

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Екайкина Алексея Анатольевича

"Формирование климатического сигнала изотопного состава ледяных отложений Центральной Антарктиды"

на соискание учёной степени доктора географических наук по специальности
1.6.8 – Гляциология и криология Земли.

Диссертация А. А. Екайкина посвящена закономерностям формирования климатического сигнала изотопного состава по керну снежно-фирново-ледяных отложений Антарктиды и решению фундаментальных проблем палеогеографии, палеоклиматологии и криологии.

Актуальность работы состоит в развитии теоретических основ формирования климатического сигнала, методологии реконструкций палеоклиматических характеристик плейстоцена и повышении достоверности моделей палеотемператур. Определение возможностей, погрешностей и ограничений изотопно-температурного метода опирается на современный анализ климатических условий, экзогенных, физических и геохимических процессов. Диссертация А.А. Екайкина вносит вклад в решение острых дискуссионных вопросов гляциологии, криологии Земли и палеогеографии, в усовершенствование методов исследования и интерпретации рядов стабильных изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}$), водорода (δD), дейтериевого эксцесса (d_{ex}).

Научная новизна диссертации состоит в палееореконструкции температур голоцена и плейстоцена льдов Антарктиды на основе повышения разрешающей способности изотопно-температурной модели и новых результатах полевых, современных экспериментальных и лабораторных исследований атмосферных осадков, снега, фирна и льда.

Личный вклад автора. Материалы диссертации получены лично соискателем или при его участии в 17-ти экспедициях в Антарктиду с 1998 по 2023 г. Были собраны пробы, измерен изотопный состав снега и льда, выполнены лабораторные эксперименты по изучению постдепозиционных изменений изотопного состава снежной толщи; выполнен анализ теоретических предпосылок формирования изотопного состава, и модели количественных реконструкций температуры по изотопам снега и льда в

российских и зарубежных публикациях. Это позволило автору выявить погрешности изотопно-температурного метода и границы его применения.

Содержание, обоснованность научных положений и новизны.

Диссертация состоит из введения, 9 глав, заключения, выводов, терминов, сокращений, литературы и приложения.

В главе 1 выделены современные проблемы применения изотопных методов для реконструкции изменения температуры в прошлом по снежно-фирновым и ледяным кернам - расхождение между реконструкциями палеотемператур, полученных разными методами, подходами к пробоотбору и природными условиями в разных регионах Антарктиды.

Глава 2 посвящена развитию изотопно-температурного метода, теоретическим основам перераспределения стабильных изотопов кислорода и водорода, анализу и уточнению влияния различных факторов и процессов на формирование климатического сигнала изотопного состава атмосферных осадков и снежно-фирновой толщи, возможностям моделей отражающих изотопно-температурных зависимости. В ней детально рассмотрено внедрение в "простую" изотопно-температурную модель геохимических циклов дейтерия, кислорода 18 и кислорода 17, и достоверно обосновано 1-е защищаемое положение.

Главы 3-7 содержат детальный разбор различных методов, использованных автором при проведении комплекса исследований, которые обеспечивают сопоставимость и достоверность результатов диссертации. К ним относятся методы: опробования и измерения изотопного состава осадков - ледяных игл, изморози, снега; - мониторинга снегонакопления, расчетов статистически достоверных параметров и погрешности измерений изменчивости изотопного состава в пространстве и по глубине (во времени) - депозиционного шума в стратиграфической последовательности слоёв снега в шурфах и кернах льда; - мониторинга постдепозиционных процессов (изотопного фракционирования) поверхностного слоя и верхней части снежной толщи; экспериментов по экспонированию снежных образцов, измерению изотопного состава водяного пара, влажности приземного слоя воздуха и трансформаций изотопов в снеге в ходе массообмена с атмосферой.

В главе 3 установлены различия изотопно-температурной зависимости этих осадков; сезонные, средние годовые и межгодовые значения изотопного

состава осадков в р-не ст. Восток; доказано, что изотопный состав осадков воспроизводится с помощью простых изотопных моделей, т.е. обоснована применимость расчетной модели.

