

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Екайкина Алексея Анатольевича «Формирование климатического сигнала изотопного состава ледяных отложений Центральной Антарктиды», представленную на соискание ученой степени доктора географических наук по научной специальности 1.6.8 – Гляциология и криология Земли.

Актуальность темы диссертационного исследования А.А. Екайкина обусловлена активным развитием палеоклиматических исследований как по своим методам, так и по объектам изучения. Климатическая повестка современности занимает первые строчки новостных лент как на научном, так и в политическом аспектах. Активно дискусируется вопрос об антропогенной обусловленности регистрируемого потепления климата последних десятилетий. Поэтому результаты многолетних исследований Алексея Анатольевича климатического сигнала, фиксируемого в изменениях изотопного сигнала во льдах Антарктиды, являются своевременными и актуальными. Также, следует отметить, что это направление палеоклиматических исследований еще не очень достаточно развито в отечественной науке.

Целью диссертационной работы является установление закономерностей формирования климатического сигнала изотопного состава снежно-фирново-ледяных отложений Центральной Антарктиды на всех этапах этого процесса, выявление возможностей и ограничений изотопно-температурного метода. Для достижения сформулированной цели соискателем были решены следующие задачи: (1) усовершенствовать простую модель изотопного состава атмосферных осадков в Центральной Антарктиде, включающую геохимический цикл дейтерия, кислорода 18 и кислорода 17, и снабженную модулем решения обратной задачи; (2) выполнить настройку этой модели по данным об изотопном составе 1) водяного пара атмосферы в источнике влаги, 2) осадков на станции Восток, а также 3) по распределению изотопного состава поверхностного слоя снега вдоль профиля между станциями Прогресс и Восток; (3) изучить внутри- и межгодовой ход изотопного состава трёх типов осадков (осадки из облаков, ледяные иглы и изморозь) в Центральной Антарктиде, количественно охарактеризовать зависимость между изотопным составом осадков, с одной стороны, и приземной температурой воздуха, а также температурой конденсации, с другой стороны; (4) Изучить процесс накопления вновь выпавшего снега на поверхности снежной толщи, определить соотношение между климатическим сигналом и «депозиционным шумом» в вертикальных профилях изотопного состава снежно-фирновой толщи; (5) с помощью лабораторных экспериментов и полевых наблюдений изучить постдепозиционные изменения изотопного состава осадков, имеющие место в верхней части снежной толщи; (6) определить, в какой степени процессы молекулярной диффузии видоизменяют изотопный состав снежно-фирновой толщи в ходе процессов метаморфизма; (7) выявить вклад прочих процессов (прерывистость и сезонность снегонакопления, изменение условий в источнике влаги, изменение высоты поверхности ледника, изменение гляцио-климатических характеристик вверх по линии тока от точки бурения) в формирование климатического сигнала изотопного состава снежно-фирново-ледяной толщи; (8) выявить оптимальную стратегию калибровки изотопного сигнала во временных рядах изотопного состава снежно-фирново-ледяной толщи в Центральной Антарктиде с целью извлечения палеоклиматической (палеотемпературной) информации; (9) сопоставить палеоклиматические реконструкции

по фирновым и ледяным кернам с помощью изотопно-температурного метода в Центральной Антарктиде с данными независимых палеотемпературных реконструкций.

Структура и содержание работы. Диссертационная работа изложена на 339 страницах и состоит из введения, девяти глав, заключения, глоссария, списка сокращений, списка литературы (включает 356 источников, в том числе 320 иностранных) и двух приложений. Работа иллюстрирована 57 рисунками и 3 таблицами.

Во *введении* (стр. 9-19) обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи исследования, защищаемые положения, охарактеризована научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, приведены сведения об апробации и степени достоверности полученных результатов, описан личный вклад автора и дается краткая характеристика структуры и объема диссертации.

В *первой главе «Постановка проблемы»* (стр. 20-37) дается характеристика современного состояния изотопно-климатических исследований в мире и в Антарктиде. Приведен обзор литературы, анализ которой свидетельствует о том, что изотопно-температурный метод позволяет надёжно реконструировать изменения температуры в прошлом по данным снежно-фирновых и ледяных кернов. Соискатель постулирует, что к началу 2000-х годов накопилось большое количество данных и фактов, которые указывают на присущие этому методу погрешности и ряд ограничений. Это позволило соискателю сформулировать ряд научно-методических проблем, поиску решения которых была посвящена его научная деятельность последние 25 лет. Научные проблемы довольно полно и объективно рассмотрены в главе. Соискатель демонстрирует хорошее владение материалом по теме исследования.

