине, где затухает климатически обусловленная температурная аномалия. Вариации GST аппроксимируются простыми функциями, для которых в явном виде имеется аналитическое решение уравнения теплопроводности. В случае линейности этого решения относительно неизвестных параметров граничных условий для каждой точки термограммы можно составить уравнение, содержащее $m+2$ неизвестных (m параметров GST истории, начальная температура поверхности и невозмущенный геотермический градиент). Тогда задача инверсии сводится к решению системы линейных уравнений:

$$\vec{T}_j = A_{jk} \vec{X}_k, \quad j = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, m+2}, \quad (1)$$

где \vec{T}_j – вектор измеренных температур на глубинах z , A_{jk} – матрица решений уравнения теплопроводности, \vec{X}_k – вектор неизвестных параметров (Демежко, 2001).

Данная система уравнений является переопределенной, поскольку число измерений по скважине n , как правило, больше числа неизвестных параметров. Такая система уравнений может не иметь точного решения, поэтому задача состоит в нахождении оптимального набора значений параметров, который обеспечивал бы наименьшую в заданной метрике разницу наблюденных и вычисленных температур. Вместе с тем задача является условно корректной, то есть существует несколько решений, удовлетворяющих экспериментальным данным с одинаковой точностью.

Различные методы инверсии геотермических данных сводятся к: 1) способам задания функций, аппроксимирующих искомую температурную историю; 2) к выбору метода решения переопределенной системы уравнений и 3) к способу ограничения решения.

Перечислим наиболее распространенные методы инверсии: анализ последнего события (Lachenbruch, Marshall, 1986), метод инверсии в функциональном пространстве (FSI; Shen, Beck, 1991), метод разложения по единичным значениям (SVD; Beltrami, Mareshal, 1991; Wang, 1992), метод Монте-Карло (Dahl-Jensen et al., 1998; Mareshal et al., 1999), метод, разработанный в ИГФ УрО РАН (Демежко, 2001).

Изменения теплового потока через земную поверхность можно реконструировать двумя способами (Beltrami, 2001; 2002). Первый способ – инверсия скважинных термограмм аналогично оценке температурных историй. Способ предполагает дифференцирование реально измеренного распределения температур. В этом случае даже малые погрешности измерения температуры будут вносить большие искажения в результирующий тепловой поток при дифференцировании. Другой способ – оценка вариаций теплового потока по уже реконструированным температурным историям.

В Главе 3 представлен разработанный алгоритм взаимной трансформации рядов изменений температуры земной поверхности и теплового потока через земную поверхность.

Алгоритм GST-SHF трансформации

На основе проведенных исследований нами был разработан алгоритм оценки изменений теплового потока по температурным данным, основанный на кусочно-полиномиальной аппроксимации температурного ряда (Горностаева, 2014).

В основе алгоритма лежит одномерное нестационарное уравнение теплопроводности (Карслоу, Егер, 1964)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2)$$

и закон Фурье, связывающий тепловой поток с изменением температуры поверхности:

$$q(0, t) = -\lambda \left. \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \right|_{z=0}. \quad (3)$$

Если температура поверхности представлена в виде трехпараметрического закона

$$T(0, t') = D(t')^{n/2} \quad , \quad (4)$$

где D – константа, n – положительное целое число (или 0), $t' = \frac{t - t_0}{t_n - t_0}$, t_0 – момент начала

температурных изменений, t_n – настоящее время, то выражение для температурной аномалии с глубиной будет иметь вид (Lachenbruch et al., 1982):

$$\begin{aligned} T_{an}(z, t') &= 2^n \Gamma\left(\frac{1}{2}n + 1\right) i^n \operatorname{erfc} \frac{z}{\sqrt{4at'}} T(0, t'), \\ &= \operatorname{erfc} \frac{z}{\sqrt{4at'}} \quad n = 0 \\ &= \sqrt{\pi} i \operatorname{erfc} \frac{z}{\sqrt{4at'}} \quad n = 1 \\ &= 4 i^2 \operatorname{erfc} \frac{z}{\sqrt{4at'}} \quad n = 2 \\ &= 6\sqrt{\pi} i^3 \operatorname{erfc} \frac{z}{\sqrt{4at'}} \quad n = 3 \end{aligned} \quad (5)$$

где $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ – коэффициент температуропроводности, $i^n \operatorname{erfc}(\beta)$ – кратный интеграл

вероятностей и $\Gamma(\beta)$ – Гамма-функция аргумента β . Дифференцирование уравнений (5) дает значение теплового потока через поверхность в виде функции

$$\begin{aligned} q(0, t') &= \frac{\Gamma\left(\frac{1}{2}n + 1\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{2}n + \frac{1}{2}\right)} \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{at'}} \cdot T(0, t') \\ &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\lambda}{\sqrt{at'}} T(0, t') = \frac{E}{\sqrt{\pi t'}} T(0, t'), \quad n = 0 \\ &= \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{\lambda}{\sqrt{at'}} T(0, t') = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{E}{\sqrt{t'}} T(0, t'), \quad n = 1 \\ &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\lambda}{\sqrt{at'}} T(0, t') = \frac{2E}{\sqrt{\pi t'}} T(0, t'), \quad n = 2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$= \frac{3}{4} \sqrt{\pi} \frac{\lambda}{\sqrt{at}} T(0, t) = \frac{3}{4} \sqrt{\frac{\pi}{t}} ET(0, t), \quad n = 3,$$

где E – тепловая активность пород.

