

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Горностаевой Анастасии Александровны  
«РЕКОНСТРУКЦИЯ КЛИМАТИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ  
ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ЧЕРЕЗ ЗЕМНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ПО ГЕОТЕРМИЧЕСКИМ  
ДАННЫМ», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы  
поисков полезных ископаемых»

Диссертационная работа А.А. Горностаевой посвящена проблемам, связанным с изучением палеоклимата Земли. Решается важная задача реконструкции климатически обусловленного теплового потока через земную поверхность по экспериментальным данным скважинной термометрии. Актуальность представленных исследований не вызывает сомнений, поскольку: 1) знание климатических изменений, происходивших в далеком прошлом, важно для анализа современного климата и прогноза будущих климатических изменений; 2) на сегодняшний день существует немного возможностей для количественной оценки энергетики климатических процессов прошлого.

Развивая ставший уже традиционным палеоклиматический анализ данных скважинной термометрии (когда реконструируется температурная история земной поверхности), автор предлагает дополнить его оценкой еще одного параметра – климатически обусловленного теплового потока через земную поверхность. Показана возможность оценки вариаций этого параметра двумя способами – непосредственной инверсией геотермограмм и трансформацией предварительно реконструированной истории температурных изменений. Автор развивает второй способ, который, по ее мнению, является более предпочтительным, так как позволяет избежать численного дифференцирования экспериментальной термограммы а, кроме того, использовать ранее полученные температурные истории и данные метеорологических наблюдений.

Соотношения между изменениями температуры земной поверхность и теплового потока являются весьма нетривиальными. В 1982 г. американский геофизик Артур Лахенбрух (Lachenbruch et al., 1982) с коллегами предложили частное соотношение между этими параметрами для случая, когда их монотонные изменения описываются семейством так называемых трехпараметрических степенных законов. Интегральное соотношение позже было получено американскими метеорологами Дж. Вангом и Р. Брасом (Wang and Bras, 1998). В диссертационной работе А.А.Горностаевой предложены конечно-разностные аппроксимации этого соотношения для произвольного изменения температур земной поверхности.

Разработаны алгоритмы и программное обеспечение трансформации изменений температуры в изменения теплового потока и наоборот. На теоретических примерах и результатами эксперимента доказана эффективность предложенных алгоритмов.

В качестве одной из важных составных частей работы можно особенно выделить разработку «геотермической версии» орбитальной настройки временной шкалы (*orbital tuning*). Временная привязка климатических событий прошлого, как правило, является слабым местом многих палеоклиматических свидетельств. Для повышения ее надежности и был разработан метод орбитальной настройки (Martinson et al., 1987). Он предполагает, что реконструированные температурные вариации масштаба  $n(10^4 - 10^5)$  лет определяются главным образом изменениями параметров орбиты Земли и связанными с ними изменениями инсоляции. Синхронизация температурных и орбитальных кривых позволяет «улучшить» датировку. В своей диссертационной работе А.А. Горностаева предлагается сравнивать с орбитальной (инсоляционной) кривой не температурную кривую, а кривую изменений потока через земную поверхность, резонно полагая, что эта характеристика менее инерционна, чем температура поверхности и, в результате, быстрее откликается на внешнее воздействие. Синхронизацию предлагается осуществлять изменением коэффициента эффективной температуропроводности. Одновременно со шкалой изменений потока меняется и временная шкала температурной реконструкции.

Следует отметить, что теоретические построения были реализованы доктором физико-математических наук при анализе конкретных экспериментальных данных. Впервые были получены долговременные (до 30 тысяч лет назад) реконструкции климатически обусловленных изменений теплового потока через земную поверхность на Урале, в Карелии, в Канаде и проведена их палеоклиматическая интерпретация.