В *главе 2 «Теоретические представления о формировании изотопного состава атмосферных осадков в Центральной Антарктиде»* (стр. 38-82) рассмотрены теоретические вопросы формирования изотопного состава водяного пара и атмосферных осадков, а также изложена теория изотопно-температурного метода. В этой главе дается описание авторской изотопной модели (Salamatin et al., 2004), базирующейся на ранних разработках предшественников, но которая была усовершенствована, благодаря учету притока водяного пара извне океана и где использовалась оптимизированная схема расчёта изотопного состава смешанных осадков. В процессе работы соискателя над диссертационным исследованием было выполнено дальнейшее усовершенствование этой модели добавлением геохимического цикла ^{17}O , а также введением блока решения обратной задачи на основе алгоритма случайного поиска Монте-Карло (Екайкин, 2024). Верификация и настройка модели выполнена на основе натурных наблюдений и данных об изотопном составе водяного пара в Центральной Антарктиде, а также данных об изотопном составе снега вдоль профиля между станциями Прогресс и Восток. Модель была апробирована для интерпретации данных об изотопном составе атмосферных осадков и кернов фирна и льда (станция Восток).

Глава 3 посвящена особенностям формирования изотопного состава осадков на станции Восток (стр. 83-111). В главе представлены авторские результаты мониторинга изотопного состава осадков на станции Восток; описываются методики отбора образцов осадков и лабораторных измерений изотопного состава природных вод; даются характеристики количества осадков и их распределения по типам (ледяные иглы, снег, изморозь), а также годового хода температуры и изотопного состава осадков; сопоставляются данные со станции Восток с результатами мониторинга изотопного состава

осадков на станциях Конкордия и Купол Фиджи (таблица 3.1, стр. 108-110). Следует отметить, что мониторинговые наблюдения соискателя изотопного состава осадков на станции Восток были им организованы впервые и выполнялись на протяжении многих лет. Первые наблюдения были организованы А.А. Екайкиным в летний полевой сезон 44-ой Российской антарктической экспедиции (РАЭ-44) в декабре 1998 - январе 1999 года, и в дальнейшем продолжались с перерывами летними и летне-зимними сезонами до декабря 2019 г. – января 2022 года. Собрано было 479 образцов, в которых измерена концентрация дейтерия и ^{18}O , а в ряде образцов и концентрация ^{17}O . Установлено, что изотопный состав осадков имеет ярко выраженный сезонный ход – высокая концентрация тяжёлых изотопов летом и низкой концентрацией зимой. Выполненный соискателем анализ изотопного состава осадков в районе станции Восток и сравнение этих данных с данными из других станций в Антарктиде показал, что современный изотопный состав осадков хорошо описывается изотопной теорией и может быть воспроизведен с помощью простых изотопных моделей. Автор постулирует, что изотопный состав снежно-фирново-ледяных отложений может быть использован в качестве палеотермометра.

Глава 4 «Климатический сигнал и депозиционный шум в рядах изотопного состава снежно-фирново-ледяной толщи» (стр. 112- 151) посвящена вопросам пространственно-временных особенностей накопления снежных осадков в Антарктиде и формирования «депозиционного шума». Отмечается, что изучение баланса массы снежной поверхности Антарктиды является приоритетной задачей современной гляциологии и климатологии. Первые наблюдения за процессом снегонакопления на станции Восток начались в 1958 году. Пространственные особенности распределения снега на полигоне в районе станции выполнены соискателем. Выявлено, в частности, что случайные разброс прироста снега из-за снежного микрорельефа («депозиционный шум») приводит к появлению «стратиграфического шума» во временном ряду снегонакопления при наблюдениях в одной точке. В главе описывается методика измерения снегонакопления (ст.Восток), показаны особенности пространственного разброса значений прироста снега и его плотности. В частности, анализ большого массива данных (22 345 индивидуальных значений накопления снега) позволил выявить экстремумы этих значений - -29,5 и +33 см, при среднемесечном значении прироста снега +0,51 см. Этот разброс значений обусловлен взаимодействием ветрового перераспределения снега с рельефом (микрорельефом) местности. Оценка значений накопления снега позволил соискателю оценить отношение сигнал/шум. Установлено, что 96% дисперсии временного ряда прироста высоты снега объясняется «депозиционным шумом» и только 4% связано с климатическим сигналом! Обнаружены квазипериодические колебания снегонакопления, связанные с перемещением мезо- и мегадюн, что важно при оценке скорости снегонакопления. Неравномерность снегонакопления на поверхности приводит к формированию шума во временных рядах изотопного состава. Показаны сложности, связанные с неравномерностью снегонакопления в реконструкциях климатического сигнала с разрешением до 1 года. Необходимо иметь 10 и более рядов для адекватной оценки климатического сигнала с разрешением 10 и более лет. Если же имеется один ряд, то точность палеореконструкций составляет 100-1000 лет. Это важный результат, который необходим при планировании палеоклиматических исследований!