Пусть некоторое произвольное изменение температуры земной поверхности оцифровано через равные промежутки времени Δt : $T_i = T(0, i)$, $t = i \cdot \Delta t$. Представим температурный ряд T_i в виде суммы элементарных изменений, соответствующих (4):

$$T_i = T_0 + \sum_{j=1}^i D_j (i - j + 1)^{\frac{n}{2}}. \quad (7)$$

Параметр n определяет модель аппроксимации температурной кривой. Если в соответствии с выбранным значением параметра n мы сможем рассчитать значения D_i по температурной кривой, тогда с помощью (4), (6) можно рассчитать и приращение теплового потока на каждом интервале $\{i-1; i\}$. Приведем общую формулу нахождения значения теплового потока q_i по температуре земной поверхности $T(0, t)$, заданной в виде ряда значений на концах равных временных интервалов Δt :

$$\begin{aligned} T_0 &= 0, \quad D_1 = T_1, \\ D_i &= T_i - \sum_{j=1}^{i-1} D_j (i - j + 1)^{\frac{n}{2}}, \\ q_i &= k(n) \sum_{j=1}^i D_j (i - j + 1)^{\frac{n-1}{2}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Существенному повышению точности восстановления теплового потока способствует расчет его среднего значения на интервале $\{i-1; i\}$:

$$\langle q_i \rangle = q_{i-1} + \frac{2}{n+1} (q_i - q_{i-1}). \quad (9)$$

Тестирование алгоритма на синтетическом примере синусоидальных колебаний температуры земной поверхности показало, что наилучшие результаты дают модели с $n = 2, 3$ (ошибка аппроксимации $< 5\%$). Экспериментальная проверка алгоритма также показала хорошее соответствие результатов мониторинга в приповерхностном слое грунта и рассчитанных с помощью алгоритма GST-SHF трансформации значений теплового потока (Горностаева, 2016).

SHF-GST трансформация

Алгоритм оценки палеотемператур по данным об изменении теплового потока через земную поверхность аналогичен процедуре GST–SHF трансформации.

Общая формула нахождения значения температуры земной поверхности T_i по тепловой истории $q(0, t)$, заданной в виде ряда значений теплового потока на концах равных временных интервалов Δt :

$$\begin{aligned} q_0 &= 0, \quad B_1 = q_1, \\ B_i &= q_i - \sum_{j=1}^{i-1} B_j (i-j+1)^{\frac{n-1}{2}}, \\ T_i &= T_0 + \frac{1}{k(n)} \sum_{j=1}^i B_j (i-j+1)^{\frac{n}{2}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где B_i – элементарное (без учета предыдущей тепловой истории) изменение теплового потока на i -м интервале.

Среднее значение температуры на интервале $\{i-1; i\}$:

$$\langle T_i \rangle = T_{i-1} + \frac{2}{n+2} (T_i - T_{i-1}). \quad (11)$$

Алгоритмы взаимной трансформации температуры и теплового потока были реализованы в виде блоков компьютерной программы PaleoTHF (Антипин, Горностаева, 2015).

Второе защищаемое положение раскрывается в Главе 4.

В Главе 4 излагается методика орбитальной корректировки временных шкал геотермических реконструкций палеоклиматата.

Одним из основных недостатков геотермического метода реконструкции палеоклиматата является низкая точность датировок реконструированных эпизодов климатической истории. Реконструкция изменений теплового потока через земную поверхность по геотермическим данным позволяет корректировать временную шкалу геотермических реконструкций путем синхронизации тепловых историй с орбитальными инсоляционными кривыми в предположении отсутствия временного сдвига между этими двумя энергетическими характеристиками.

Синхронизация сводится к совмещению кривых теплового потока и инсоляции 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 (Горностаева, Антипин, 2014; 2015).

Предложенный алгоритм орбитальной корректировки временных шкал геотермических реконструкций палеоклимата имеет существенное преимущество по сравнению с каноническим применением методики орбитальной подгонки (orbital tuning – Martinson et al., 1987; Shackleton, 2000; Bender, 2002; Parrenin et al., 2007): 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.

Ограничения методики:

- Методика наиболее применима к реконструкциям долговременных климатических изменений – порядка тысяч/десятков тысяч лет, поскольку этот временной масштаб обеспечен надежными теоретически рассчитанными данными об изменении инсоляции.
- Орбитальная корректировка не может применяться при исследовании пространственно-временных неоднородностей климатических изменений.
- Разработанный алгоритм следует использовать с осторожностью при анализе палеоклиматических реконструкций в районах древнейших оледенений, где предположение о мгновенной реакции теплового поля на изменение потока внешней радиации весьма неочевидно.

Процедура корректировки временных шкал геотермических палеоклиматических реконструкций была реализована в виде блока компьютерной программы PaleoTHF (Антипин, Горностаева, 2015).

Третье защищаемое положение раскрывается в Главе 5.

В Главе 5 содержатся региональные оценки изменений теплового потока через земную поверхность и их палеоклиматическая интерпретация.

Используя алгоритм реконструкции SHF по имеющимся температурным историям (Горностаева, 2014), описанный в главе 3, были получены палеоклиматические реконструкции теплового потока за последние 30 000 (на Урале, в Карелии и в Канаде), 1000 и 150 лет (на Урале).

Для реконструкции SHF за последние 30 000 и 1000 лет в качестве исходных данных использовались ранее полученные по геотермическим данным GST истории, а для периода последних 150 лет – метеорологические данные об изменениях температуры приземного воздуха. К полученным геотермическим палеоклиматическим реконструкциям была применена методика орбитальной подгонки, описанная в главе 4 (Горностаева, Антипин, 2014; 2015).