В главе 4 детально рассмотрены преобразование климатического изотопного сигнала осадков в верхней части снежной толщи: во временных рядах изотопного состава толщи установлен механизм формирования депозиционного (осадочного) шума за счет неравномерного накопления снежных слоев (под влиянием ветровой эрозии, микро-, мезо- и мегарельефа) и сезонных колебаний (увеличение накопления снега зимой, уменьшение летом за счет сублимации и /или уплотнения снега). Доказано 2-е защищаемое положение - низкое отношение сигнала к шуму изотопного состава и скорости накопления снега для временных рядов в районе станции Восток, что обуславливает минимальное временное разрешение палеоклиматической реконструкции не более 10 лет по более чем 10-и индивидуальным рядам, 100-1000 лет по одному керну.

В главе 5 экспериментально и в стратиграфической последовательности снежной толщи установлено, что постдепозиционные изменения изотопного состава связаны с сублимацией снега и обратной сублимацией за счет обмена с атмосферой в поверхностном слое 0-20 см; в летний сезон происходит изотопное утяжеление в слое снега 3-15 см на величину 10-30 ‰ по δD , и снижением значений δx_s , каждый годовой слой подвергается фракционированию. Оценено сглаживание амплитуды колебаний изотопного состава за счет диффузии, зависящей от температур воздуха и снега, скоростей ветра и накопления снега. Доказано 3-е защищаемое положение - в деятельном слое снега в среднем за 2,5 года изотопный состав преобразуется: концентрация дейтерия и кислорода δx_s увеличивается, а значения δx_s уменьшаются, меняется соотношение между ними; сигнал короткопериодных (10-11 лет) колебаний климата в Антарктиде, в основном, утрачен в толще ниже 50 м.

В главе 6 рассмотрены факторы, влияющие на формирование климатической летописи изотопного состава снежно-фирново-ледяной толщи полярных ледников: адвекция влаги, сезонная неравномерность, прерывистость и аномалии выпадения разных типов и источников влаги атмосферных осадков.

Впервые показано влияние крупных форм снежного рельефа и динамики ледников в разных районах Антарктиды на формирование вариаций изотопного состава.

Глава 7 посвящена методике построения изотопно-температурной калибровочной функции для глубоких кернов льда с учетом зависимостей: изотопы снега – температура воздуха; изотопы атмосферных осадков – температура воздуха / конденсации, а также сезонных и межгодовых колебаний параметров, результатов моделирования изотопного состава осадков и независимых данных о температуре воздуха. Приведено моделирование пространственного изотопно-температурного и временного изотопно-температурный градиентов на период голоцен – максимум оледенения, показавшие высокую сходимость с данными других станций Антарктиды.

Доказано положение 4 - простая изотопно-температурная модель с поправками на влияние постдепозиционных процессов является оптимальной для палеотемпературных реконструкций керна льда. Использование измеренной температуры воздуха по метеоданным вблизи станции Восток для калибровки ряда изотопного состава снега и льда ненадежно в отсутствии статистической связи между изотопным составом и средней годовой температурой воздуха. Новизна состоит в моделировании изотопного состава снежно-фирново-ледяных отложений и верификации результатов для его обоснования в качестве палеотермометра.

В главе 8 приведен анализ палеореконструкций температуры по кернам льда в плейстоцене. Установлено, что изотопно-климатический сигнал льда сохранился частично в интервале 1,2–0,42 млн. л.н. и непрерывно - от 0 до 420 тыс. лет назад; изотопно-температурный метод изучения антарктического льда необходим для палеогеографических реконструкций в масштабе 10^2 - 10^6 лет. Доказано положение 2: детальность палеоклиматических реконструкций обратно пропорциональна количеству индивидуальных рядов, использованных для построения сводного ряда; по одному керну временное разрешение реконструкции составляет ~100 лет, а при увеличении количества кернов - минимальное разрешение ~10 лет.

В главе 9 подведены основные итоги и перспективы палеоклиматических изотопных исследований ледниковых систем. Основные

выводы достоверны за счет комплекса методов исследований и основаны на современных фундаментальных знаниях о формировании изотопного состава и в полном объеме отражают защищаемые положения и новизну диссертации, Достоинство заключения - выделенные автором существующие пробелы в теории формирования климатического сигнала изотопного сигнала ледяных отложений и направление развития в области геохимии стабильных изотопов - разработку физической модели постдепозиционных изотопных изменений.

Теоретическая и практическая значимость

Усовершенствована теоретическая основа палеоклиматических реконструкций: установлена индикаторная роль изотопов с учетом процессов фракционирования на всех этапах накопления - от конденсации осадков в атмосфере до преобразования снега, фирна и льда в зоне годовых колебаний температур в полярных регионах, использованы три изотопных параметра (концентрация дейтерия/кислорода δD , эксцесс дейтерия и эксцесс кислорода $\delta^{18}O$). Обоснована методическая база для повышения разрешающей способности изотопно-температурной модели и палеекострукции температур: комплекс экспедиционных, аналитических и экспериментальных методов.