Глава 5 «Постдепозиционные изменения изотопного состава снежной толщи» (стр. 152-207) посвящена изучению постдепозиционных процессов (результат активного

переноса водяного пара между отдельными зёрнами льда через поровое пространство – сублимация и ресублимация водяного пара) в снежном покрове Антарктиды. Эти процессы приводят к изменению среднего изотопного состава верхнего слоя снега и к сглаживанию амплитуды изотопных колебаний в снежно-фирновой толще. Соискателем для изучения этих процессов на протяжении 7-ми летних сезонов (с декабря 2016 года по февраль 2023 года) и 2-х годовых циклов (2017 и 2020 гг.) на станции Восток выполнен мониторинг изотопного состава поверхностного слоя (до 1,5 см) снежной толщи. Изучен изотопный состав снега по вертикальным профилям. Соискателем впервые использовался лазерный анализатор для измерения влажности воздуха и изотопного состава водяного пара. Им впервые были проведены лабораторные эксперименты, имитирующие постседиментационные процессы (университет Хоккайдо, Япония). В результате было установлено, что изотопный состав снега утяжеляется в процессе постдепозиционных процессов, а изотопные модификации охватывают верхний слой снега до 20 см. Иногда возможно полное стирание изначального температурного сигнала атмосферных осадков и приобретает новый сигнал, формирующийся в ходе постседиментационных процессов.

В шестой главе дан обзор иных факторов, которые участвуют в формировании зависимости между температурой приземного воздуха в Антарктиде и изотопным составом снежно-фирново-ледяных отложений (стр. 208-227). К этим факторам относятся сезонность и прерывистость осадков, изменения источника влаги, в том числе участие стратосферной влаги, соотношение между приземной температурой воздуха и температурой конденсации, динамика ледника. Установлено, что наиболее важным из перечисленных факторов являются условия в источнике влаги, которые трансформировались в прошлом и влияли на изотопный состав осадков в Центральной Антарктиде. Вторым по значимости – это динамика ледника (изменение высоты поверхности ледяного щита).

Глава 7 «Методика построения изотопно-температурной калибровочной функции» (стр. 228-248) посвящена обзору методов калибровки изотопно-температурной зависимости и их использования при реконструкциях температуры воздуха по данным изотопного состава глубоких ледяных кернов в Антарктиде. Соискатель дает полную характеристику подходов с их плюсами и минусами, применяемых для изотопно-температурных палеореконокструкций: (1) пространственная корреляция между изотопным составом снега и среднегодовой температурой воздуха; (2) изотопные модели; (3) сезонная зависимость между изотопным составом атмосферных осадков и приземной температурой (или температурой конденсации); (4) межгодовая изменчивость изотопного состава осадков (сопоставление изотопного состава снега с рядом данных приземной температуры); (5) использование независимых данных о температуре воздуха для тех интервалов времени, для которых имеются изотопные данные (например, результаты скважинной термометрии, данные об изотопном составе инертных газов во включениях во льду).

В восьмой главе «Реконструкция климата позднего плейстоцена по данным изотопно-температурного метода» (стр. 249-267) приводятся примеры палеореконокструкций климата позднего плейстоцена Антарктиды и Гренландии (раздел 8.1), реконструкции климата для морских изотопных стадий МИС 5е (120 тыс.л.н.) и МИС 11 (420 тыс. л.н.), в том числе и на основе авторских данных по буровой скважине «Восток» (раздел 8.2) и для последних 2000 лет голоцена (раздел 8.3). Подтверждена надежность изотопно-температурного метода при выполнении палеореконокструкций климатической изменчивости в прошлом.

В заключительной 9 главе «Пробелы в знаниях и дальнейшие направления исследований» (стр. 268-276) фиксируются выявленные в ходе исследования проблемы в области изотопно-температурных реконструкций по ледовым кернам. Наиболее важным направлением будущих исследований в этой области соискатель считает создание физической модели постдепозиционных изотопных изменений.

В *Заключение* (стр. 277-281) формулируются основные выводы диссертации.