Реконструированные температурные и тепловые истории существенно различаются по форме и хронологии. Вариации теплового потока предшествуют температурным изменениям на поверхности вне зависимости от региона и рассматриваемого временного интервала.

На Урале сопоставление реконструированного SHF с различными факторами внешнего радиационного воздействия, среди которых – солнечная радиация, содержание вулканических сульфатов и двуокиси углерода в атмосфере, показало, что в масштабе десятков тысяч лет вариации теплового потока хорошо согласуются с изменениями инсоляции Северного полушария, а изменения содержания двуокиси углерода происходит позднее, синхронно с температурной реакцией, что свидетельствует об отсутствии значимого вклада парникового эффекта в плейстоцен-голоценовом потеплении (рис. 1; Demezhko, Gornostaeva, 2015a; 2015b; Демежко, Горностаева, 2014a; 2014б).

В период последнего тысячелетия солнечная радиация также является главным фактором изменений SHF, однако становится заметно влияние двуокиси углерода и вулканических сульфатов (рис.2; Демежко, Горностаева, 2014a; Demezhko, Gornostaeva, 2015b).

Вековые колебания теплового потока происходят в противофазе с колебаниями потока солнечной радиации. Наибольший вклад в вариации SHF вносит усиление парникового эффекта (рис.3; Демежко, Горностаева, 2014a; Demezhko, Gornostaeva, 2015b).

Отношение амплитуд изменений теплового потока и инсоляции составляет от ~1% в масштабе ледниково-межледниковых циклов до ~2% в последнее тысячелетие. Такое низкое значение свидетельствует в пользу того, что Земля отдает во внешнее пространство почти все дополнительное тепло, получаемое за счет вариаций внешнего радиационного воздействия. Данное отношение приращений тепловых потоков может рассматриваться как новый показатель климатической чувствительности Земли к внешним радиационным воздействиям.

Сравнительный анализ реконструированного в Карелии теплового потока с вариациями инсоляции северного полушария и содержания двуокиси углерода в атмосфере также показал, что в период 2.5–24 тыс. л.н. изменения температуры земной поверхности определялись, главным образом, солнечной радиацией, не смотря на присутствие Скандинавского ледникового щита в районе скважины (рис. 4; Демежко, Горностаева и др., 2013; Demezhko, Gornostaeva et al., 2013; Демежко, Горностаева, 2014б).

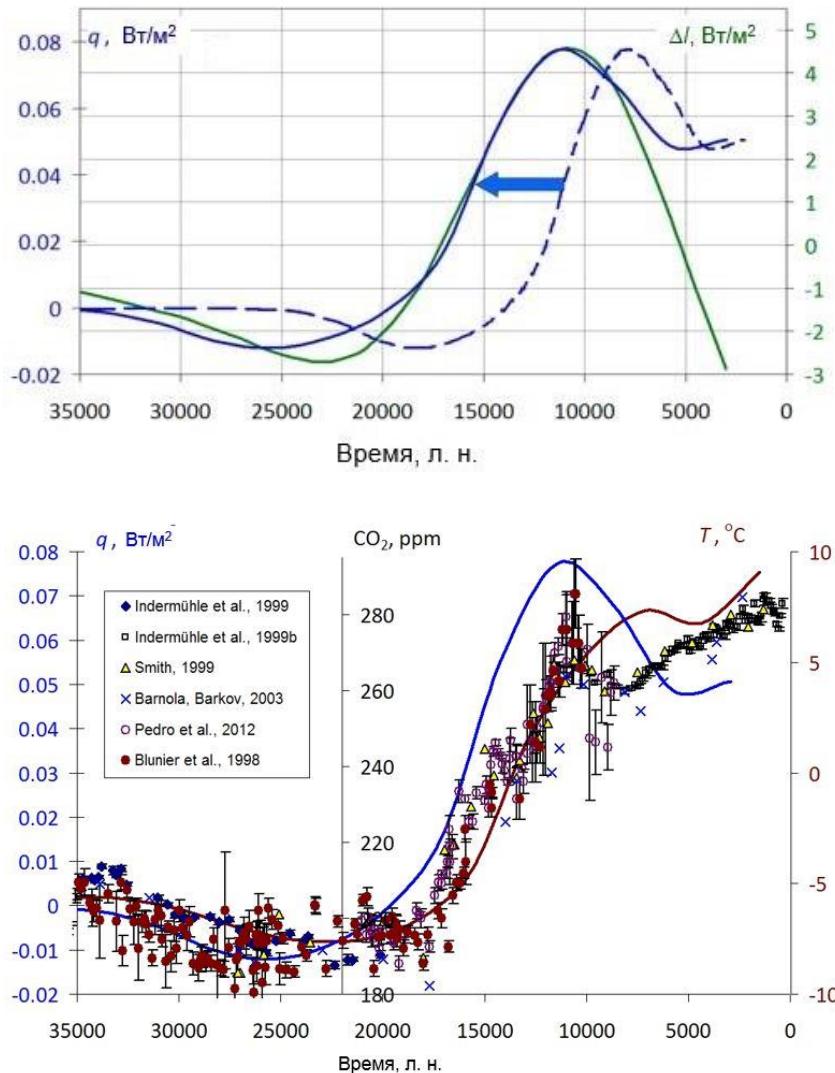


Рисунок 1.