Важный палеоклиматический вывод касается влияния двуокиси углерода на потепление в конце последней ледниковой эпохи 15-10 тыс. лет назад. Анализируя хронологию изменения концентраций  $\text{CO}_2$  в атмосфере совместно с реконструированными изменениями потока и температуры, автор приходит к резонному выводу, что этот парниковый газ не сыграл заметной роли в том потеплении, а рост потока и температуры практически полностью определялись инсоляцией. В период последнего тысячелетия солнечная радиация также является главным фактором изменений потока, однако становится заметно влияние двуокиси углерода и вулканических сульфатов. В 20 веке колебания теплового потока происходят в противофазе с колебаниями потока солнечной радиации. Наибольший

вклад в эти вариации потока вносит усиление парникового эффекта. Хотя сделанные такие палеоклиматические выводы и нельзя считать абсолютно надежными (недостаточна статистика, нет независимых подтверждений из других источников), это не умаляет их значения как результатов реализации новых методических подходов в палеоклиматологии. Дальнейшее применение разработанных в диссертации методов позволит эффективнее интегрировать геотермические свидетельства в науку о климате.

Работу А.А.Горностаевой можно рассматривать и как удачную попытку «навести мосты» между двумя довольно изолированными дисциплинами: геотермией, как правило, не принимающей во внимание то, что происходит выше земной поверхности, и физикой атмосферы, мало интересующейся процессами ниже поверхности. Так, во многих моделях общей циркуляции атмосферы нижние граничные условия редко опускают на глубину более нескольких метров, что может приводить к значительным ошибкам в моделировании, особенно – долговременных процессов (Gonzalez-Rouco et al., 2009). В работе А.А.Горностаевой оцениваются изменения теплосодержания земной коры до глубин  $> 1$  км.

Диссертация А.А. Горностаевой состоит из списка условных обозначений и сокращений, введения, 5 глав, заключения и списка литературы (180 наименований). Общий объем работы 127 страниц.

Во введении изложены актуальность работы, разработанность темы исследований, цели и задачи исследования, сформулированы три защищаемых положения, описаны теоретическая и практическая значимость, научная новизна исследования, приведено краткое содержание диссертации.

В Главе 1 перечислены основные процессы и факторы, формирующие тепловое поле верхней части земной коры, описано формирование теплового баланса земной поверхности, введен параметр теплового потока через земную поверхность.

В Главе 2 описаны принципы реконструкции изменений температуры земной поверхности и теплового потока через поверхность в прошлом. Кратко перечислены существующие методы реконструкции. Сделан вывод о целесообразности оценки теплового потока через земную поверхность по данным об изменении температуры поверхности.

Разработанный автором инструментарий для получения реконструкций изменений теплового потока через земную поверхность по геотермическим данным и их палеоклиматической интерпретации представлен в Главах 3 и 4.

Глава 3 содержит описание алгоритма взаимной трансформации рядов вариаций температуры земной поверхности и теплового потока через поверхность, а также результаты теоретической и экспериментальной проверки работы алгоритма. Результаты проверки работы алгоритма удовлетворительны.

В Главе 4 предложена методика орбитальной корректировки временных шкал геотермических реконструкций палеоклимата. Методика предполагает синхронизацию теплового потока с внешней радиацией в предположении, что отклик теплового потока происходит линейно.

Новые палеоклиматические реконструкции, полученные автором с использованием разработанных алгоритмов, представлены в Главе 5. Изменения теплового потока через земную поверхность восстановлены за периоды последних 30 000 тыс. лет (на Урале, в Карелии и в Канаде), 1000 и 150 лет (на Урале). Сопоставление тепловых историй с различными характеристиками внешнего радиационного воздействия показало, что главным фактором, определяющим изменения теплового потока через земную поверхность в масштабе десятков тысяч лет и последнее тысячелетие, является солнечная радиация. Однако в вековые вариации теплового потока наибольший вклад вносит усиление парникового эффекта.