Замечания и пожелания:

1. Не хватило в работе самой защиты положений. Они упоминаются только в конце диссертации в заключение, где указано какие из выводов к каким положениям относятся. Не слова о них не говорится в главах диссертации.
2. На взгляд оппонента, сильная сторона диссертации – это ее научно-методическая часть. Автором предложены новые улучшенные методы и модели, обобщен огромный массив данных, позволивший оценить роль всех природных факторов, формирующих изотопный сигнал, объяснены процессы его формирования. Об этом говорят и защищаемые положения (Усовершенствована модель..., оценка детальности и временного разрешения реконструкций..., роль постседиментационных процессов..., стратегия изотопно-температурной калибровки..., реконструкция температуры должна учитывать изменения условий в источнике влаги...). Более слабая сторона – это не четко сформулированные теоретические положения об особенностях или закономерностях формирования изотопного сигнала в Южном и Северном полушариях.
3. Интересная глава 8 с палеореконструкциями, основанными на изотопно-температурных моделях. Не хватило графического сравнения изотопных кривых и кривых палеотемператур для Гренландии и Антарктиды, чтобы визуально увидеть синхронность/асинхронность палеогеографических событий.
4. Из технических замечаний – это неоднородность по объему глав от 56 стр. (глава 5) до 7 стр. (глава 9).

Однако, не смотря на выше указанные дискуссионные моменты, диссертационное исследование А.А. Екайкина оценивается положительно.

Научная новизна выполненного диссертационного исследования заключается в следующем: (1) в работе впервые выполнен комплексный анализ и полный обзор всех процессов, формирующих климатический сигнал изотопного состава снежно-фирново-ледяной толщи в Центральной Антарктиде; (2) впервые в российской практике разработана модель изотопного состава осадков, включающая геохимический цикл ^{17}O и модуль решения обратной задачи; (3) создан уникальный банк данных об изотопном составе атмосферных осадков на станции Восток; (4) впервые с помощью лазерного анализатора измерен изотопный состав водяного пара атмосферы в районе станции Восток; (5) соискателем изучены постдепозиционные изменения изотопного состава снега и сделан вывод о том, что изотопный состав снежной толщи связан с летней температурой снега, а не со средней годовой температурой воздуха; (6) впервые показана роль крупных форм снежного рельефа (мезо- и мегадюны) в формировании неклиматических вариаций изотопного состава снега во временных рядах этого параметра; (7) впервые в мировой практике для палеоклиматических реконструкций использованы три изотопных параметра (концентрация дейтерия/кислорода 18, эксцесс дейтерия и эксцесс кислорода 17).

Практическая значимость диссертационного исследования А.А. Екайкина заключается в использовании авторских методических разработок и полученных

результатов в палеоклиматических реконструкциях, в том числе и в планируемом проекте Росгидромета в 2025 году. Авторская усовершенствованная модель изотопного состава доступна для широкого круга пользователей (доступ www.cerl-aari.ru). Все авторские наработки широко используются в лекционных и практических занятиях по изотопной геохимии, гляциологии и палеоклиматологии в ВУЗах.

Автореферат изложен на 56 страницах, включая 7 рисунков, полностью отражает содержание диссертации. Сформулированные выводы в заключении соотнесены с пятью защищаемыми положениями.

Достоверность выводов диссертации базируется на обширном фактическом материале, полученным лично соискателем с 1998 по 2023 год в процессе полевых исследований в Антарктиде (станция Восток) и лабораторных анализов с применением современных методов и высокоточной аппаратуры. Обработка фактического материала с использованием различных статистических методов, графического и картографического отображения, методов экспериментального и математического моделирования определяют обоснованность и достоверность сделанных в диссертации выводов. В основу работы легли результаты, полученные в ходе выполнения исследований при поддержке грантов РНФ и РФФИ, что демонстрирует высокую научную значимость изотопных исследований в Антарктиде.

Основные результаты диссертации отражены в 49 научных статьях, опубликованных в изданиях ВАК и в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus. Результаты исследований апробированы на международных и всероссийских научных конференциях разного уровня.

Диссертация А.А. Екайкина «Формирование климатического сигнала изотопного состава ледяных отложений Центральной Антарктиды» по своей актуальности, новизне, обоснованности и достоверности полученных результатов полностью соответствует пп. 9–11, 13 и 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 требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора географических наук. Автор диссертации Алексей Анатольевич Екайкин заслуживает присуждения ученой степени доктора географических наук по специальности 1.6.8 – Гляциология и криология Земли.

Официальный оппонент

Субетто Дмитрий Александрович, доктор географических наук по специальности 25.00.36 - Геоэкология, декан факультета географии ФГБОУ ВО «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена», заведующий кафедрой физической географии и природопользования, доцент.

Адрес: Россия 191186, г. Санкт-Петербург, набережная р. Мойки, д. 48. Сайт: <http://www.herzen.spb.ru/>. Тел.: 8-9213785532; E-mail: subettoda@herzen.spb.ru; subetto@mail.ru.

Я, Субетто Дмитрий Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку

РГПУ им. А.И. ГЕРЦЕНА
подпись Д. А. Субетто

Д. А. Субетто

28 октября 2024 г.

удостоверяю «28» 10

Отдел кадров управления по работе с кадрами
и организационно-контрольному обеспечению

Ведущий документовед
отдела кадров

Ю.В. Пасечник