Вверху – сопоставление изменений теплового потока через земную поверхность с вариациями инсоляции в северном полушарии, обусловленными изменениями параметров земной орбиты. Зеленая линия – кривая изменения среднегодовой инсоляции на широте 60° с.ш. (Berger, Loute, 1991), сглаженная в скользящих окнах переменной ширины; синяя штриховая линия – исходная история изменения SHF, реконструированная при $a = 1.0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; синяя сплошная линия – скорректированная с помощью методики орбитальной корректировки (см. главу 4) история изменения SHF ($a = 0.71 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$)

Внизу – сопоставление изменений GST – коричневая кривая, SHF – синяя кривая, и содержаний двуокиси углерода в антарктическом ледовом керне – разноцветные маркеры (Демежко, Горностаева, 2014а; Demezhko, Gornostaeva, 2015б)

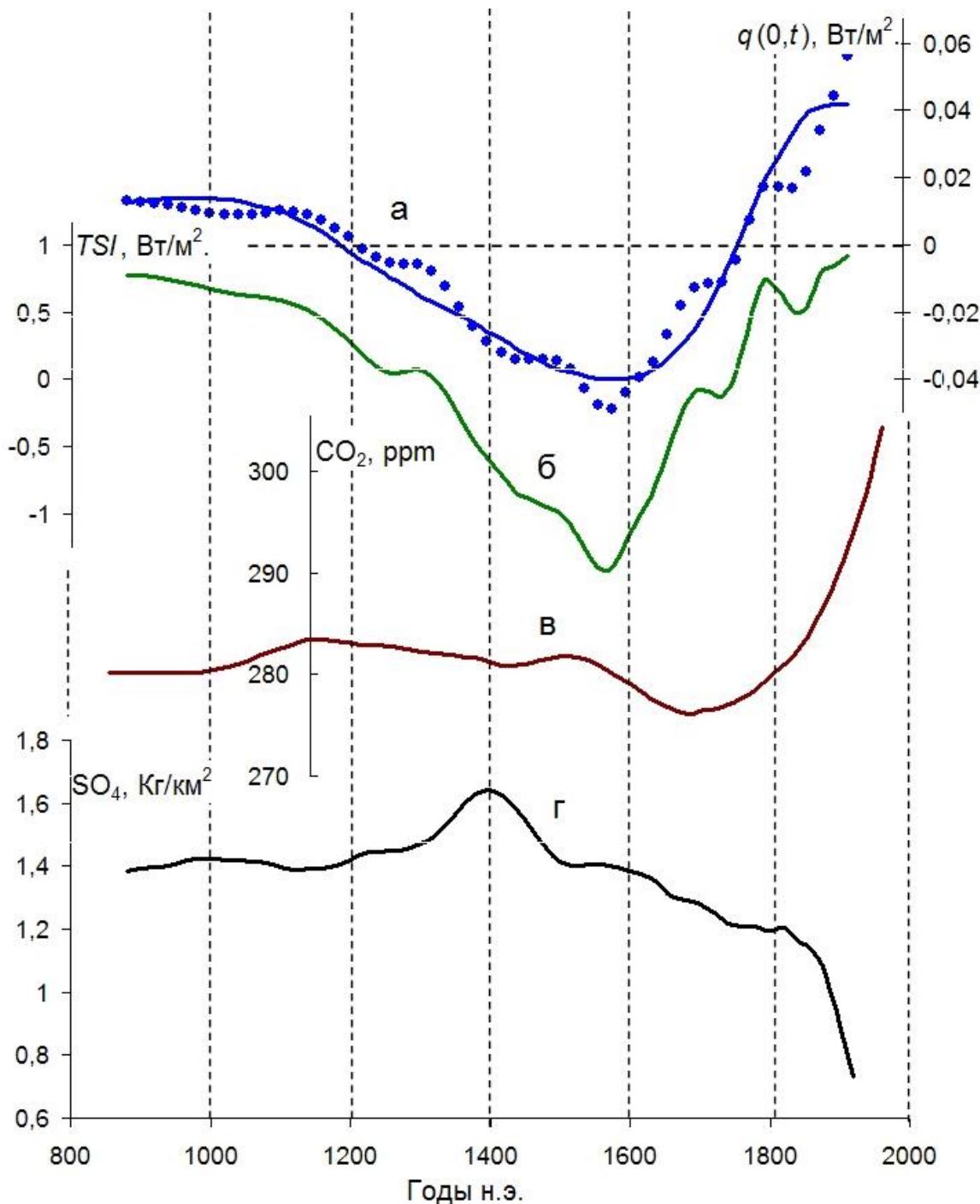


Рисунок 2. Сопоставление реконструированного теплового потока с факторами климатической изменчивости: а) сплошная линия – тепловой поток ($a = 0.93 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $E = 2700 \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}\cdot\text{с}^{-1/2}$); б) солнечная радиация; в) концентрация двуокиси углерода; г) вулканические сульфаты. Кривые б-г – сглаженные в скользящих окнах переменной ширины параметры. Синие точки – кривая SHF, построенная с помощью уравнения множественной регрессии (Демежко, Горностаева, 2014а; Demezhko, Gornostaeva, 2015б).