Полученные в результате исследований выводы в достаточной степени обоснованы. Их достоверность обеспечена использованием классических уравнений теплопереноса, стандартных статистических методов анализа, результатами экспериментальных исследований, хорошим согласием с другими источниками палеоклиматической информации.

Научная новизна проведенных исследований состоит в том, что за счет введения в анализ нового энергетического параметра – теплового потока через земную поверхность – расширено интерпретационное поле геотермических данных и их палеоклиматическая информативность. Предложен новый подход к оценке энергетики долговременных климатических процессов, а также способ выявления радиационных факторов, определяющих изменения климата различных временных масштабов. Предложены алгоритмы оценки теплового потока через земную поверхность по геотермическим данным и уточнения датировок геотермических реконструкций палеоклимата.

Полученные А.А. Горностаевой результаты вносят существенный вклад в развитие палеоклиматического анализа геотермических данных, формирование представлений о том, как менялся климат прошлого и его причинно-следственных связях. Исследование имеет большое значение для понимания механизмов функционирования климатической системы Земли.

По содержанию и оформлению диссертации имеются следующие замечания:

1. Расчетные астрономические данные по инсоляции характеризуют поток солнечной энергии, приходящий на верхнюю границу атмосферы Земли, в то время как на климат влияет количество энергии, поглощенной атмосферой и поверхностью Земли, величина которой зависит, в том числе и от планетарного альbedo, которое с ростом температуры поверхности уменьшается из-за таяния ледников и уменьшения площади криосистемы. Это, в свою очередь, увеличивает количество энергии, поглощенной поверхностью. Анализ данного вопроса отсутствует в диссертации.
2. На графиках расчетных данных для температуры земной поверхности и теплового потока не приведены величины оцененных ошибок, что не позволяет определить, являются ли полученные особенности на кривых, например на рисунках 5.17 (стр.100) и 5.18 (стр.104) реальными вариациями или вычислительными артефактами, лежащими внутри ошибок расчетов.
3. В разделе 1.2 Тепловой баланс земной поверхности на рисунке 1.1 (стр.27), величина потока «RB – встречное излучение атмосферы» отражена стрелкой не соответствующей реальному масштабу данной величины.

Данные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы А.А. Горностаевой, выполненной на высоком научном уровне и являющейся значительным вкладом в решение задач палеоклиматических реконструкций по геотермальным данным.

Результаты исследований опубликованы в 33 отечественных и зарубежных изданиях, в том числе 7 публикаций в изданиях, входящих в перечень ВАК, доложены автором на российских и международных конференциях. Зарегистрирована программа для ЭВМ, позволяющая проводить трансформацию «температура-поток» и процедуру корректировки временных шкал на основе орбитальной настройки. Автореферат диссертации в достаточной степени отражает содержание работы и основные результаты.

Полагаю, что диссертация А.А. Горностаевой является оригинальным научным исследованием в области палеоклиматологии и соответствует всем критериям, установленным п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) с изменениями Постановления Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2016 г. № 335 «О внесении изменений в Положение о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Автор диссертационной работы А.А. Горностаева заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Официальный оппонент

Заведующий лабораторией физики климата и окружающей среды  
Института естественных наук и математики

ФГАОУ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,

доктор физико-математических наук

Захаров В.И.  
06.06.2017 г.

Захаров Вячеслав Иосифович

доктор физико-математических наук, специальность ВАК 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника», заведующий лабораторией физики климата и окружающей среды Института естественных наук и математики ФГАОУ Уральский федеральный университет, имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (сокращенное название: ИЕНИМ УрФУ).

620000, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 48

Тел.: 8-9122777204

E-mail: v.zakharov@remotesensing.ru

Я, Захаров Вячеслав Иосифович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Захаров В.И.



Подпись зав. лаборатории физики климата и окружающей среды ИЕНИМ УрФУ, доктора физ.-мат. наук Захарова В.И. заверяю.

Ученый секретарь ИЕНИМ УрФУ  
канд. физ.-мат. наук

Памятных Л.А.