Полученные результаты предполагается использовать для палеоклиматических реконструкций в реализации нового проекта Росгидромета в 2025 году - получении и интерпретации изотопов ледяного керна возрастом до 1-1,5 млн. лет в районе Купола "В" Антарктиды, а также для подготовки специалистов, магистров по изотопной геохимии, палеоклиматологии и гляциологии в Санкт-Петербургском государственном университете.

Замечания и вопросы.

Следует отметить, что отдельные защищаемые положения сформулированы не конкретно, требуют уточнения, повторены в оценке новизны исследования:

1. Нет ли логического противоречия в формулировке защищаемых положений 3 и 4? Если климатический сигнал изотопов снежно-ледяной толщи преобразован и связан с летней температурой, то почему использование усовершенствованной простой изотопной модели изотопно-температурной калибровки оптимально? Уточните, в чем состоит усовершенствование модели.

2. Поясните, почему ненадежна калибровка изотопного ряда по ряду инструментально измеренной температуры воздуха для палеотемпературных реконструкций?

3. Дайте, пожалуйста, четкое определение физического смысла параметров второго порядка изотопного состава.

4. В новизне не отражено важнейшее достижение исследования: впервые уточнен механизм передачи температурного сигнала при современных и прошлых климатических изменениях изотопному составу снежно-фирново-ледяной толщи Центральной Антарктиды. Почему?

5. Так ли это, если изотопный состав современного снега на ст. Восток связан с летней температурой воздуха, то этот вывод справедлив и для всего ледяного керна? В этом случае как палеоклиматические реконструкции по керну ст. Восток согласуются с реконструкциями по кернам других районов Антарктиды и Гренландии?

Есть отдельные неясности в тексте, например: что такое «теплое ядро» в годовом ходе зимы (апрель-сентябрь); почему на стр. 145 - скорость ветра больше, поэтому "в ложбинах больше доля зимних осадков и ниже изотопный состав снега, а на гребнях – напротив, доля зимнего снега выше и изотопный состав тяжелее". Не все единицы измерения имеются в списке сокращений; не всегда понятны подписи к графикам (с. 158. рис 5.4, с. 173 рис. 5.12).

Сделанные в отзыве замечания связаны со сложностью поставленной цели исследования и многогранностью решаемых задач, ни в коем случае не снижают положительного мнения о высоком качестве многолетней работы и диссертации А.А. Екайкина в целом. Автореферат и публикации автора полностью соответствуют содержанию диссертации

Выводы и защищаемые положения диссертации достоверны; палеореконструкции температур неоплейстоцена и голоцена, полученные на основе дополнительных изотопных параметров моделирования, обоснованы результатами статистической обработки полевых и лабораторных экспериментальных данных и имеют большое методическое значение при решении палеогеографических задач, заслуживает искомой степени.

Докторская диссертация Екайкина Алексея Анатольевича «Формирование климатического сигнала изотопного состава ледяных

отложений Центральной Антарктиды» по своей актуальности, новизне, обоснованности и достоверности полученных результатов полностью соответствует требованиям предъявляемым п. 9–11, 13, 14 «Положения ВАК о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013г (с изменениями включая № 1168 от 01.10.2018.), и предъявляемым требованиям к диссертациям на соискание ученой степени доктора географических наук, а её автор Алексей Анатольевич Екайкин заслуживает присуждения ученой степени доктора географических наук по специальности 1.6.8 – Гляциология и криология Земли.

Официальный оппонент

Слагода Елена Адольфовна, д.г.-м.н. по специальности 25.00.36, г.н.с. отдела "Мониторинга и информационно-геосистемного моделирования криолитозоны" Института криосферы Земли - обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии (ИКЗ ТюмНЦ СО РАН);

Адрес: Россия 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, д.86. Сайт: <http://www.ikz.ru/>.
Тел.: 8(912)-382-13-05; E-mail: eslagoda@ikz.ru; easlagoda@mail.ru;

Я, Слагода Елена Адольфовна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку

25 октября 2024 г.

Подпись Е.А. Слагоды "Заверяю"

И.о. директора
ТюмНЦ СО РАН

Е. А. Слагода



Е. П. Ренев