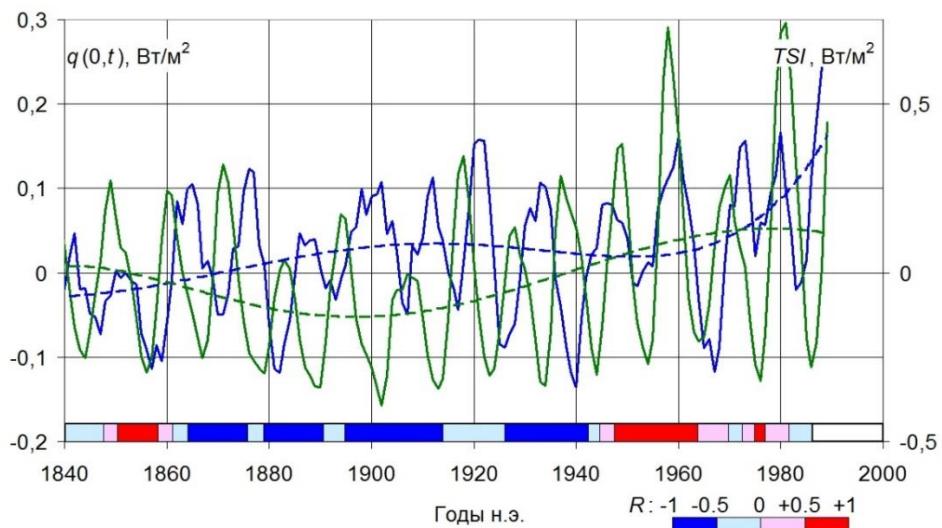


Рисунок 3. Сопоставление реконструированного SHF (синяя кривая) с изменениями потока солнечной радиации (в отклонениях от среднего значения за 1836 – 1991 гг., зеленая кривая, Lean, 2000). Пунктирные линии – аппроксимации полиномами 5-го порядка. В нижней части рисунка условными цветами обозначены изменения коэффициента парной корреляции $R(q, TSI)$, вычисленные в скользящих 11-летних окнах (Демежко, Горностаева, 2014а; Demezhko, Gornostaeva, 2015б).

Применение методики орбитальной корректировки (см. гл. 4) к канадским реконструкциям GST и SHF дало две версии временной шкалы геотермических реконструкций: хронология-I, основанная на измеренном значении коэффициента температуропроводности, и хронология-II, полученная путем синхронизации вариаций теплового потока с изменениями инсоляции (рис. 5, Демежко, Горностаева и др., 2015; Demezhko, Gornostaeva et al., 2017). Исследуемый район длительное время был покрыт Лаврентийским ледником. Для таких регионов достаточно сложно оправдать применение орбитальной корректировки, поскольку методика предполагает линейную зависимость между изменениями внешней радиации и поглощенного Землей теплового потока, что невозможно в условиях существования ледника на земной поверхности. Для верификации полученных хронологий привлекались независимые косвенные свидетельства: сведения о температурном режиме в основании Лаврентийского ледникового щита (Beltrami et al., 2014), данные об изменении высоты ледника (Licciardi et al., 1998; Peltier, 2004) и хронологии дегляциации (Dyke, 2004; Fisher et al., 2009). Хотя каждая из версий геотермических хронологий имеет свои слабые стороны, хронология-II подтверждается большим числом климатических свидетельств.

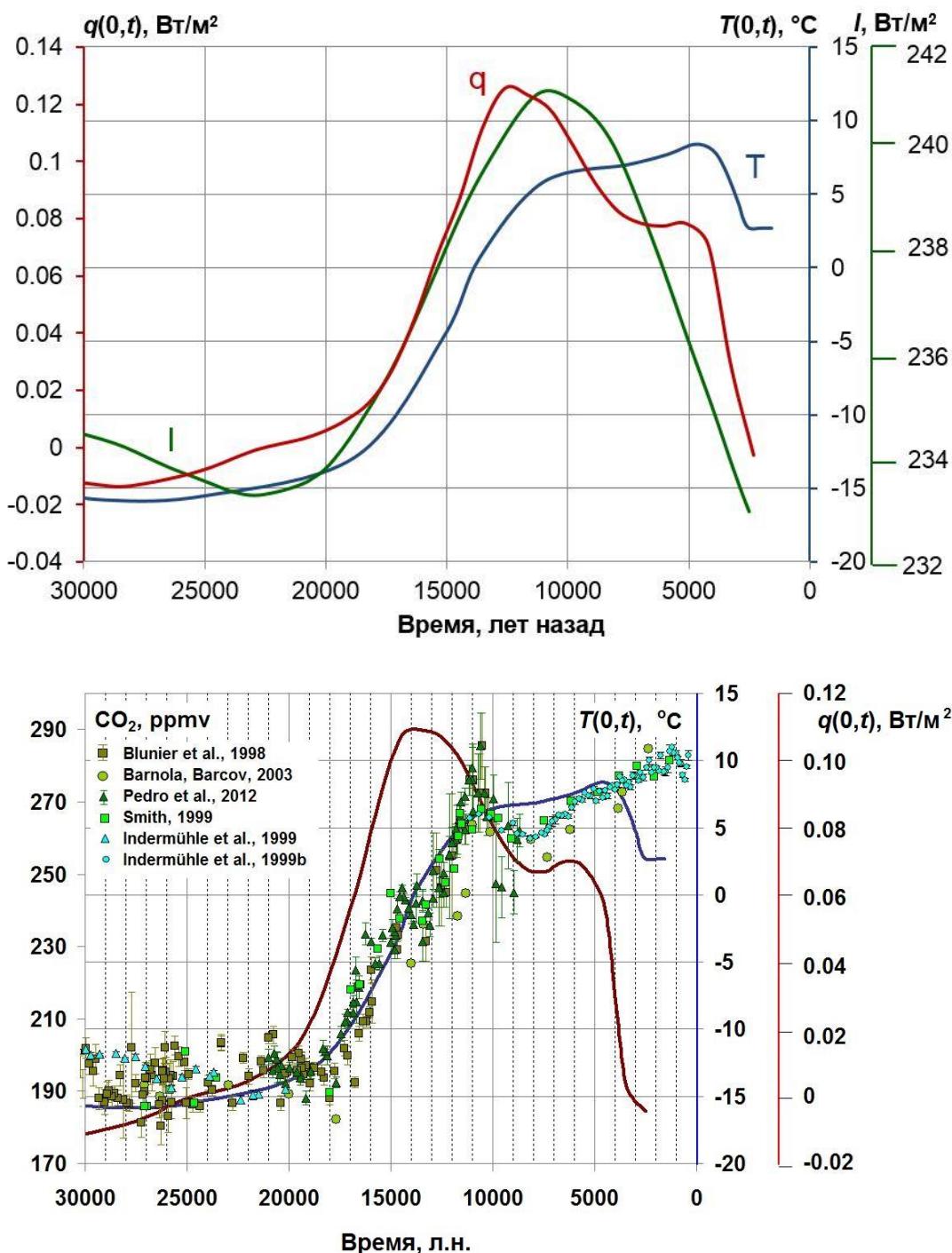


Рисунок 4.

Вверху – сопоставление реконструированных изменений GST (синяя кривая), SHF (красная кривая) и инсоляции (зеленая кривая) на широте 60° с.ш., определяемой изменениями параметров земной орбиты (Berger, Loutre, 1991).

Вверху – сравнение реконструированных изменений GST (синяя кривая), SHF (красная кривая) и содержаний двуокиси углерода в антарктическом ледовом керне (цветные маркеры) (Demezhko, Gornostaeva et al., 2013).

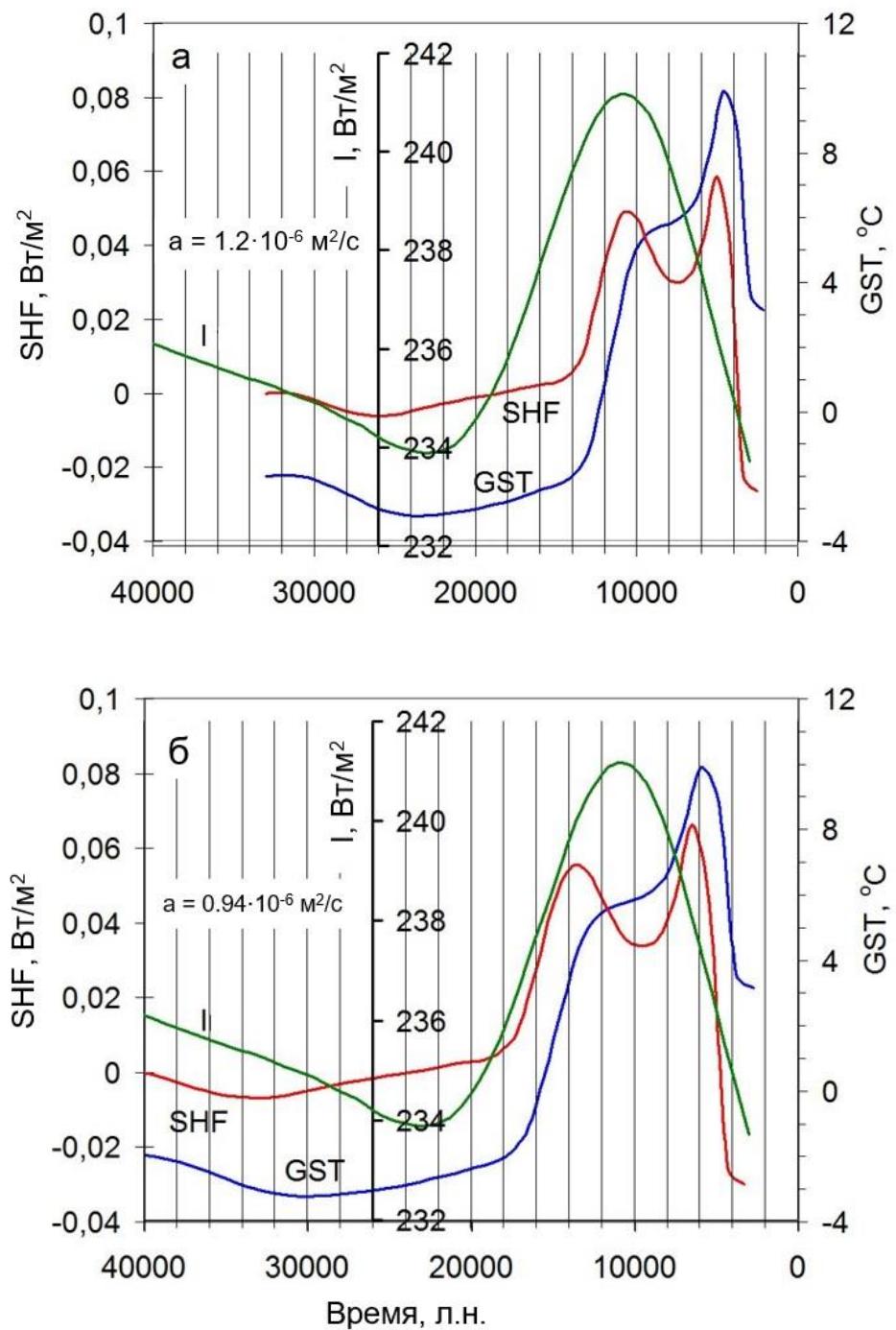


Рисунок 5. Две версии временной шкалы геотермических реконструкций GST и SHF в сравнении с изменениями среднегодовой инсоляции (I) на 60° с.ш. (Berger, Loutre, 1991).

а) Геотермическая хронология-I, соответствующая исходному значению коэффициента температуропроводности $a = 1.2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

б) Геотермическая хронология-II, соответствующая коэффициенту эффективной температуропроводности $a = 0.94 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, определенному по максимуму взаимной корреляции между изменениями SHF и инсоляции (Демежко, Горностаева и др., 2015).

Заключение.

В результате проведенных исследований была обоснована палеоклиматическая информативность изменений теплового потока через земную поверхность, а также теоретически обоснована возможность реконструкции этой характеристики по геотермическим данным. Разработанный алгоритм расчета SHF по температурным данным позволяет оценивать вариации SHF, используя реконструкции температуры земной поверхности, а также метеоданные (температуры приземного воздуха). Предложенный двухэтапный алгоритм расчета «термограмма – GST история – SHF история» обеспечивает более устойчивые результаты по сравнению с прямой инверсией геотермограмм в тепловую историю, так как позволяет проводить предварительное сглаживание температурных историй.

Являясь энергетической характеристикой климатических процессов, SHF может быть непосредственно сопоставлен с потоками энергии в атмосфере и на ее верхней границе. Совместный анализ SHF и различных характеристик внешнего радиационного воздействия дает возможность судить о вкладе того или иного фактора в изменение климата.

Соотношение SHF и потока внешней радиации предложено рассматривать как альтернативный показатель климатической чувствительности Земли. Безразмерное отношение потоков в меньшей степени зависит от времени радиационного воздействия, в отличие от традиционного показателя климатической чувствительности, описывающего температурную реакцию на внешнее радиационное воздействие.

Предложенная методика орбитальной корректировки геотермических реконструкций палеоклимата, основанная на синхронизации изменений SHF и инсоляции, позволяет скорректировать временную шкалу палеоклиматических реконструкций, варьируя значение коэффициента эффективной температуропроводности.

Применение разработанных алгоритмов GST-SHF трансформации и орбитальной корректировки позволило получить реконструкции изменений SHF на Урале, в Карелии и в Канаде за последние 30 000, 1000 и 150 лет. Изменения теплового потока опережают вариации температуры земной поверхности. Сопоставление полученных реконструкций SHF с различными источниками внешнего радиационного воздействия показало, что основным фактором, определяющим изменение теплового баланса земной поверхности в масштабе ледниково-межледниковых циклов, является солнечная радиация. Однако ее роль ослабевает по мере уменьшения временного масштаба рассматриваемых климатических изменений. На более коротких временных шкалах (порядка сотен лет и менее) активно проявляется внутренняя изменчивость климата и влияние обратных связей.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК и/или в международные системы цитирования Scopus и Web of Science:

1. Demezhko D.Yu., **Kotlovanova A.A.** Pre-industrial ground temperature changes in the Urals and Eastern Europe reconstructed from borehole temperature data /Proceedings of the 12th International GeoConference SGEM 2012, Albena, Bulgaria, 2012. V. 4, P. 387–393.
2. 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.
3. Демежко Д.Ю., **Горностаева А.А.** Реконструкция долговременных изменений теплового потока через земную поверхность по данным геотермии глубоких скважин //Геология и геофизика, 2014а. Т. 55, № 12. С. 1841–1846.
4. Демежко Д.Ю., **Горностаева А.А.** Реконструкция изменений теплового потока через земную поверхность на Урале по геотермическим и метеоданным //Геофизические процессы и биосфера, 2014б. Т. 13, № 4. С. 21–40.
5. 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, 2015a. V. 11. P. 647–652, doi:10.5194/cp-11-647-2015.
6. Demezhko D.Yu., **Gornostaeva A.A.** Reconstruction of Ground Surface Heat Flux Variations in the Urals from Geothermal and Meteorological Data // Investiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2015b. V. 51, No. 7. P. 723–736.
7. Demezhko D., **Gornostaeva A.**, Majorowicz J., Safanda J. Temperature and heat flux changes at the base of Laurentide ice sheet inferred from geothermal data (evidences from province of Alberta, Canada) // Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.), 2017. doi:10.1007/s00531-017-1464-y

Программные продукты:

8. Антипин А.Н., **Горностаева А.А.** Программа для ЭВМ «PaleoTHF», Свидетельство о государственной регистрации №2015660106 от 22.09.2015.

Публикации в прочих изданиях:

9. **Gornostaeva A.A.**, Demezhko D.Yu. Recovery from the Little Ice Age in the Urals and Eastern Europe: Geothermal evidences // Geography, Environment, Sustainability, 2013. V. 06, No. 01. P. 29–36.
10. **Горностаева А.А.**, Демежко Д.Ю. Анализ изменений температуры земной поверхности на Урале и в Восточной Европе в 18–19 веках по данным скважинной термометрии // Уральский геофизический вестник, 2013. № 2. С. 24–30.
11. Demezhko D.Yu., **Gornostaeva A.A.**, Tarkhanov G.V., 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. No. 6. P. 7–25.
12. **Горностаева А.А.** Алгоритм расчета изменений теплового потока через земную поверхность по данных об изменения температуры земной поверхности // Уральский геофизический вестник, 2014. № 1. С. 37–45.
13. Демежко Д.Ю., **Горностаева А.А.**, Майорович Я., Шафандя Я. Новый подход к палеоклиматической интерпретации данных термометрии 2,3 км скважины Hunt Well (Провинция Альберта, Канада) // Уральский геофизический вестник, №2(26), 2015. С. 29–40.

Материалы конференций:

14. **Котлованова А.А.** Исследование процессов теплопереноса в почве и горных породах по данным геотермического мониторинга / Одиннадцатая уральская молодежная научная школа по геофизике: Сборник науч. материалов. – Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2010. С. 126–128.
15. **Котлованова А.А.** Влияние параметра тепловой активности на распространение температурных волн в геологических средах / Двенадцатая уральская молодежная научная школа по геофизике: Сборник науч. материалов. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. С. 119–123.
16. **Котлованова А.А.**, Демежко Д.Ю. Роль тепловой активности в распространении температурных колебаний в геологической среде / Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Шестые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. Материалы конференции. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. С. 211–213.
17. **Kotlovanova A.**, Demezhko D. Recovery from the Little Ice Age in the Urals and Eastern Europe: Geothermal evidences / International Conference of Young Scientists “Land-Ocean-Atmosphere Interactions in the Changing World” – Abstracts, the Vistula Spit, Russia, September 5–10, 2011. P. 42.

18. Demezhko D.Yu., **Kotlovanova A.A.** A Role of Thermal Effusivity in Heat Transfer through the Upper Active Layer / XXV International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly (IUGG), 28 June – 7 July 2011, Melbourne, Australia – Abstracts on memory stick.
19. Demezhko D.Yu., **Kotlovanova A.A.**, Khachay Yu.V. Geothermal evidences of pre-industrial ground temperature changes in the Urals and Eastern Europe / Geophysical Research Abstracts, V. 14, EGU2012-7609-1, 2012, EGU General Assembly 2012.
20. **Котлованова А.А.** Анализ изменений температуры земной поверхности на Урале и в Восточной Европе в 17–19 вв. по данным скважинной термометрии / XIII уральская молодежная научная школа по геофизике: Сборник докладов. – Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2012. С. 104–107.
21. **Gornostaeva A.A.**, Demezhko D.Yu. Reconstruction of long-term ground surface heat flux histories in Russia from geothermal data / IAHS/IAPSO/IASPEI Joint Assembly «Knowledge for the future» 2013, 21 – 29 July 2013, Goteborg, Sweden – Abstracts on memory stick.
22. Demezhko D.Yu., **Gornostaeva A.A.**, Glazachev I.V. Thermal effusivity: a new old geothermal parameter. Utilization and measurement / IAHS/IAPSO/IASPEI Joint Assembly «Knowledge for the future» 2013, 21 – 29 July 2013, Goteborg, Sweden – Abstracts on memory stick.
23. **Горностаева А.А.**, Демежко Д.Ю. Изменение теплового баланса земной поверхности в период глобальной климатической перестройки на границе плейстоцена и голоцен: геотермические свидетельства / Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Седьмые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. Материалы конференции. Екатеринбург: УрО РАН, 2013. С. 77–79.
24. Демежко Д.Ю., **Горностаева А.А.**, Коноплин А.Д., Глазачев И.В. Тепловая активность горных пород – ее роль в геотермических процессах и метод измерений / Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Седьмые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. Материалы конференции. Екатеринбург: УрО РАН, 2013. С. 92–94.
25. **Горностаева А.А.**, Антипов А.Н. Синхронизация временных шкал геотермических реконструкций палеолимата / XV Уральская молодежная научная школа по геофизике. Сборник докладов. – Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2014. С. 72–74.

26. **Gornostaeva A.**, Demezhko D. Ground surface heat flux histories in the Urals inferred from geothermal data / Geophysical Research Abstracts, Vol. 16, EGU2014-118, 2014, EGU General Assembly 2014.
27. Demezhko D., **Gornostaeva A.** Underground temperatures – evidence of Late Pleistocene-Holocene orbital forcing / Geophysical Research Abstracts, Vol. 16, EGU2014-1170, 2014, EGU General Assembly 2014.
28. **Горностаева А.А.**, Антипин А.Н. Методика синхронизации временных шкал геотермических реконструкций палеоклимата на основе оценок изменений теплового потока через земную поверхность / Международная конференция молодых ученых «Изменения климата и природной среды Северной Евразии: анализ, прогноз, адаптация». 14-20 сентября 2014 года. Кисловодск. Сборник тезисов докладов. М.: ГЕОС, 2014. С. 236–239.
29. Демежко Д.Ю., **Горностаева А.А.**, Коноплин А.Д., Глазачев И.В. Тепловая активность горных пород как петрофизический параметр: измерение и приложения в науках о Земле / Мат-лы IX Университетских геологических чтений «Актуальные вопросы инженерной геологии, гидрогеологии и рационального недропользования», редкол: В.И. Зуй (отв. ред.) [и др.], Минск: Изд. Центр БГУ, 2015. С. 40–42.
30. **Gornostaeva A.**, Demezhko D., Antipin N. Climate reconstructions in the Urals over the last millennium inferred from borehole temperature data / Climate variability and human impacts in Central and Eastern Europe during the last two millennia, Program and Abstracts Book, 2015. Р. 35.
31. **Горностаева А.А.**, Антипин А.Н. Корректировка временной шкалы геотермических реконструкций палеоклимата на основе орбитальных инсоляционных кривых / Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Восьмые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. Материалы конференции. Екатеринбург: УрО РАН, 2015. С. 82–86.
32. Демежко Д.Ю., **Горностаева А.А.**, Майорович Я., Шафандя Я. Новая палеоклиматическая интерпретация данных термометрии скважины Hunt Well (Канада) / Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Восьмые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. Материалы конференции. Екатеринбург: УрО РАН, 2015. С. 107–110.
33. **Горностаева А.А.** Экспериментальные исследования короткопериодных вариаций теплового потока через земную поверхность на основе температурного мониторинга грунта // XVII Уральская молодежная научная школа по геофизике. Сборник докладов. - Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2016. С. 68-70.